Rote Riesen, Weiße Zwerge und Schwarze Löcher

Teil 1: Astrophysik

Andreas Kellerer

September 2017

Vorwort:

Liebe Leserin, lieber Leser,

das vorliegende Skript habe ich in erster Linie geschrieben für die Schülerinnen und Schüler

- des Kurses „Astrophysik“ am Begabungsstützpunkt Memmingen,
- des W-Seminars „Astrophysik“ und
- der Kurse „Q12 Astrophysik“ am Bernhard-Strigel-Gymnasium Memmingen.

Im Vordergrund steht eine für physikalisch interessierte Schülerinnen und Schüler verständliche und anschauliche Darstellung. Wo dies mit dem mathematischen und physikalischen Vorwissen aus dem Schulunterricht sinnvoll erscheint, werden zu den behandelten Phänomenen auch Berechnungen durchgeführt.

Alle im Lehrplan der bayerischen Gymnasien für den Kurs „Q12 Astrophysik“ vorgesehenen Themen und Methoden sind in diesem Skript enthalten. In Hinblick auf die im Kurs „Astrophysik“ anstehenden Prüfungen und das Abitur finden sich insbesondere in Teil 1 des Skripts mit den Kapiteln I „Orientierung am Nachthimmel“, II „Licht, Spektroskopie und Teleskope“, III „Das Sonnensystem“, IV „Die Sonne“ und V „Sterne“ viele Beispielrechnungen und aktuelle – auch technische – Anwendungsbezüge. Die Kapitel VI und VII, in denen Themen aus dem Bereich der Kosmologie behandelt werden, gewähren Einblicke, die zum Teil deutlich über den im Lehrplan vorgesehenen Unterrichtsstoff hinausgehen. Insbesondere hier soll ein Überblick über grundlegende und aktuelle Forschungsergebnisse zu Aufbau und Entwicklung unseres Universums gegeben werden. Mit Blick auf das W-Seminar „Astrophysik“ schlage ich im Skript zu jedem Kapitel Themen für Seminararbeiten und Referate vor.

In den letzten Jahrzehnten führte vor allem die Entwicklung immer leistungsfähigerer Messmethoden und Teleskope zu revolutionären Entdeckungen. Dabei kommen neben erdgebundenen Teleskopen Satelliten und Raumsonden zum Einsatz, mit denen insbesondere Strahlung untersucht werden kann, die von der Erdatmosphäre absorbiert wird. Am 15. Juni 2016 gab das LIGO-Observatorium den lange erwarteten Nachweis von Gravitationswellen bekannt. Für den Nachweis der Neutrinomasse ging 2015 der Nobelpreis an Takaaki Kajita und Arthur McDonald. Die Sonde „New Horizons“ lieferte am 14. Juli 2015 atemberaubende Bilder von Pluto, der bis 2006 die Rolle des neunten Planeten im Sonnensystem spielen durfte und so weit entfernt ist, dass bisher nur verschwommene Lichtflecke als Aufnahmen von Pluto und seinem größten Mond Charon existierten. Im Rahmen der Rosetta-Mission gelang es 2014 erstmals, eine Landesonde auf einem Kometenkern abzusetzen.

Die kosmologische Forschung der letzten Jahre zeigte, dass die sichtbare Materie nur einen kleinen Bruchteil zu der im Universum verteilten Masse beiträgt. Der größte Teil der Masse des Universums wird der sogenannten Dunklen Materie zugeschrieben. Sie ist zum Verständnis der Strukturbildung im Universum unerlässlich. Ihre Existenz lässt sich aufgrund ihrer Gravitationswirkung nachweisen. Man weiß aber noch nicht, woraus Dunkle Materie besteht. Die Dunkle Materie wird uns durch das gesamte Thema „Kosmologie“ begleiten.
Unsere heutige Vorstellung von Entstehung und Entwicklung des Universums basiert auf mehreren Hypothesen wie der Entstehung des Universums mit dem Urknall, der Dunklen Energie als Ursache für die beschleunigte Expansion des Universums und dem Zustand des Universums in Entfernungen, die größer sind als der Weg, den das Licht seit der Entstehung des Universums zurückgelegt hat. Auch zur Frage, was vor der Entstehung des Universums gewesen sein könnte, und ob es neben unserem Universum vielleicht noch weitere, für uns nicht sichtbare Universen gibt, haben wir keine Antworten sondern lediglich Spekulationen.
Dennoch gibt es eine ganze Reihe von Beobachtungen, die die Hypothesen der Kosmologie stützen. Dazu gehören die kosmologische Rotverschiebung, die kosmische Hintergrundstrahlung oder die Beobachtung von Objekten am Rand des sichtbaren Universums.

Die Spezielle und die Allgemeine Relativitätstheorie sowie Einstein und die Teilchenphysik bilden die wichtigsten theoretischen Grundlagen der Kosmologie. Die enge Verbindung der Kosmologie mit der Teilchenphysik ist insbesondere deshalb faszinierend, weil die Kosmologie sich mit den größten vorstellbaren Strukturen beschäftigt, während die Teilchenphysik die kleinsten möglichen Strukturen erforscht. Kollisionsexperimente, wie sie am CERN, dem Europäischen Forschungszentrum für Teilchenphysik in Genf, durchgeführt werden, gewähren uns für ganz kurze Zeiten und in winzigen Raumbereichen Blicke auf die Teilchen, die weniger als eine Milliardstel Sekunde nach der Entstehung des Universums existierten und ermöglichen es uns, zu untersuchen, welche Kräfte zwischen den Teilchen damals wirkten. Die (fast) alles bestimmende Kraft in der Kosmologie ist die Gravitationskraft. Der Allgemeinen Relativitätstheorie zufolge beeinflusst die Gravitation als Krümmung der Raumzeit die Bewegung der Himmelskörper und die Ausbreitung des Lichts.

Zwei in sich abgeschlossene und dennoch mit den anderen Themen vernetzte Kapitel zu Relativitätstheorie und Elementarteilchenphysik in Teil 2 des Skripts sollen Hintergrundwissen vermitteln über physikalische Grundlagen und Vorgehensweisen, die in der Kosmologie zur Anwendung kommen. An vielen Stellen im Text finden sich Querverweise auf das zum Verständnis angesprochener Phänomene nötige Hintergrundwissen.

Das Skript enthält viele Rechenbeispiele, in denen vorgeführt wird, mit welchen Methoden man an bestimmte Fragestellungen herangeht und wie man rechnerisch Lösungen findet. Physik anzuwenden und selbständig Berechnungen durchzuführen, lernt man allerdings nicht durch reines Nachlesen. Man muss sich selbst mit den Problemstellungen auseinandersetzen und selbst rechnen. Aus diesem Grund gibt es zu jedem Kapitel eine Aufgabensammlung mit Musterlösungen. Für alle, die noch mehr wissen wollen oder zusätzliche Informationen beispielsweise zum Schreiben einer Seminararbeit oder zum Vorbereiten eines Referats benötigen, sind die Literaturhinweise am Ende eines jeden Kapitels gedacht. Alle angegebenen Quellen können von mir ausgeliehen werden. Die Aufgabensammlungen wurden unter Einbeziehung aktueller Abituraufgaben stark erweitert und die Literatursammlungen um Veröffentlichungen aus dem letzten Schuljahr ergänzt.
Das Skript enthält ausführliche Informationen zu Exkursionszielen wie dem COMPASS-Experiment oder der „Antimaterie-Fabrik“ am CERN, dem Observatorium der Ludwig-Maximilians-Universität auf dem Wendelstein, dem Deutschen Museum und dem Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik in München und der Allgäuer Volkssternwarte in Ottobeuren.

Im Vergleich zum Skript aus dem Schuljahr 2016/2017 wurden alle Themen grundlegend überarbeitet und aktualisiert. Eure Fragen im Unterricht und Diskussionen mit Einzelnen von euch zeigten mir in der Vergangenheit, welche Fragen euch besonders interessierten. Ich habe eure Anregungen gesammelt. Sie haben Eingang in das vorliegende Skript gefunden. Als Beispiele seien genannt: Extrasolare Planetensysteme, Gravitationswellen, Neutrinophysik, Antimaterieforschung am CERN und neue Erkenntnisse aus der Forschung zu Dunkler Materie und Dunkler Energie.

Je nach Interesse und Geschmack kann man dieses „Buch“ entweder am Stück lesen oder sich anhand des Inhaltsverzeichnisses bestimmte Teilgebiete aussuchen. Oder auch zuerst das Eine und dann das Andere. Im Unterricht werden wir aus Zeitgründen nicht alle im Skript angesprochenen Themen behandeln können. Der Unterricht soll als Anregung dienen, sich mithilfe des Skripts intensiver in die Themenbereiche der Astrophysik und Kosmologie einzuarbeiten. Das Skript bietet eine Fülle von Anregungen für Fragen.

Mein besonderer Dank geht an **Herrn Prof. Dr. Reinhold Rückl (Würzburg)** der Teile des Skripts durcharbeitete und viel Zeit in Besprechungen investierte, bei denen er mir wertvolle fachliche Hinweise gab. Ebenso möchte ich **Herrn Prof. Dr. Martin Faessler (München, Genf)** danken. Er gab nicht nur sehr hilfreiche Hinweise zum Skript, sondern machte unsere Exkursionen ans CERN durch seine Führungen am COMPASS-Experiment zu eindrucksvollen und nachhaltigen Erlebnissen.

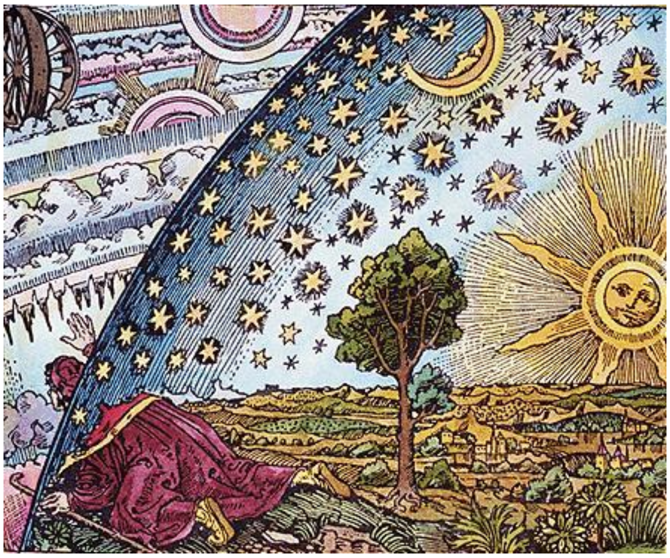
Ich wünsche euch viel Freude bei der Beschäftigung mit der Physik des Größten und der Physik des Kleinsten, mit Kosmologie und Teilchenphysik und mit der Frage, was das Universum auseinandertreibt und die Welt zusammenhält,

Andreas Kellerer

Inhalt - Teil1: Astrophysik:

I. Orientierung am Nachthimmel

1) Geschichte des Astronomischen Weltbildes



Die Grundlagen für die Entwicklung des modernen astronomischen Weltbildes wurden in den **frühen Hochkulturen (Ägypter, Majas, Babylonier)** vor etwa 5000 Jahren gelegt. Die Menschen verehrten die Gestirne an der Himmelskugel als Gottheiten. Sich selbst und die Erde betrachteten sie als von den Göttern geschaffen. So hatten die alten Kulturvölker mythologische Weltvorstellungen, in denen Gottheiten das Geschick der Welt und der Menschen lenkten. Der Zweck der Sternbeobachtungen beschränkte sich darauf, den Götterwillen vorherzusagen und so Hochwasser und andere Naturkatastrophen vorausberechnen zu können.

Im 4. Jahrhundert vor Christi Geburt prägten die Naturphilosophen der **griechisch-römischen Antike** das astronomische Weltbild nachhaltig. Vor dem Hintergrund der mit bloßem Auge beobachtbaren Phänomene am Sternhimmel wurden mathematische Regeln zur Beschreibung der Bewegung von Sternen und Planeten entwickelt, die über mehr als tausend Jahre hinweg bis ins Mittelalter das astronomische Denken bestimmten.

Einen Einschnitt in der Entwicklung des astronomischen Weltbildes bildete die sogenannte **„Kopernikanische Revolution“ im 16. Jahrhundert**: Die Erde verlor ihre zentrale Rolle als Mittelpunkt des Universums. Die Loslösung von strengen, aus der antiken Naturphilosophie übernommenen mathematischen Grundregeln für den Kosmos und die **Erfindung des Teleskops** ebneten in der Folgezeit den Weg für eine korrekte Beschreibung unseres Sonnensystems.

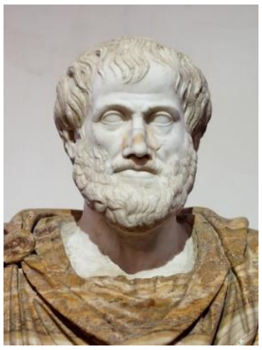
Als zweite Revolution in der Entwicklung des astronomischen Weltbildes kann die Formulierung der Speziellen und vor allem der Allgemeinen **Relativitätstheorie** durch Albert Einstein am Beginn des 20. Jahrhunderts betrachtet werden. Insbesondere wurde jetzt klar, dass auch die Sonne nicht das Zentrum des Weltalls bildet, sondern einer von Milliarden von Sternen in einer Galaxie, der Milchstraße, ist.

Die letzten 100 Jahre brachten eine rasante Entwicklung des astronomischen Weltbildes mit sich. Neben der **Weiterentwicklung der Teleskoptechnik** brachte die Erfindung der **Raumfahrt** große Fortschritte. Satellitenteleskope ermöglichen die Beobachtung des Universums in Wellenlängenbereichen, die dem menschlichen Auge nicht zugänglich sind.

Entscheidend für das moderne astronomische Weltbild ist, dass nicht mehr die Bewegung einzelner Sterne im Vordergrund steht, sondern die Bewegung von Galaxien. Das Weltall wird weit über unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße, hinaus erforscht. Die Astronomie wird zur **Kosmologie**. Neben einem immer umfangreicheren Wissen über den Aufbau des Universums wird die Frage nach der Entstehung und der zukünftigen Entwicklung des Universums wichtig.

- In den folgenden Abschnitten werden wir uns mit der Entwicklung des astronomischen Weltbildes von der Antike bis zur Beschreibung des Sonnensystems durch die Newtonsche Gravitationstheorie befassen. Auf das moderne kosmologische Weltbild gehen wir in Kapitel VII „Der Aufbau des Universums“ und in Kapitel VIII „Ursprung und Entwicklung des Universums“ ein.

Das astronomische Weltbild der Antike:



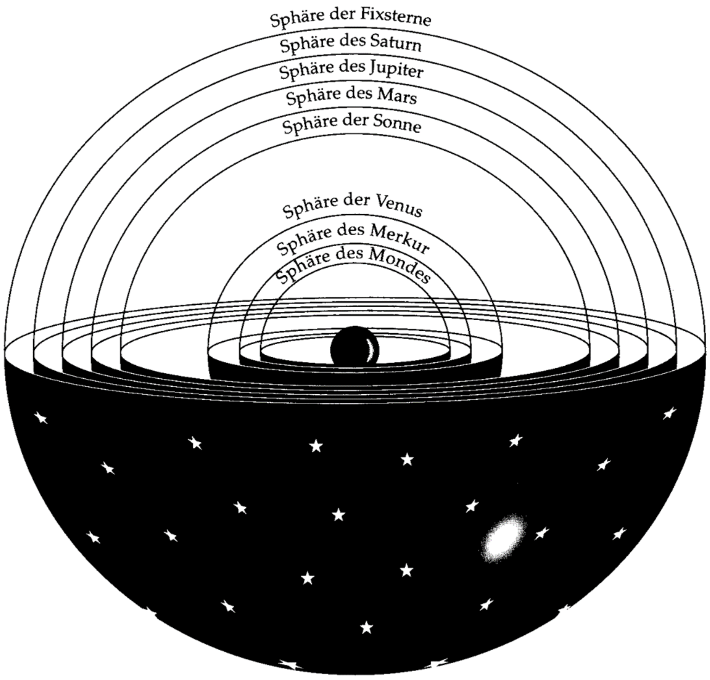
Das erste Volk, das den Versuch einer mathematischen Beschreibung der Himmelserscheinungen unternahm, waren die **Griechen**. Das altgriechische Wort **„Kosmos“** hat zwei Bedeutungen: „Schmuck“ und „Ordnung“. Aus dem ästhetischen Empfinden beim Anblick der Sternbilder erwuchs die Astronomie als die Lehre von der Ordnung des gestirnten Himmels, die durch mathematische Gesetzmäßigkeiten beschreibbar ist.
Die wichtigsten Grundlagen für das antike astronomische Weltbild lieferte der griechische Naturphilosoph **Aristoteles (384 bis 322 v. Chr., Chalkidiki)**.

Die Grundaussagen des Aristoteles:

- Es besteht ein grundsätzlicher Unterschied zwischen **irdischer und himmlischer Materie**.
- Die Erde bildet die Mitte des Weltsystems. Sie wird von Kugelschalen (Sphären) umgeben, auf denen sich der Mond, die Sonne, die Planeten und auf der äußersten Sphäre die Fixsterne befinden.
- Die Himmelskörper bewegen sich mit konstanter Geschwindigkeit auf Kreisbahnen um die Erde.

Das **Kreisbahndogma** (göttliche, vollkommene geometrische Figur) wurde bis 1609 n. Chr. (Johannes Kepler) nicht ernsthaft angezweifelt.

Die Grundthesen des Aristoteles entsprechen der **Anschauung**:
Die Sterne, Planeten, der Mond und die Sonne bewegen sich auf der **Himmelskugel** um die Erde, auf der der Beobachter steht. Die Anschauung führte in der Regel auch zur Vorstellung von einer scheibenförmigen Erde. Aristoteles war jedoch bereits von der Kugelgestalt der Erde überzeugt.



Er formuliert auch **Begründungen für die Kugelform der Erde**:

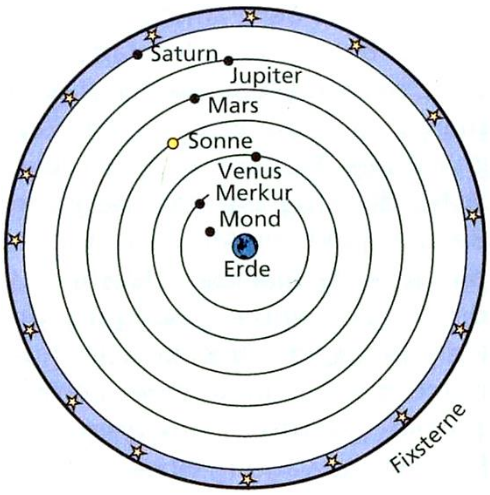
- Der bei einer **Mondfinsternis** auf den Mond projizierte **Erdschatten** ist stets kreisförmig.
- Beim Erscheinen eines **Schiffes** am Horizont sieht man zuerst die Segel und erst dann den Rumpf.

Das geozentrische Weltbild des Ptolemäus (90 bis 160 n. Chr., Oberägypten, Alexandria):

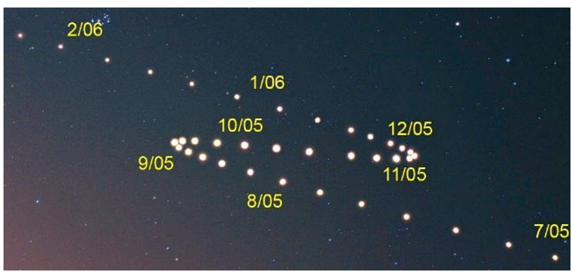
Als **Grundthesen seines geozentrischen Weltbildes** übernimmt Claudius Ptolemäus die Aussagen des Aristoteles:

1) **Die Erde (griech. Geos) steht im Mittelpunkt des Weltalls.**
2) **Die Erde ist kugelförmig und bewegt sich nicht.**
3) **Das kugelförmige Himmelsgewölbe mit den daran befestigten Sternen dreht sich einmal täglich von Ost nach West um die Erde.**
4) **Planeten, Sonne und Mond bewegen sich ebenfalls auf inneren Kugelschalen um die Erde.**

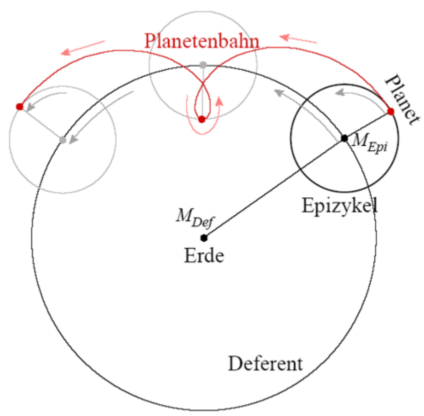
Wenn man den Planetenlauf über einen längeren Zeitraum beobachtet, stellt man fest, dass die Planeten sich zeitweise auf **rückläufigen Bahnen (Schleifenbahnen)** bewegen.



Schleifenbahnen lassen sich aber nicht erklären, wenn man für die Planeten lediglich Kreisbahnen um die Erde annimmt. Die Graphik unten zeigt die Positionen des Mars am Nachthimmel im Zeitraum von Juli 2005 bis Februar 2006.



Ptolemäus löste das Problem mit den rückläufigen Planetenbahnen durch die **Epizykeltheorie**:
Während seines Erdumlaufs auf einer Kreisbahn bewegt sich der Planet auf einer kleineren Kreisbahn (**Epizykel**), deren Mittelpunkt auf der Erdumlaufbahn (**Deferent**) wandert. Die Epizykeltheorie lässt rückläufige Planetenbewegungen zu.
Das Prinzip ist in der Abbildung rechts für einen Planeten dargestellt.



Das aristotelische Kreisbahndogma (Kreisbahnen, konstante Geschwindigkeit) wird durch die Epizykeltheorie nicht verletzt. Mit den Epizykeln ergeben sich für die Planeten allerdings kreisförmige Bahnen, deren Mittelpunkte nicht mehr mit dem Erdmittelpunkt zusammenfallen.
Mit der Einführung von Epizykeln war das Modell des Weltalls mathematisch relativ kompliziert geworden. Die Planetenbewegungen ließen sich aber, obwohl, wie wir heute wissen, das geozentrische Weltbild nicht den Tatsachen entspricht, verblüffend genau vorhersagen.

Ptolemäus fasste sein geozentrisches Weltbild in seinem Hauptwerk „**Syntaxis mathematike**“ zusammen, das als **erstes großes Handbuch der Astronomie** gilt und 1500 Jahre lang die unangefochtene Grundlage für die Astronomie als Wissenschaft bildete. Das Werk ist leider nicht im Original erhalten. Die älteste bekannte Ausgabe ist die mittelalterliche arabische Übersetzung, der „**Almagest**“ („Das Größte“).

Astronomie im Mittelalter:

Das Mittelalter vor Beginn des Hochmittelalters, also die **Zeit von 600 bis 1200**, brachte in Europa eine **Stagnation, ja sogar einen Niedergang der Wissenschaft**. Die antiken griechischen Schriften wurden kaum noch gelesen. Sogar die Erkenntnis von der Eigenrotation der Erde geriet in Vergessenheit. Die Wissenschaften konnten sich nur unter der Oberhoheit der Kirche entwickeln. Ihre wichtigste Funktion bestand darin, die christliche Bibelinterpretation zu stützen.

Wissenschaftlich gearbeitet wurden in Europa im frühen Mittelalter hauptsächlich in Klöstern. Die katholische **Kirche** hielt am geozentrischen Weltbild des Ptolemäus fest, da dieses in guter Übereinstimmung mit der Bibel stand. Das wissenschaftliche Interesse an der Astronomie beschränkte sich weitgehend darauf, den Kalender, insbesondere zur Festlegung der kirchlichen Hochfeste in Ordnung zu halten.

Während die Entwicklung der Astronomie als Naturwissenschaft zum Stillstand gekommen war, gewannen Pseudowissenschaften wie die **Astrologie** an Bedeutung.

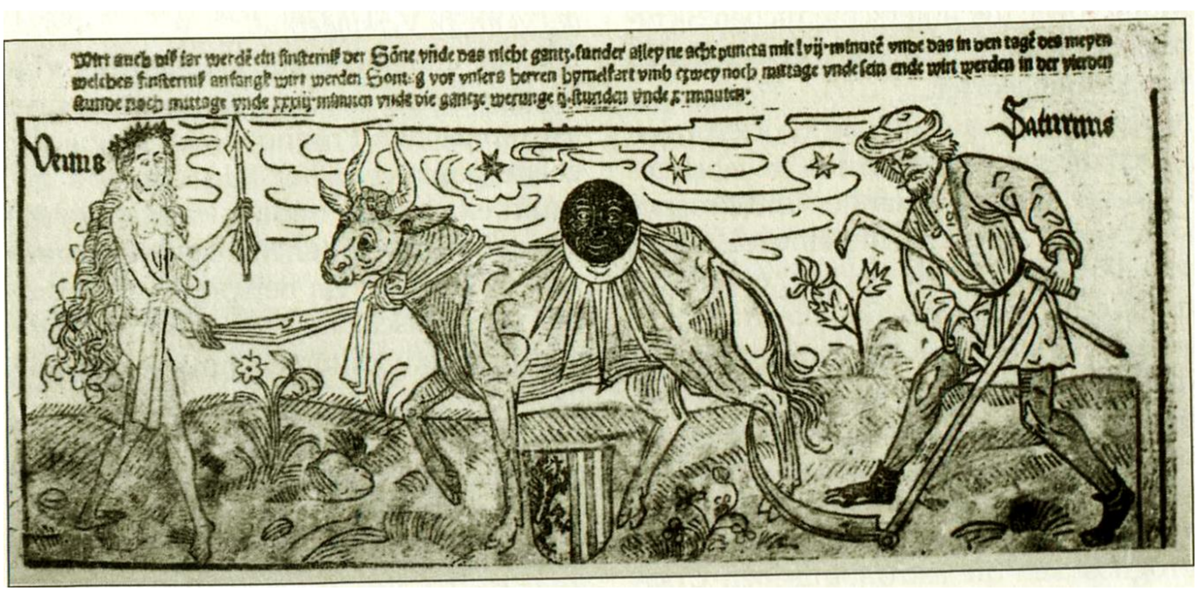
Kometen und Mond- bzw. Sonnenfinsternisse wurden im Mittelalter als Zeichen des Willens Gottes oder gar als Vorboten des jüngsten Tages gedeutet. Die Kirche machte sich die Astrologie zunutze, den sündigen Menschen zu Buße und Umkehr zu ermahnen, weil sonst Strafe bis hin zum Weltuntergang drohe. In der Bibel finden sich zahlreiche Stellen, die in der astrologischen Literatur immer wieder zitiert werden.

„Und es werden Zeichen geschehen an Sonne und Mond und Sternen; und auf Erden wird den Leuten bange sein, und sie werden zagen; und das Meer und die Wasserwogen werden brausen; und die Menschen werden verschmachten vor Furcht und vor Warten der Dinge, die kommen sollen auf Erden; denn auch der Himmel Kräfte werden sich bewegen.“ (Lk 21,15)

Eine noch deutlichere Beschreibung der Totalitätsphase einer Mondfinsternis findet man im Buch Joel 3,4: *„Die Sonne soll in Finsternis und der Mond in Blut verwandelt werden, ehe denn der große und schreckliche Tag des Herrn kommt.“*

Die Vorausberechnung von Finsternissen war eine wichtige Aufgabe der Astronomen im Mittelalter und darüber hinaus bis weit ins 17. Jahrhundert. Der große Naturwissenschaftler und Astronom **Johannes Kepler (1571 bis 1630)** galt auch als bedeutender Astrologe.

Nach der **Erfindung des Buchdrucks** im 15. Jahrhundert entstanden zahlreiche astrologische Schriften, sogenannte **Prognostiken**. Die Abbildung unten illustriert eine Sonnenfinsternis im Tierkreiszeichen Stier mit den astrologischen Jahresherrschern Venus und Saturn.



Arabische Astronomie im Mittelalter:

Weil der Koran kein derartig abgeschlossenes und fest gefügtes Weltbild wie die Bibel besitzt, herrschte zumindest in der Frühzeit der Ausbreitung des Islam eine größere Freiheit des Forschens und Denkens. Das Streben nach Wissen war im Islam Pflicht für die Gläubigen. Insgesamt sind 534 Namen von islamischen Astronomen überliefert. Islamische Gelehrte übersetzten die astronomischen Werke der griechischen Antike ins Arabische. Sie fügten den antiken Texten eigene Interpretationen und Beobachtungsergebnisse hinzu.

Unter anderem entstand um 900 auch der „**Almagest**", die Übersetzung der „Syntaxis mathematike" des Ptolemäus.

Neben der Übersetzung antiker Texte sind **wichtige Leistungen der arabischen Astronomen** im Mittelalter

- die **geographische Längenbestimmung** durch Messung der Kulminationshöhe des Mondes,
- die Weiterentwicklung **astronomischer Messgeräte**,
- die Erstellung von **Sternkatalogen** mit genauen **Helligkeitsangaben**. Die **Namen zahlreicher bekannter Sterne** stammen aus dem Arabischen. Z.B.: Rigel, Beteigeuze, Aldebaran, Atair, Deneb.

Hochmittelalter – Übergang zur Renaissance-Zeit:

Im Laufe der Jahrhunderte ergaben sich Probleme bei der praktischen Anwendung der Regeln des Ptolemäischen Weltbildes, da diese nicht mehr genau genug mit der Beobachtung übereinstimmten. Anstelle die Gültigkeit des ptolemäischen Weltbildes grundsätzlich zu hinterfragen, perfektionierte man das bestehende mathematische Modell eines geozentrischen Weltbildes. Dies hatte zur Folge, dass das Weltbild geozentrisch blieb, aber noch unhandlicher und komplizierter wurde.

König Alfons X. von Kastilien (1226 – 1284) soll zum ptolemäischen Weltbild in der nun vorliegenden Form gesagt haben: „*Wenn unser Herrgott mich bei der Erschaffung der Welt zu Rate gezogen hätte, so hätte ich ihm etwas Einfacheres empfohlen*."

Bereits im **l4.Jahrhundert** lassen sich in großen Teilen Europas Elemente des **Frühkapitalismus** erkennen. Die Naturalwirtschaft ging zurück, die Geldwirtschaft gewann allmählich die Oberhand im Zuge einer aufblühenden handwerklichen Produktion. Gelehrte, Schriftsteller, ja sogar Dichter und Philosophen gewannen zunehmend an Einfluss. Sie rückten ein neues Bild vom Menschen in den Vordergrund, das dem Diesseits stärker verpflichtet war. Der starke Einfluss der Kirche auf die Naturwissenschaften ging nach und nach verloren. Mit diesen neuen Denkansätzen war eine **Rückbesinnung auf die Errungenschaften der Antike in Philosophie und Naturwissenschaften** verbunden. Dazu war es notwendig, die klassischen griechischen Schriften in ihrer originalen Form wieder zu erschließen. Dieser geistige Aufschwung wurde eminent gefördert durch die **Erfindung des Buchdrucks durch Johannes Guttenberg um 1435**, wodurch eine zuvor in diesem Umfang undenkbare Verbreitung von Wissen erfolgen konnte.

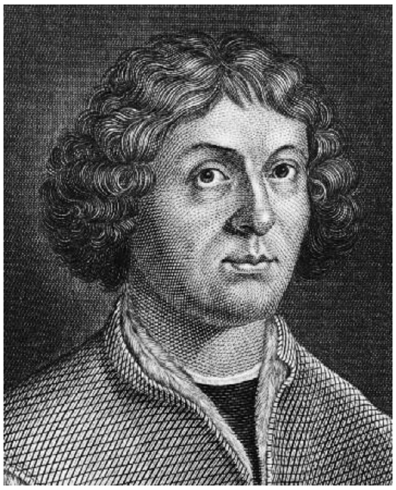
Die vor allem in den Städten mit wachsender Produktivität hergestellten Waren wurden zu Handelsobjekten, wobei die Seerouten im Interesse schneller Transporte großer Warenmengen rasch an Bedeutung gewannen. Für die **Orientierung der Handelsschiffe** auf den Weltmeeren bedurfte es der **Himmelsnavigation**. Dazu wiederum waren **astronomische Beobachtungen** erforderlich. Die astronomische Beobachtungskunst jedoch war seit den Tagen der Antike kaum gehandhabt, geschweige denn weiterentwickelt worden. So führte die **Renaissance** in der Astronomie eine **Verknüpfung des Studiums antiker Schriften mit einer Neubelebung astronomischer Beobachtungen** herbei.

Die Kopernikanische Wende:

Das Mittelalter wurde am **Beginn des 16. Jahrhunderts** abgelöst durch die **Renaissance-Zeit**. Diese Epoche war geprägt durch den **Humanismus mit dem genauen Studium antiker Schriften** und **revolutionären Tendenzen in der bürgerlichen Gesellschaft**. In diese Zeit fällt auch die **Reformation (1517)**. Martin Luther wollte in der Religion den Bezug alleine auf die Person des dreieinigen Gottes durchsetzen und griff dabei auf das Urchristentum zurück.

In diese **Zeit des Aufbruchs** fällt das Leben und Werk des **Nikolaus Kopernikus (1473 – 1543).**

In der für seine Zeit typischen Weise führte auch bei Kopernikus die intensive Auseinandersetzung mit antiken Schriften zur Kritik am bestehenden Weltsystem und veranlasste ihn, etwas ganz Neues zu entwerfen. Hauptkritikpunkt am ptolemäischen Weltbild war für Kopernikus, dass die mathematisch aufwändige Epizykeltheorie im Widerspruch zum Prinzip der Einfachheit der Natur stand, das seit Aristoteles als Grundprinzip wissenschaftlichen Denkens galt. Kopernikus ließ sich bei seinen Überlegungen sicherlich auch durch das Studium des antiken Naturphilosophen **Aristarch von Samos (310 bis 230 v. Chr.)** beeinflussen, der bereits zu seiner Zeit ein **heliozentrisches Weltbild**, bei dem Erde und Planeten um die Sonne kreisen, vorgeschlagen hatte.



Das heliozentrische Weltbild des Kopernikus:

Revolutionär am kopernikanischen Weltmodell war, dass er statt der Erde die **Sonne in den Mittelpunkt der Bewegung der Himmelskörper** stellte. Er arbeitete fast 30 Jahre lang an seinem heliozentrischen Weltmodell. Sein **1543**, unmittelbar nach seinem Tod veröffentlichtes Hauptwerk „**De revolutionibus orbium coelestium**“ (Von den Umdrehungen der himmlischen Sphären) wird vielfach als Beginn der modernen Astronomie angesehen.

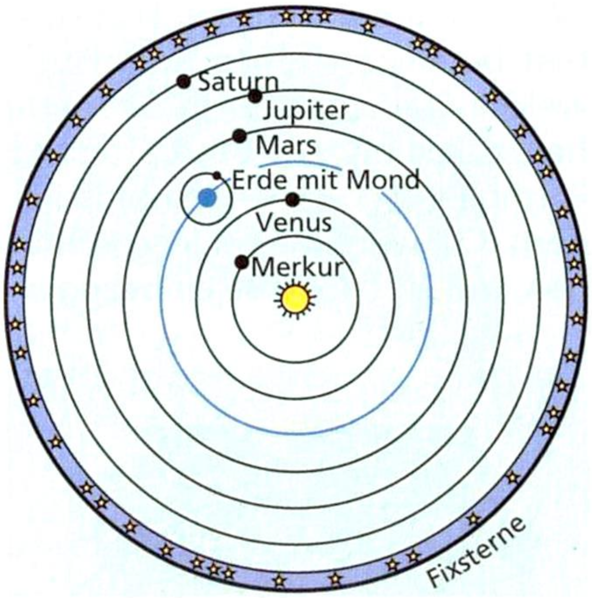
Grundthesen des heliozentrischen Weltbildes von Kopernikus:

1) **Die Sonne (griech. Helios) steht im Mittelpunkt des Weltalls.**
2) **Die Erde ist ein Planet und läuft auf einer Kreisbahn in einem Jahr um die Sonne.**
3) **Die Erde dreht sich täglich einmal um die eigene Achse.**
4) **Die Planeten bewegen sich auf Kreisbahnen um die Sonne.**
5) **Nur der Mond läuft auf einer Kreisbahn um die Erde.**
6) **Die Sterne bewegen sich nicht.**
   Sie ruhen in unermesslich großer Entfernung im Raum.

Die entscheidende Schlussfolgerung lautet:

Die Bewegung von Sonne und Sternen ist nur <u>scheinbar</u> und eine <u>Folge der Erddrehung</u>.

Ein großer Vorzug des heliozentrischen Weltbildes ist, dass sich die **Schleifenbahnen der Planeten ohne Epizykeltheorie erklären lassen**: die Planeten werden von der mit den anderen Planeten um die Sonne kreisenden Erde aus in Projektion auf die Himmelskugel mit den Fixsternen gesehen. Bei den beobachteten Stillständen und rückläufigen Bewegungen der Planeten handelt es sich um Relativbewegungen zwischen der Erde und einem der äußeren Planeten, die aufgrund der unterschiedlichen Winkelgeschwindigkeiten der einzelnen Planeten und der Erde beobachtet werden. Die Erde überholt bei ihrem Umlauf um die Sonne einen der äußeren Planeten, deren Winkelgeschwindigkeit kleiner ist als die der Erde.



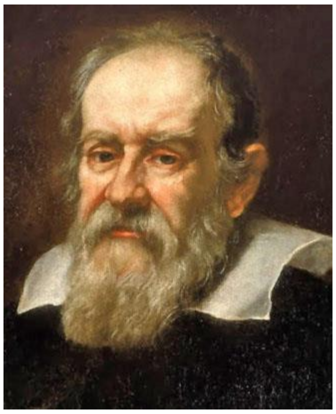
Die Akzeptanz des kopernikanischen Systems:

Die entscheidende Frage, die Kopernikus in Konflikt mit der Kirche bringen konnte, war, ob Kopernikus sein Weltbild als mathematisches Modell zur besseren Beschreibung der Himmelserscheinungen oder als physikalische Wirklichkeit auffasste. **Die Kirche akzeptierte das Kopernikanische Weltbild als rein mathematische Hypothese** mit der sich leichter rechnen ließ als mit dem ptolemäischen Modell. „De revolutionibus" war, als es 1543, im Sterbejahr des Kopernikus, erschien, dem Papst Paul III. gewidmet.

Im Vorwort steht *„Es ist nicht erforderlich, dass diese Hypothesen wahr, ja nicht einmal, dass sie wahrscheinlich sind, sondern es reicht schon allein hin, wenn sie eine mit der Beobachtung übereinstimmende Rechnung ergeben…".*

Erst später wurde bekannt, dass dieses Vorwort gar nicht von Kopernikus stammt, sondern von dem protestantischen Theologen *Andreas Osiander (1498 – 1552),* der den Druck des Werkes überwachte, eigenmächtig eingefügt wurde. Osiander verhinderte damit zwar einen Konflikt mit der Lehrmeinung der Kirche, sorgte aber auch dafür, dass das neue Weltbild in den nachfolgenden 60 Jahren kaum Beachtung fand.

Im Zusammenhang mit dem heliozentrischen Weltbild des Kopernikus wird meist auch der italienische Physiker und Astronom **Galileo Galilei (1564 – 1642)** genannt, der sich leidenschaftlich für das **heliozentrische Weltbild als das tatsächlich gültige Weltsystem** einsetzte und dafür bekanntlich von der Kirche in einem Inquisitionsprozess dazu gezwungen wurde, seiner Überzeugung abzuschwören.



Galileo Galilei war einer der ersten, die mit dem kurz zuvor in den Niederlanden erfundenen **Fernrohr** beobachteten. Er entdeckte dabei etliche bisher unbekannte Phänomene, die er als Bestätigungen für das heliozentrische Weltbild und als Argumente gegen das von der Kirche vertretene geozentrische Weltbild wertete:

- Der **Mond** besitzt eine **erdähnliche Oberfläche**.
- Galileo Galilei beobachtete **Sonnenflecken**, in denen er einen Widerspruch zu einer „göttlichen" Makellosigkeit der Sonne sah.
- Galilei entdeckte die vier größten **Jupitermonde** und schloss daraus, dass keineswegs die Erde der einzige Himmelskörper ist, der im Zentrum der Bahnen anderer Himmelskörper steht.
- Er führt die Beobachtung von **Venusphasen** auf die unterschiedliche Beleuchtung der Venus bei ihrem Umlauf um die Sonne zurück. Ein Phasenwechsel der Venus ist mit einem geozentrischen Weltbild nicht erklärbar, weil dazu die Sonne zwischen Venus und Erde stehen muss.

Man kann die Fernrohrbeobachtungen des Galilei als Bestätigungen für das heliozentrische Weltbild sehen, wenn man von der Richtigkeit des heliozentrischen Weltbildes überzeugt ist. Es handelt sich bei sämtlichen beobachteten Phänomenen aber **nicht um Beweise für das heliozentrische Weltbild**, da alle bis auf den Phasenwechsel der Venus auch erklärbar wären, wenn die Erde im Mittelpunkt der Planetenbahnen stünde. Auch für den Phasenwechsel der Venus ist das heliozentrische kopernikanische System nicht zwingend notwendig. Tycho von Brahe schlug 1588 ein Modell des Sonnensystems vor, bei dem die Venus um die Sonne, die Sonne aber gleichzeitig um die Erde kreist. In einem solchen Weltmodell wären wechselnde Venusphasen ebenfalls erklärbar.
Als rein mathematische Hypothese - sogar als eine der ptolemäischen überlegenen - schätzte der damalige Papst Urban VIII. (Papst von 1623 bis 1644) die Arbeit des Kopernikus. Die Kirche erkannte an, dass Astronomen mit dem heliozentrischen Weltbild gut rechnen können und es deshalb für die Kalenderreform und neue Planetentafeln geeignet sei. Papst Urban VIII. pflegte von Anfang an ein freundschaftliches Verhältnis zu Galileo Galilei. So konnte Galilei 17 Jahre lang in aller Öffentlichkeit - ohne Einschreiten Roms - die kopernikanische Lehre vertreten.

Galilei hielt das **kopernikanische Weltbild** aber für **mehr als eine mathematische Hypothese**, es ist für ihn **real existierend**. Folgerichtig nutzte Galilei zur physikalischen Forschung nicht Bibelstudien, sondern Beobachtung und Experiment. Er ging von der Gültigkeit des heliozentrischen Weltbildes aus und versuchte, die Theorie durch Beobachtungsergebnisse zu bestätigen.

Galileis Konflikt mit der katholischen Kirche, der schließlich 1632 zum Inquisitionsprozess und seiner Verurteilung führte, wird immer wieder als Auseinandersetzung zwischen empirischer Wissenschaft und blindem Dogmatismus der Kirche geschildert. Der Stein, an dem sich die Theologen stießen, war jedoch nicht das kopernikanische System als solches. Vielmehr entzündete sich der Streit an der Methode, wie wahre Erkenntnis über die Welt zu erlangen sei und vor allem an der Frage, ob auf dem Weg zur Wahrheit die Naturwissenschaften in irgendeiner Weise mit der Unfehlbarkeit der Heiligen Schrift in Konflikt geraten könne. Die Kirchenführung hielt Galileis Methode im Wesentlichen - und aus heutiger Sicht wissenschaftlicher Argumentationsregeln nicht zu Unrecht - für induktiv und daher nicht gegen Irrtümer gefeit. Eine derartige Argumentation konnte von der Kirche nicht für stichhaltig befunden werden; insbesondere, wenn sie eine Neuinterpretation der Bibel zur Folge hat und ihre Unfehlbarkeit in Frage stellt.

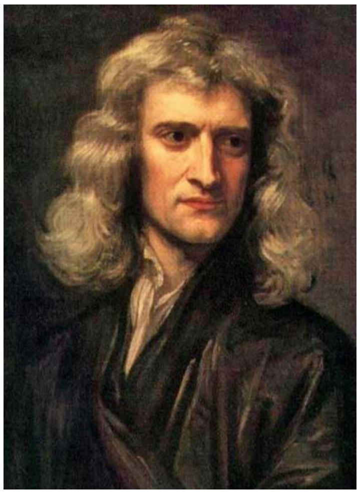
Die Weiterentwicklung des kopernikanischen Weltbildes durch Johannes Kepler und Isaac Newton:

Weil Kopernikus an den von Aristoteles geforderten Kreisbahnen festhielt, ergaben sich Abweichungen zwischen Theorie und Beobachtung. Diese waren auch Kopernikus bekannt. Er sah aber keine andere Möglichkeit, das Problem in Griff zu bekommen, als die Einführung von Epizykeln. Dies befriedigte Kopernikus selbst am wenigsten, da sein Weltsystem jetzt noch komplizierter wurde als das ptolemäische geozentrische System.

Eine entscheidende Verbesserung und zugleich Vereinfachung (keine Epizykeln!) des kopernikanischen Weltbildes erreichte **Johannes Kepler (1571 – 1630)**, als er **1609** aus den Marsdaten des Tycho von Brahe **für die Planeten elliptische Bahnen** errechnete.

Johannes Kepler war Hofastronom des Königs Rudolph II. in Prag. Er bekannte sich vorbehaltslos zum kopernikanischen Weltbild. Und stellte fest, dass es sich beim heliozentrischen Weltbild nicht nur um eine mathematische Hypothese, sondern um die Realität handle. Dies konnte er tun, ohne Sanktionen von Seiten der Kirche befürchten zu müssen, denn Kepler war evangelisch. Der herausragende, für Kopernikus noch undenkbare Schritt des Johannes Kepler war der Bruch mit dem seit Aristoteles unangefochten Kreisbahndogma.

Johannes Kepler stellte zur Beschreibung der Planetenbahnen die berühmten drei Keplerschen Gesetze auf (vgl. Kap. III, S. 79ff).



Gegen die Kritik, bei einer Eigenrotation der Erde müsse aufgrund der Fliehkraft die Erde auseinandergerissen werden, konnte Kopernikus kein stichhaltiges physikalisches Argument vorbringen. Erst der englische Physiker und Astronom **Sir Isaac Newton (1643 – 1727)** lieferte mit der **Gravitationskraft**, also der gegenseitigen Massenanziehung, die Kraft, die nicht nur die Erde zusammenhält, sondern auch die Voraussetzung für jede Kreis- bzw. Ellipsenbahn im Weltall darstellt. Während Kepler beschrieb, <u>wie</u> sich die Planeten bewegen, fand Newton heraus, <u>warum</u> die Planeten sich bewegen.

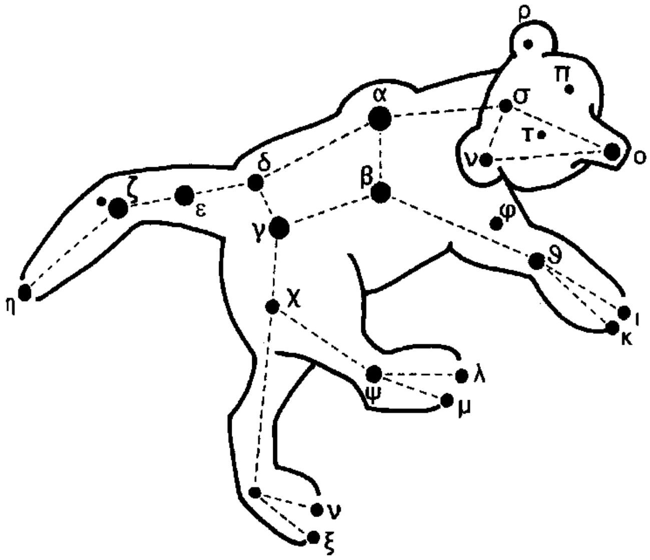
Damit war die aus der Aristotelischen Tradition stammende prinzipielle Unterscheidung von himmlischer und irdischer Physik aufgehoben. Die Erkenntnisse Newtons bildeten eine **einheitliche, Himmel und Erde verbindende Physik**. Zugleich ist das Newtonsche Gravitationsgesetz die physikalische Begründung für die Richtigkeit der Kopernikanischen Hypothese.

2) Astronomische Koordinatensysteme

Sternbilder:

Für den Beobachter des Nachthimmels scheinbar zusammengehörige Sterne werden zu insgesamt 89 **Sternbildern** zusammengefasst.

Die Sterne eines Sternbildes sind nach ihrer relativen Helligkeit mit griechischen Kleinbuchstaben durchnummeriert. α-Centauri ist also der Name des (für den irdischen Beobachter) hellsten Sterns im Sternbild Kentaur. α-Centauri ist der nächste Fixstern, kann aber von Memmingen aus nie beobachtet werden. Die hellsten Sterne der Sternbilder haben häufig zusätzlich zur Kombination aus Helligkeitsrang und Sternbild noch eigene Namen.

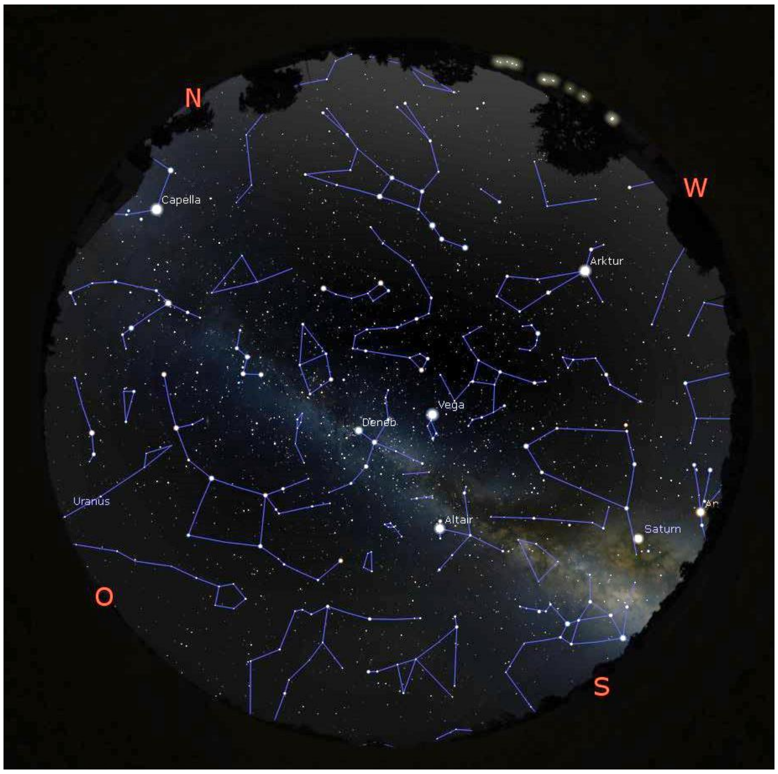


Beispiel:
Sirius: α-CMa $=$ α-Canis Maioris $=$ hellster Stern des Sternbildes Großer Hund.

In der Abbildung oben sind die Sterne des Sternbildes Großer Bär (Ursa maior) dargestellt, zu dem auch der Große Wagen gehört.

In einer klaren Nacht Sternbilder zu beobachten, ist für Menschen, die sich für Astronomie begeistern können, eine wunderbare Erfahrung. Einen Überblick über die Sternbilder kann man sich aber jederzeit auch mithilfe eines **Computerplanetariums** verschaffen. Im Unterricht arbeiten wir mit dem Programm „Stellarium“, das man unter http://www.stellarium.org/de/ im Internet findet und kostenlos herunterladen kann.

Das Beispielbild aus Stellarium zeigt den von Memmingen aus sichtbaren Nachthimmel am 16. August 2017 gegen 23.00 Uhr.



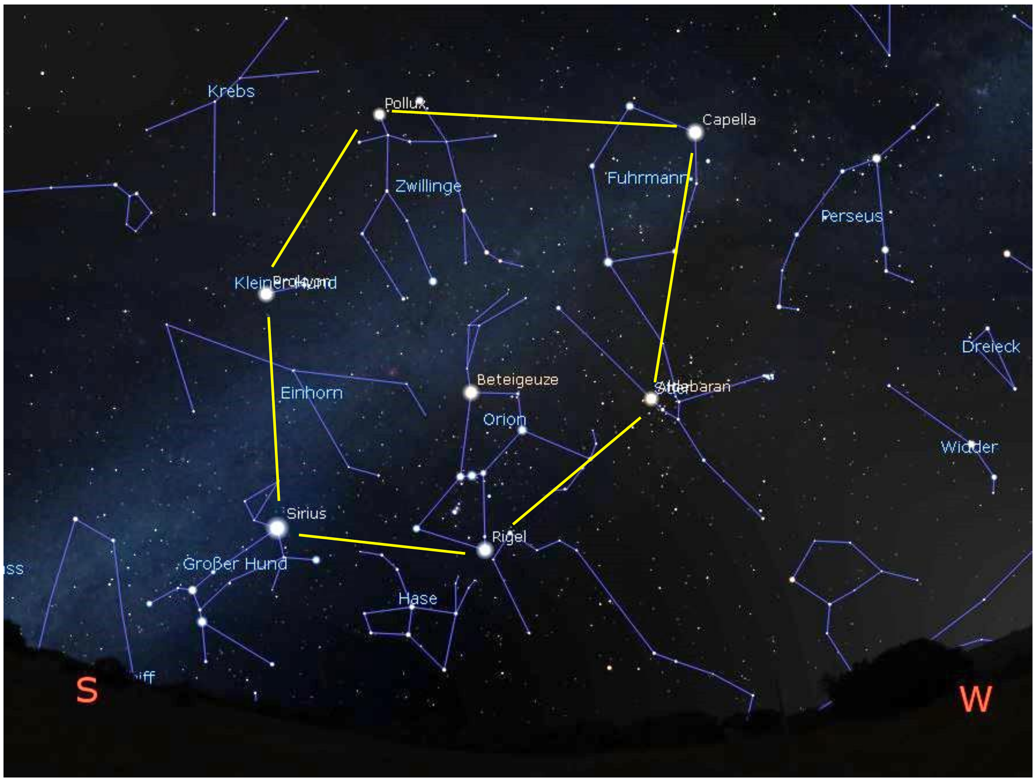
Übersicht über die wichtigsten, von Memmingen aus sichtbaren Sternbilder mit ihren hellsten Sternen:

Großer Bär (Ursa maior)
Kleiner Bär (Ursa minor) (enthält den Polarstern!)
Cassiopaia („Himmels-W“)
Bootes („Ochsentreiber”) → **Arctur** (α-Boo)
Nördliche Krone (Corona Borealis)
Perseus
Kepheus (Cepheus)
Herkules
Pegasus
Andromeda
Löwe (Leo) → **Regulus** (α -Leo)
Jungfrau (Virgo) → **Spica** (α -Vir)
Skorpion (Scorpius) → **Antares** (α -Sco)

Das **Wintersechseck** bilden die sechs hellen Sterne Capella, Pollux, Procyon, Sirius, Rigel, Aldeberan.

Sie gehören zu folgenden Sternbildern:

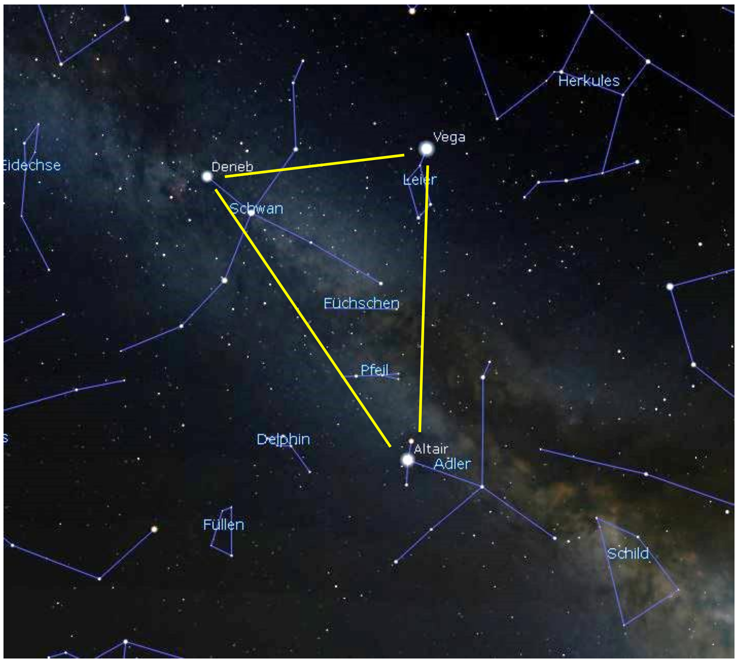
Fuhrmann (Auriga) → **Capella** (α-Aur)
Stier (Taurus) → **Aldeberan** (α-Tau)
Orion → **Rigel** (β-Ori), **Beteigeuze** (α-Ori), **Bellatrix** (γ-Ori)
(Ausnahme: Rigel ist heller als Beteigeuze!)
Zwillinge (Gemini) → **Pollux** (β-Gem), **Castor** (α-Gem)
(auch hier ist der β-Stern Pollux der hellere!)
Großer Hund (Canis maior) → **Sirius** (α -CMa)
Kleiner Hund (Canis minor) → **Procyon** (α -CMi)



Das **Sommerdreieck** bilden die Sterne Deneb, Wega, Atair.

Sie gehören zu folgenden Sternbildern:

Schwan (Cygnus) → **Deneb** (α-Cyg)
Leier (Lyra) → **Wega** (α -Lyr)
Adler (Aquila) → **Atair** (α -Aqu)



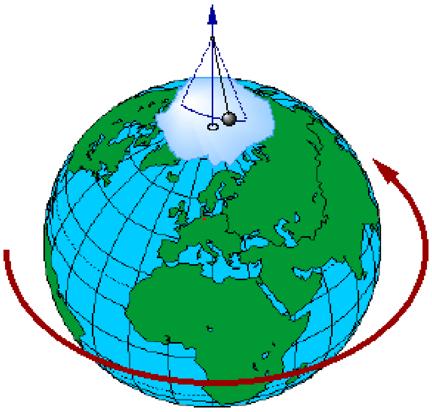
Scheinbare Bewegung der Fixsterne und Eigenrotation der Erde:

Der Beobachter kann mit bloßem Auge Planeten von hellen Sternen nicht unterscheiden. Beim längeren Beobachten des Nachthimmels fällt aber auf, dass die Sterne der Sternbilder ihre gegenseitige Lage nicht ändern, während einige wenige helle Lichtpunkte relativ zu den Sternbildern wandern. Aus diesem Grund unterschied man bereits in der Antike zwischen **„Fixsternen“** („feste Sterne“) und „Wandelsternen“. Heute wissen wir, dass die **„Wandelsterne“** die Planeten – also keine Sterne- sind. „Fixsterne“ wird heute gleichbedeutend für „Sterne“ verwendet.

Für einen Beobachter auf der Erde bewegen sich die Sterne scheinbar auf Kreisbahnen um den Polarstern. Tatsächlich verändern die Fixsterne ihre Position im Weltall nur unwesentlich und die scheinbare Kreisbewegung der Sterne ist auf die Erddrehung zurückzuführen.

1851 lieferte **Leon Foucault** mit seinem berühmten Pendelversuch im Pariser Pantheon, dem **„Foucaultschen Pendel“,** einen überzeugenden Beweis für die Erddrehung:

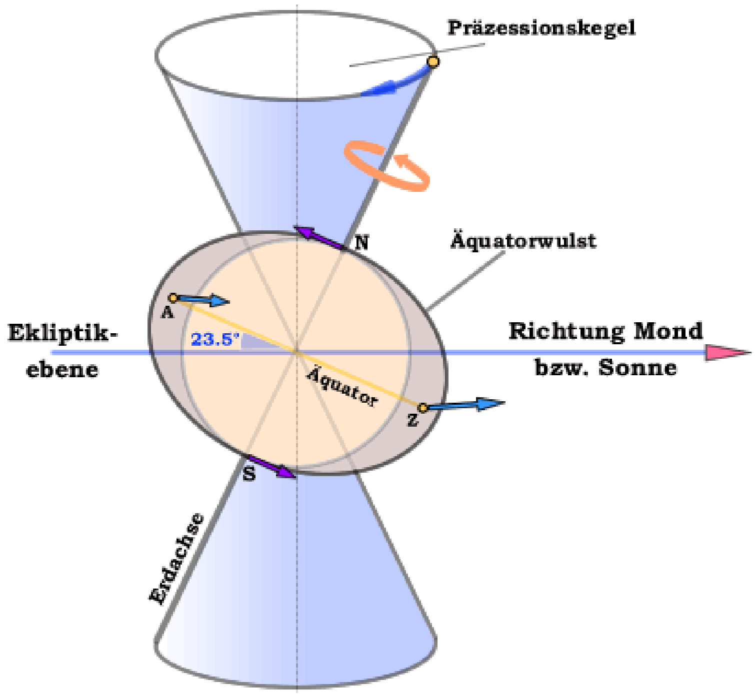
Ohne äußere Krafteinwirkung würde ein Fadenpendel seine Schwingungsebene immer beibehalten. Aufgrund der Eigenrotation der Erde dreht sich die Erdoberfläche unter dem Pendel weg. Deshalb rotiert scheinbar die Schwingungsebene relativ zur Erdoberfläche.

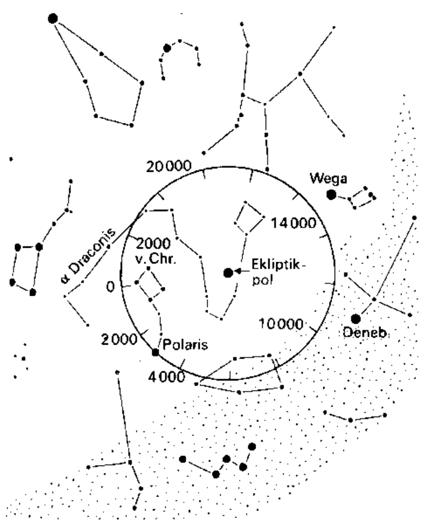


Die Präzession der Erdachse:

Wenn ein Kreisel nicht im Schwerpunkt gelagert ist, bewirken Drehmomente, die bei geneigter Drehachse versuchen, den Kreisel aufzurichten, eine Bewegung der Drehachse auf einem Kegelmantel. (**Präzessionsbewegung**)

Weil die Erde an den Polen abgeplattet und am Äquator ausgebuchtet ist, bewirken die Gravitationskräfte von Sonne und Mond bei der rotierenden Erde eine solche Präzessionsbewegung. Innerhalb von 25 700 Jahren (**Platonisches Jahr**) durchläuft die Erdachse einmal den Präzessionskegel.





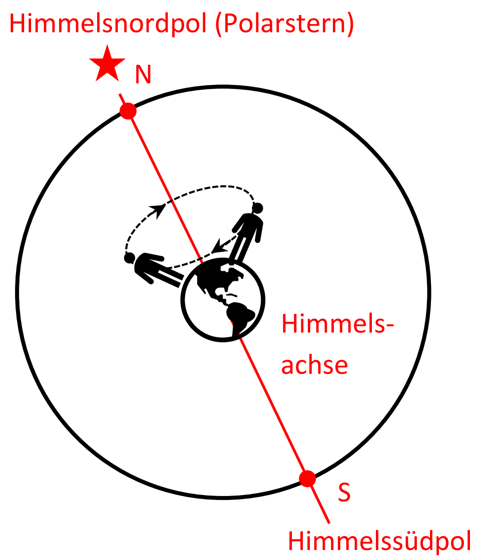
Die Rotationsachse des Präzessionskegels der Erdachse steht senkrecht auf der Ekliptik-Ebene, in der die scheinbare Bahn der Sonne um die Erde liegt. Der Mittelpunkt des Schnittkreises des Präzessionskegels der Erdachse mit der Himmelskugel heißt deshalb **Ekliptik-Nordpol**.

Mit der Erdachse wandern die Himmelspole. In etwa 12 000 Jahren wird der Himmelsnordpol in der Gegend des Sterns Wega liegen.

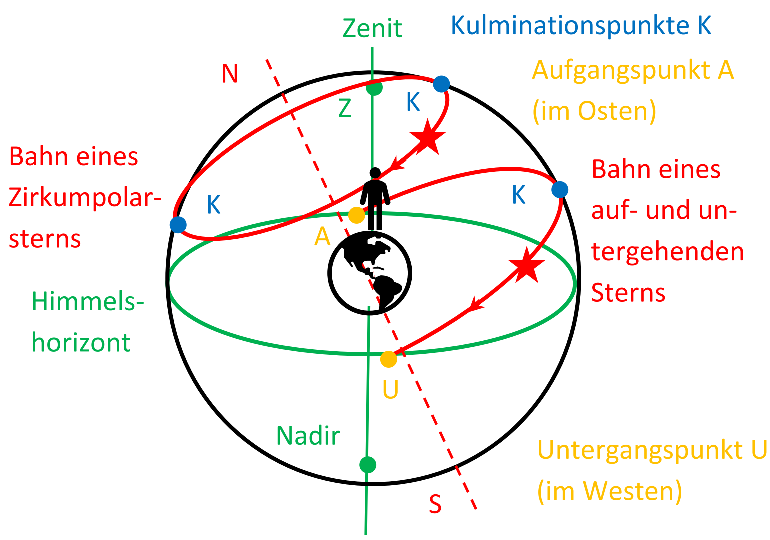
Die Bahnen der Sterne:

Die Rotationsachse verläuft durch Süd- und Nordpol der Erde. Sie zeigt im Norden zum Himmelsnordpol, an dem sich der Polarstern befindet. Wenn man entlang der Erdachse nach Norden blickt, dreht sich die Erde im Uhrzeigersinn um die Erdachse.
Folglich bewegen sich für einen irdischen Beobachter die Sterne scheinbar auf Kreisbahnen gegen den Uhrzeigersinn.

Mit der Erde rotierender Beobachter vom Weltall aus gesehen:



Scheinbare Kreisbahnen der Sterne von einem ruhenden Beobachter auf der Erde aus gesehen:



Erläuterungen:

Der **Himmelshorizont** ist die Ebene, auf der der irdische Beobachter steht.
Der **Zenit** ist der Punkt auf der Himmelskugel senkrecht über dem Beobachter.
Der **Nadir** ist der dem Zenit gegenüberliegender Punkt auf der Himmelskugel.
Der **Himmelsäquator** legt die auf der Erdachse senkrecht stehende Ebene durch den Ort des Beobachters fest. Der Himmelsäquator ist die Projektion des Erdäquators auf die Himmelskugel.

Die Sterne bewegen sich (scheinbar) auf Kreisbahnen in zum Himmelsäquator parallelen Ebenen.

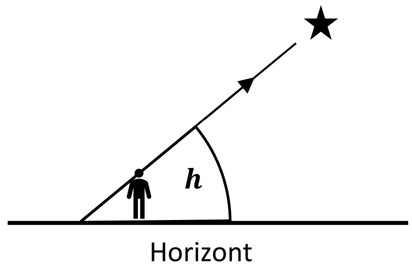
Der vom Beobachter aus gesehen höchste (tiefste) Bahnpunkt eines Sterns heißt **oberer (unterer) Kulminationspunkt**. Die Kulminationspunkte sind die Schnittpunkte der Sternbahn mit dem Himmelsmeridian.

Es gibt Sterne, die immer sichtbar sind, Sterne, die auf- und untergehen und Sterne, die nie sichtbar sind. Sterne, die immer sichtbar sind, heißen **Zirkumpolarsterne**.

Nur bei **Zirkumpolarsternen** liegen beide Kulminationspunkte aus der Sicht des Beobachters oberhalb des Horizonts, sind also sichtbar. Die oberen Kulminationspunkte liegen im Süden, die unteren Kulminationspunkte im Norden.

Die Höhe eines Sterns:

Der Winkel, unter dem ein Stern über dem Horizont steht, heißt **Höhe $\boldsymbol{h}$**. Die Höhe h eines Sterns ändert sich mit der Zeit.



Grundsätzlich gilt: $\boxed{\boldsymbol{-90° \leq h \leq 90°}}$

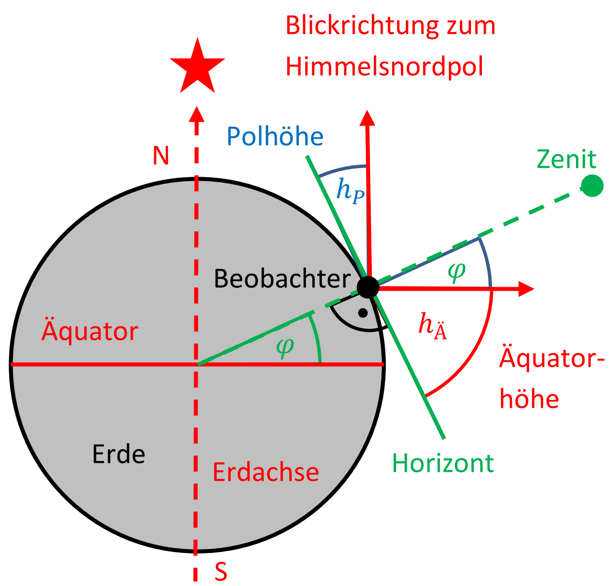
Ein **Stern ist sichtbar**, wenn gilt: $\boxed{0° \leq h \leq 90°}$

Polhöhe und Äquatorhöhe:

Der Winkel, unter dem der **Polarstern** über dem Horizont steht, heißt **Polhöhe $\boldsymbol{h_P}$**.

Der kleinere Winkel, den der Horizont mit dem Himmelsäquator einschließt, heißt **Äquatorhöhe $\boldsymbol{h_{\text{Ä}}}$**.

Beachte: Die Blickrichtung zum Polarstern muss parallel zur Erdachse (SN) gezeichnet werden, da der Polarstern in Wirklichkeit viel weiter von der Erde entfernt ist, als in der Skizze dargestellt.



Zusammenhang zwischen der Polhöhe $\boldsymbol{h_P}$, der Äquatorhöhe $\boldsymbol{h_{\text{Ä}}}$ und der geographischen Breite $\boldsymbol{\varphi}$ des Beobachtungsortes für einen Beobachter auf der Nordhalbkugel:

Aus der obigen Skizze für einen Beobachter auf der **Nordhalbkugel** lassen sich leicht folgende zwei Winkelbeziehungen herleiten:

$$\boxed{\boldsymbol{h_P = \varphi}} \quad \text{und} \quad \boxed{\boldsymbol{h_{\text{Ä}} = 90° - \varphi = 90° - h_P}}$$

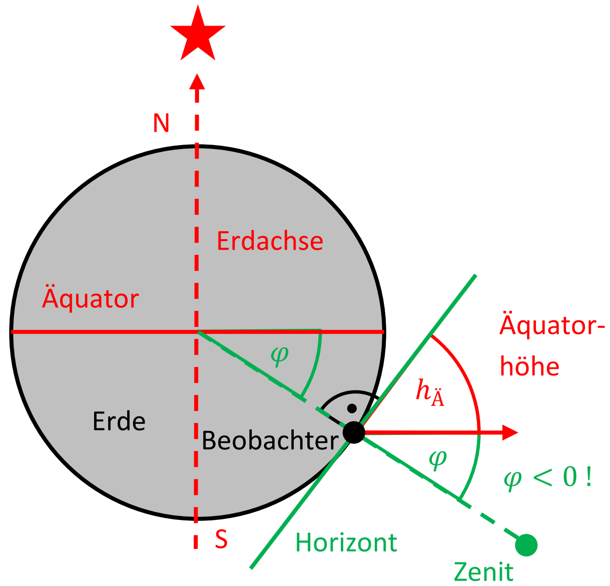
geographische Breite von Memmingen: $\boldsymbol{\varphi_{MM} = 48°}$

Für Beobachtungsorte auf der **Südhalbkugel** gilt $\boldsymbol{\varphi < 0}$.

Dort gilt: $\boldsymbol{h_{Ä} = 90° - (-\varphi) = 90° - (-h_P)}$
(vgl. Skizze rechts)

Allgemein folgt (für Beobachter auf der Nord- und Südhalbkugel):

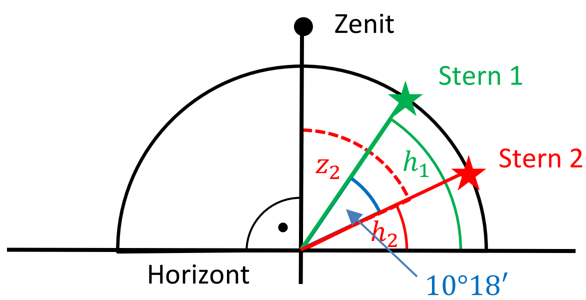
$$\boxed{\boldsymbol{h_{Ä} = 90° - |\varphi|}}$$



Rechenbeispiele:

Aufgabe 1:

Zwei Sterne besitzen einen Winkelabstand von 10°18' (Winkel zwischen den Blickrichtungen vom Beobachter zu den beiden Sternen) und liegen an der Himmelssphäre direkt übereinander. Vom oberen Stern wird eine Höhe von 26,8° gemessen. Wie groß ist die **Zenitdistanz** $\boldsymbol{z_2}$, das heißt, der Winkelabstand des zweiten Sterns vom Zenit?



$$\boldsymbol{z_2} = 90° - h_2 =$$
$$= 90° - (h_1 - 10°18') =$$
$$= 90° - (26{,}8° - 10{,}3°) =$$
$$= 90° - 16{,}5° =$$
$$= \boldsymbol{73{,}5°}$$

Aufgabe 2:

Der Stern δ-Ceti im Sternbild „Walfisch" befindet sich auf dem Himmelsäquator.
Welche maximale Höhe erreicht dieser Stern in Oslo ($\varphi = 59{,}5°$), München ($\varphi = 48{,}1°$), Athen ($\varphi = 42°$) und in Melbourne ($\varphi = -37{,}5°$)?

Maximale Höhe des Sterns = Äquatorhöhe = $h_{Ä} = 90° - |\varphi|$

Oslo: $h_{max} = 90° - 59{,}5° = 30{,}5°$
München: $h_{max} = 90° - 48{,}1° = 41{,}9°$
Athen: $h_{max} = 90° - 42° = 48°$
Melbourne: $h_{max} = 90° - |-37{,}5°| = 90° - 37{,}5° = 52{,}5°$

Astronomische Koordinatensysteme:

Um einen Stern am Himmel finden zu können (z.B. mit dem Computer-Teleskop), muss man seine Position an der Himmelskugel durch Koordinaten eindeutig beschreiben können.
Deshalb teilt man die Himmelskugel ähnlich wie die Erdkugel in Längen und Breitengrade ein.

Grundsätzlich werden zwei Koordinatensysteme verwendet: das auf der Anschauung beruhende **Horizontsystem** und das für Sternkataloge geeignete **Äquatorsystem**.

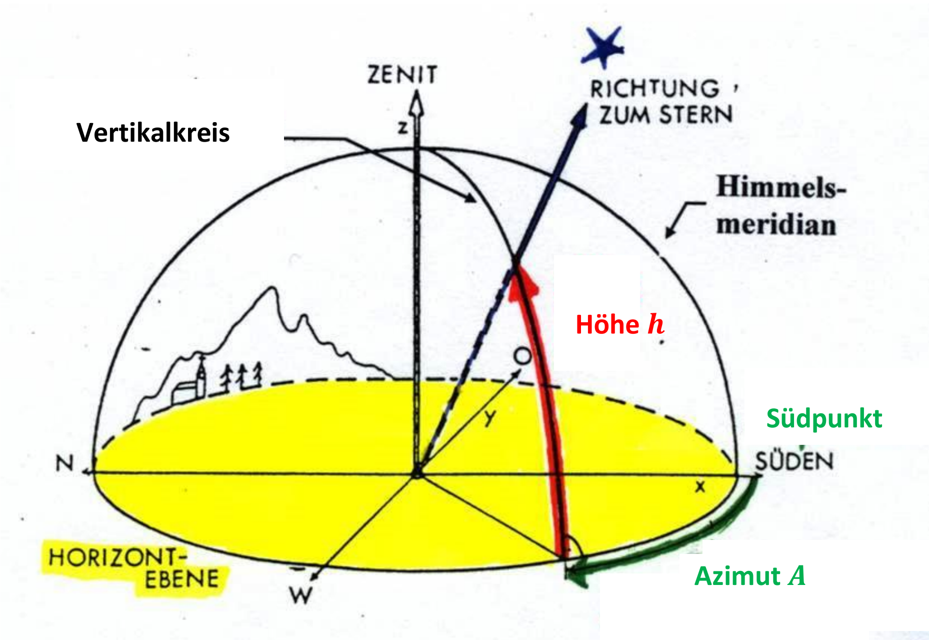
Für alle Koordinatensysteme sind folgende Großkreise wichtig:

Der **Himmelsmeridian** ist der Großkreis der Himmelskugel, der durch **Zenit**, **Nadir** und die **Himmelspole** verläuft. Er ist also die Projektion des Längenkreises des Beobachtungsstandortes auf die Himmelssphäre. Der Himmelsmeridian verändert seine Lage im Lauf einer Nacht nicht.

Der **Vertikalkreis** eines Sterns ist der Großkreis auf der Himmelskugel, der durch **Zenit**, **Nadir** und den **Stern** verläuft. Er spielt im **Horizontsystem** eine Rolle. Der Vertikalkreis wandert im Lauf einer Nacht von Ost nach West.

Der **Stundenkreis** eines Sterns ist der Großkreis der Himmelskugel, der durch die **Himmelspole** und den **Stern** verläuft. Er spielt im **Äquatorsystem** eine Rolle. Auch der Stundenkreis wandert im Lauf einer Nacht von Ost nach West.

Das Horizontsystem:



Bezugsebene:	**Horizontebene**	
Koordinaten:	**Höhe h**	$-90° \leq h \leq 90°$, h ist zeitabhängig.
	Azimut A	$0° \leq A \leq 360°$, A ist zeitabhängig.

Die **Höhe h** ist der Winkel zwischen der Blickrichtung zum Stern und der Horizontebene.

Der **Azimut A** ist der Winkel zwischen den Schnittpunkten des Himmelsmeridians mit dem Horizont im Süden (**Südpunkt**) und dem Vertikalkreis des Sterns. Der Azimut wird in Grad angegeben und in der scheinbaren Bewegungsrichtung des Sterns gemessen (also von O nach W).

Vorteile des Horizontsystems:

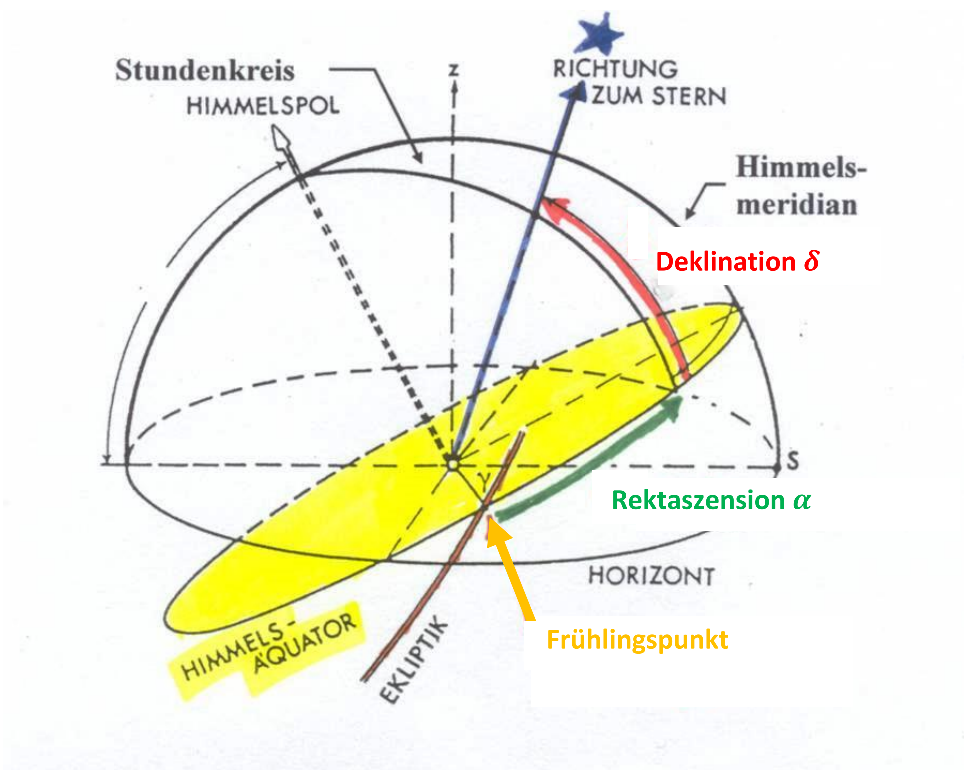
Weil das Horizontsystem die Horizontebene als Bezugsebene hat, stellt es die Himmelskugel so dar, wie der Beobachter sie sieht. Deshalb ist dieses Koordinatensystem das anschaulichere der beiden astronomischen Koordinatensysteme.

Nachteile des Horizontsystems:

Die Höhe h und der Azimut A ändern sich mit der Zeit.
Die Höhe h hängt zudem vom Beobachtungsort ab.

Somit eignen sich die Koordinaten des Horizontsystems nicht für einen Sternenkatalog.

Das Äquatorsystem:



Bezugsebene:	**Äquatorebene** (Projektion des Erdäquators auf die Himmelskugel)	
Koordinaten:	**Deklination δ**	$-\mathbf{90}° \leq \delta \leq \mathbf{90}°$, δ ist fest.
	Rektaszension α	$0 \leq \alpha \leq 24\ h$, α ist fest.

Die **Deklination** δ ist der Winkel zwischen der Blickrichtung zum Stern und der Äquatorebene.

Die **Rektaszension** α ist der Winkel zwischen dem **Frühlingspunkt** und dem Schnittpunkt des **Stundenkreises** des Sterns mit dem Himmelsäquator. Die Rektaszension wird vom Frühlingspunkt aus entgegen der scheinbaren Bewegungsrichtung des Sterns gemessen (also von W nach O!). Die Rektaszension wird in Stunden angegeben. Dabei entsprechen 24 h einem Winkel von 360°.

Der **Frühlingspunkt** ist der Punkt, an dem die Sonnenbahn (Ekliptik) den Himmelsäquator am Frühlingsanfang schneidet. Am Frühlingsanfang (21. März) steht die Sonne um 12.00 Uhr mittags im Frühlingspunkt. Der Frühlingspunkt **liegt fest im Sternbild Fische, wandert also gemeinsam mit dem Sternbild Fische mit dem beobachteten Stern mit.** Dies hat zur Folge, dass sich die Rektaszension des Sterns nicht ändert.

Dass für den Frühlingspunkt das **Symbol ϒ** des Sternbilds „Widder“ verendet wird, hat seine Ursache in der Wanderung des Himmelsnordpols (vgl. S. 13). Der Frühlingspunkt wurde bereits ein Jahrtausend v. Chr. als „Widderpunkt“ benannt. Der Frühlingspunkt verschiebt sich pro Jahr um 50 Bogensekunden, also in 2140 Jahren um 30°, d.h. um ein Tierkreiszeichen.

Vorteile des Äquatorsystems:

Beide Koordinaten des Äquatorsystems sind für einen Stern zeitunabhängig und für jeden Beobachtungsort gleich. Die Position eines Sterns an der Himmelskugel wird also durch Deklination und Rektaszension eindeutig festgelegt und gilt für jeden Beobachtungsort und zu jeder Zeit.

Damit eignen sich die Koordinaten des beweglichen Äquatorsystems für Sternkataloge.

Nachteile des Äquatorsystems:

Das Äquatorsystem ist für einen Beobachter auf freiem Feld relativ schwer nachvollziehbar, weil die Bezugsebene die Ebene des Himmelsäquators ist. Man muss sich den Himmelsäquator auf der Himmelskugel als Großkreis vorstellen, der im Süden mit dem Horizont einen Winkel einschließt, der der geographischen Breite des Beobachtungsortes entspricht. Im Osten und Westen schneidet der Himmelsäquator den Horizont.

<u>Auszug aus einem Sternkatalog</u>:

Beachte: Eine negative Deklination bedeutet nicht automatisch, dass man den Stern von Memmingen aus nicht sehen kann!

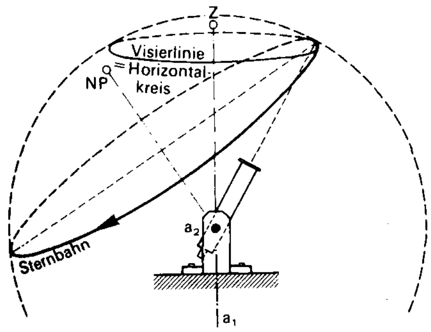
Wegen $h_{Ä} = 90° - \varphi = 90° - 48° = 42°$ kann man von Memmingen aus alle Sterne mit einer Deklination $\delta > -42°$ beobachten. Sie sind zwischen Himmelsäquator und Horizont sichtbar. Beispiele: Sirius, Rigel

Die hellsten Sterne

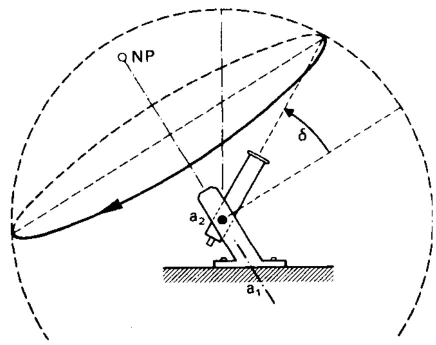
Rekt. h m s	Dekl. ° '	Helligkeit	Spektraltyp	Entfernung (Lichtjahre)	Sternbild	Name
06 45 09	−16 43	−1,5	A1	8,7	α CMa	Sirius
06 23 57	−52 42	−0,7	F0	300	α Car	Canopus
14 15 40	+19 11	−0,04	K1	36	α Boo	Arktur
14 39 36	−60 50	−0,0	G2	4,4	α¹Cen	Rigil Kentaurus
18 36 56	+38 47	0,03	A0	26	α Lyr	Wega
05 16 41	+46 00	0,08	G5	45	α Aur	Capella
05 14 32	−08 12	0,12	B8	850	β Ori	Rigel
07 39 18	+05 13	0,38	F5	11	α CMi	Procyon
01 37 43	−57 14	0,46	B3	75	α Eri	Achernar
05 55 10	+07 24	0,50	M1	650	α Ori	Betelgeuse
14 03 49	−60 22	0,61	B1	300	β Cen	Hadar
19 50 47	+08 52	0,77	A7	17	α Aql	Atair

Teleskopmontierungen:

Teleskope mit azimutaler Montierung verwenden die **Horizontebene als Bezugsebene**. Es müssen deshalb die zwei Koordinaten des Horizontsystems (Höhe und Azimut) ständig nachgeführt werden. Dies ist ein Nachteil bei Nachführung von Hand.
Der Nachführcomputer eines Computerteleskops berechnet die Koordinaten ständig neu, so dass eine azimutale Montierung hier keine Nachteile bringt.



Ein **Teleskop mit parallaktischer Montierung** verwendet die **Äquatorebene als Bezugsebene**. Nun muss nur noch eine Koordinate, der sogenannte Stundenwinkel, nachgeführt werden. Der Winkel zwischen Äquatorebene und Stern, die Deklination des Äquatorsystems, bleibt fest.
Bei Nachführung von Hand ist ein Teleskop mit parallaktischer Montierung einfacher zu bedienen, da man es nur um die Achse a_1 drehen muss, um den Stern zu verfolgen.

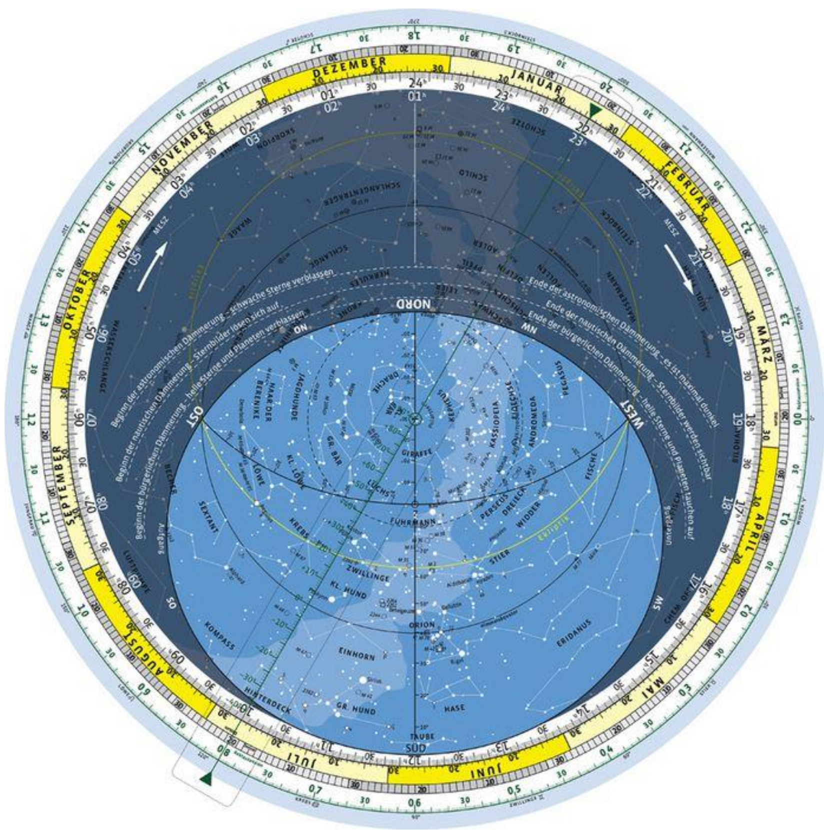


Die drehbare Sternkarte

Eine drehbare Sternkarte ist gewissermaßen eine Landkarte für den Sternenhimmel. Sie hilft, Sternbilder zu identifizieren und sich anhand von Sternbildern an der Himmelskugel zu orientieren.

Objekte, deren Deklination und Rektaszension etwa aus einem Sternenkatalog bekannt sind, können mithilfe einer Sternkarte gefunden werden. Ebenso kann man die Koordinaten von Sternen und eingezeichneten Astronomischen Objekten wie Sternhaufen, Nebeln oder Galaxien aus der Sternkarte ablesen und beispielsweise in die Steuerung eines Computerteleskops eingeben.

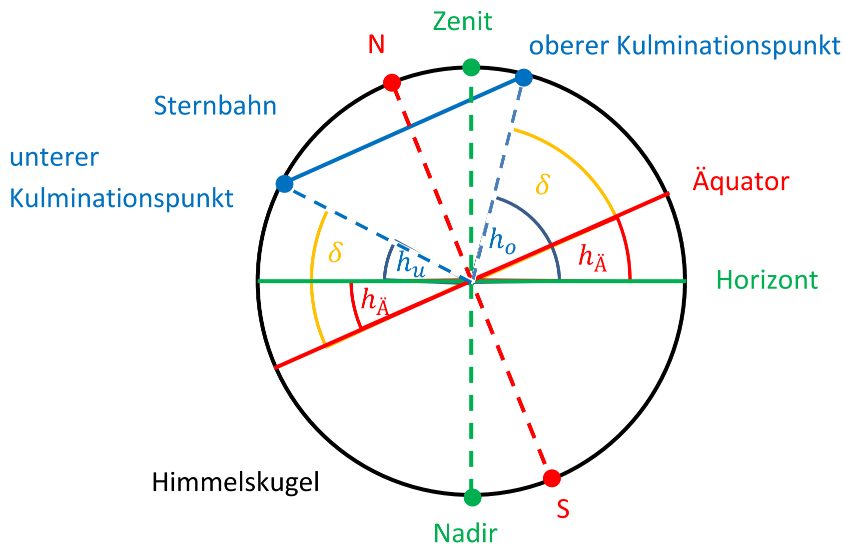
Nähere Informationen zum Umgang mit der Sternkarte kann man auf der Rückseite der Sternkarte oder in der Bedienungsanleitung nachlesen.



Kulmination und Sichtbarkeit von Sternen:

Die größte (kleinste) Höhe über dem Horizont, die ein Stern erreicht, heißt **obere Kulminationshöhe $\boldsymbol{h_o}$** bzw. **(untere) Kulminationshöhe $\boldsymbol{h_u}$**.

Die folgende Abbildung illustriert für einen Zirkumpolarstern und einen Beobachter auf der Nordhalbkugel der Erde die Zusammenhänge zwischen den Kulminationshöhen h_o und h_u des Sterns und seiner Deklination δ:



Aus der Zeichnung lesen wir ab:

obere Kulminationshöhe:	$h_o = \delta + h_Ä$
untere Kulminationshöhe:	$h_u = \delta - h_Ä$

<u>Übungsaufgabe</u>:

Skizziere die Situation auch für die Bahnen eines nicht zirkumpolaren Sterns und eines nicht sichtbaren Sterns. Zeige, dass die obenstehenden Formeln auch für diese Fälle gelten! Beachte dabei die möglicherweise negativen Vorzeichen der Deklination δ.

Mit $h_Ä = 90° - h_P$ und $h_P = \varphi$ ($\varphi =$ geograph. Breite des Beobachtungsortes) folgt für Beobachter auf der <u>Nordhalbkugel</u>:

obere Kulminationshöhe:	$h_o = \delta + (90° - \varphi)$
untere Kulminationshöhe:	$h_u = \delta - (90° - \varphi)$

<u>Beispiel</u>: **Kulminationshöhe des Sirius von Memmingen aus gesehen:**

geographische Daten von Memmingen: geogr. Breite: $\varphi = 48°$, geogr. Länge: $\lambda = 10{,}25°$

Koordinaten von Sirius: Rektaszension: Deklination: $\delta = -16°43'$, Rektaszension: $\alpha = 6h45\,\mathrm{min}\,9s$

obere Kulminationshöhe: $h_o = \delta + (90° - \varphi) = -16°43' + (90° - 48°) = 25°17'$

untere Kulminationshöhe: $h_u = \delta - (90° - \varphi) = -16°43' - (90° - 48°) = -58°43'$

Weil die obere Kulminationshöhe h_o des Sirius positiv, seine untere Kulminationshöhe h_u aber negativ ist, geht Sirius für einen Beobachter in Memmingen auf und unter. Sirius ist also nur zu bestimmten Zeiten sichtbar.

Welche Sterne sind sichtbar?

Ob ein Stern für einen Beobachter zirkumpolar, also immer sichtbar ist, ob er auf- und untergeht oder ob er nie sichtbar ist, hängt von der geographischen Breite φ des Beobachtungsorts und von der Deklination δ des Sterns ab.

Für die Sichtbarkeit eines Sterns gilt:

Ein Stern **geht** genau dann **nie unter**, wenn $\boldsymbol{h_u > 0}$

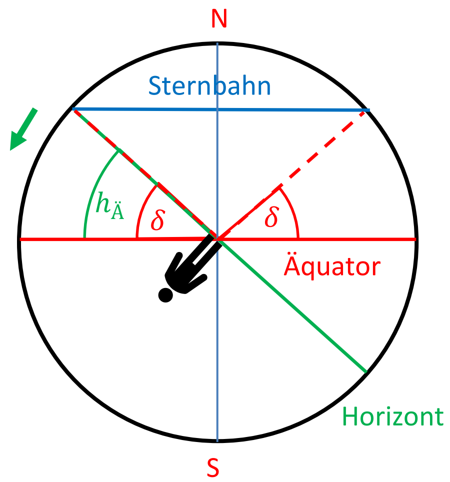
Ein Stern ist genau dann **nie sichtbar**, wenn $\boldsymbol{h_o < 0}$

Mit folgendem, an einem konkreten Beispiel demonstrierten Verfahren kann man anschaulich und ohne komplizierte Berechnungen herausfinden, für welche Beobachtungsorte ein Stern sichtbar, bzw. sogar zirkumpolar ist.
Das Verfahren eignet sich für Beobachtungsorte auf der Nordhalbkugel und auf der Südhalbkugel gleichermaßen.

<u>Aufgabenbeispiel</u>:

Von welchen Orten ist der von Memmingen aus gesehen höchste Stern des Sternbildes Perseus nie sichtbar? Der Stern hat die Deklination $\delta = 59°$!

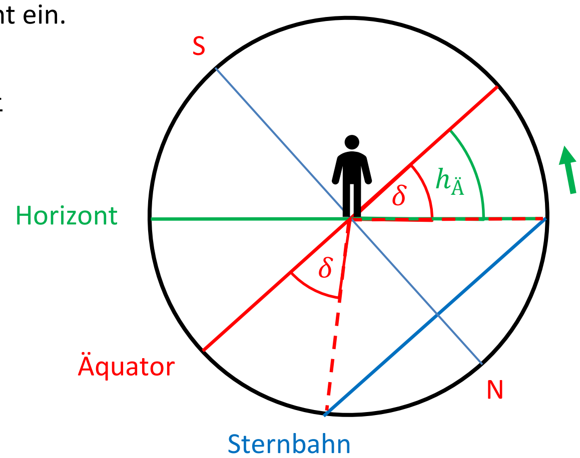
Lösungsweg in 4 Schritten:



Schritt 1:
Zeichne einen Querschnitt der Himmelskugel mit Himmelsäquator und Himmelspolen.
Trage die (zum Äquator parallele) Sternbahn mit $\delta = 59°$ ein.

Schritt 2:
Der Stern ist <u>gerade nie</u> sichtbar, wenn die Sternbahn gerade unterhalb des Horizonts liegt.
$\Longrightarrow$ Zeichne den Horizont entsprechend ein.
Man erkennt: $h_Ä = \delta$ bzw. „nie sichtbar" $\Leftrightarrow$ $h_Ä < \delta$

Schritt 3:
Drehe deine Zeichnung so, dass der Horizont waagrecht steht und die Sternbahn unter dem Horizont liegt.
Zeichne den Beobachter (Männchen) <u>auf</u> dem Horizont ein.
Weil der Beobachter über sich den <u>Südpol</u> sehen würde, muss der Beobachtungsort auf der <u>Südhalbkugel</u> liegen.



Schritt 4:

Berechne zu $h_Ä < \delta$ die Bedingung für die geographische Breite φ des Beobachtungsortes:

Mit $h_Ä = 90° - |\varphi|$ folgt auf der Südhalbkugel wegen $\varphi < 0$: $h_Ä = 90° + \varphi$.

$$h_Ä < \delta \;\Leftrightarrow\; 90° + \varphi < \delta \;\Leftrightarrow\; \varphi < \delta - 90° \;\Leftrightarrow\; \varphi < 59° - 90° \;\Leftrightarrow\; \boldsymbol{\varphi < -31°}$$

Zirkumpolarsterne für Beobachter in Memmingen:

Memmingen hat die geographische Breite $\varphi = 48°$.

Zirkumpolarsterne für Memmingen müssen die Deklination $\boldsymbol{\delta} > 90° - 48° = \mathbf{42}°$ haben.

Von den Sternen in der nebenstehenden Tabelle wäre der Stern Capella, der hellste Stern im Sternbild Fuhrmann, für Memmingen zirkumpolar.

Die hellsten Sterne

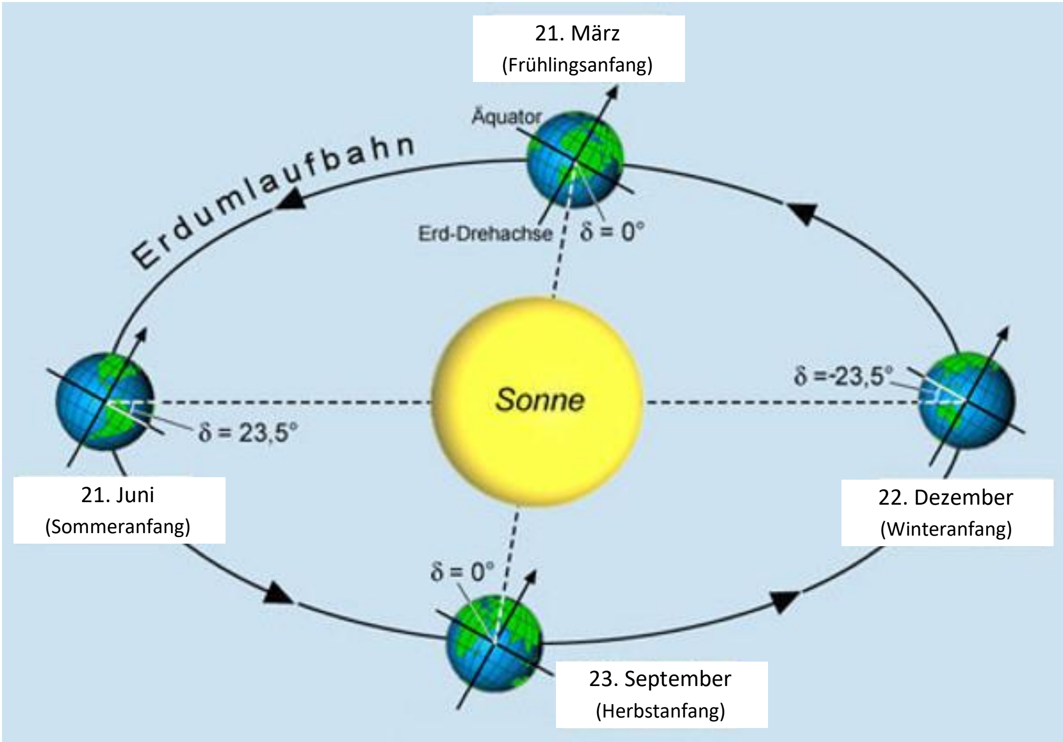
Rekt. h	m	s	Dekl. °	′	Helligkeit	Spektraltyp	Entfernung (Lichtjahre)	Sternbild	Name
06	45	09	−16	43	−1,5	A1	8,7	α CMa	Sirius
06	23	57	−52	42	−0,7	F0	300	α Car	Canopus
14	15	40	+19	11	−0,04	K1	36	α Boo	Arktur
14	39	36	−60	50	−0,0	G2	4,4	α^1Cen	Rigil Kentaurus
18	36	56	+38	47	0,03	A0	26	α Lyr	Wega
05	16	41	+46	00	0,08	G5	45	α Aur	Capella
05	14	32	−08	12	0,12	B8	850	β Ori	Rigel
07	39	18	+05	13	0,38	F5	11	α CMi	Procyon
01	37	43	−57	14	0,46	B3	75	α Eri	Achernar
05	55	10	+07	24	0,50	M1	650	α Ori	Betelgeuse
14	03	49	−60	22	0,61	B1	300	β Cen	Hadar
19	50	47	+08	52	0,77	A7	17	α Aql	Atair

Von Memmingen aus **nie sichtbar** sind Sterne mit der Deklination $\delta < 48° - 90° = -42°$.

Also können beispielsweise Canopus, Rigil Kentaurus und Hadar von Memmingen aus nicht beobachtet werden.

Die scheinbare Bewegung der Sonne:

Die Ekliptik:



Die Erde bewegt sich als Planet im Lauf eines Jahres auf einer elliptischen, näherungsweise kreisförmigen Bahn um die Sonne. Für einen Beobachter auf der Erde entsteht deshalb der Eindruck, die Sonne würde um die Erde laufen. Diese Beobachtung legte ein geozentrisches Weltbild nahe.

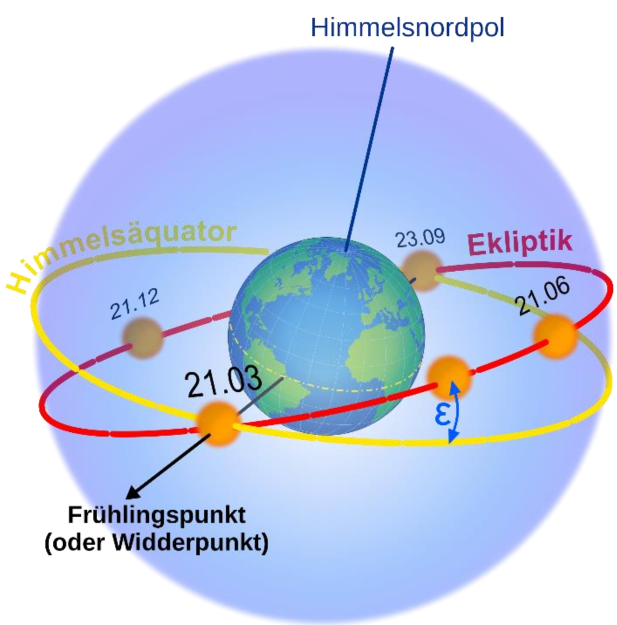
Die scheinbare Umlaufbahn der Sonne um die Erde heißt **Ekliptik**. Im geozentrischen Weltbild ist die Ekliptikebene die Ebene, in der die Umlaufbahn der Erde um die Sonne liegt

Die Ekliptik verläuft durch die **12 Tierkreiszeichen**.

Beachte: Das „aktuelle" Tierkreiszeichen steht mittags im Süden, kann also nicht beobachtet werden!

Die Erdachse ist gegenüber der Ebene, in der die Umlaufbahn der Erde um die Sonne liegt, um den Winkel $\varepsilon = 23{,}5°$ geneigt. Daraus ergibt sich ein Neigungswinkel von $90° - 23{,}5° = 66{,}5°$ zwischen Ekliptik und Erdachse.

Die Ekliptik schneidet die Äquatorebene in zwei Punkten: im **Frühlingspunkt** (Sternbild „Fische") und im **Herbstpunkt** („Sternbild Jungfrau").
In diesen beiden Punkten steht die Sonne am Frühlingsanfang (21. März) bzw. am Herbstanfang (23. September) um 12.00 mittags.



Kulmination und Deklination der Sonne:

Im Laufe eines Tages ändert sich der Sonnenstand (Höhe der Sonne über dem Horizont).

Wie für die anderen Fixsterne lässt sich auch für die Sonne eine **Kulminationshöhe** berechnen:

$$\boxed{h_o = \delta_\odot + h_{\text{Ä}} = \delta_\odot + (90° - \varphi)}$$

Durch das Erreichen der Kulminationshöhe der Sonne wird in der „wahren Ortszeit“, die von einer Sonnenuhr angezeigt wird, „12.00 Uhr Mittag“ festgelegt. Deshalb heißt die Kulminationshöhe der Sonne auch **Mittagshöhe**.

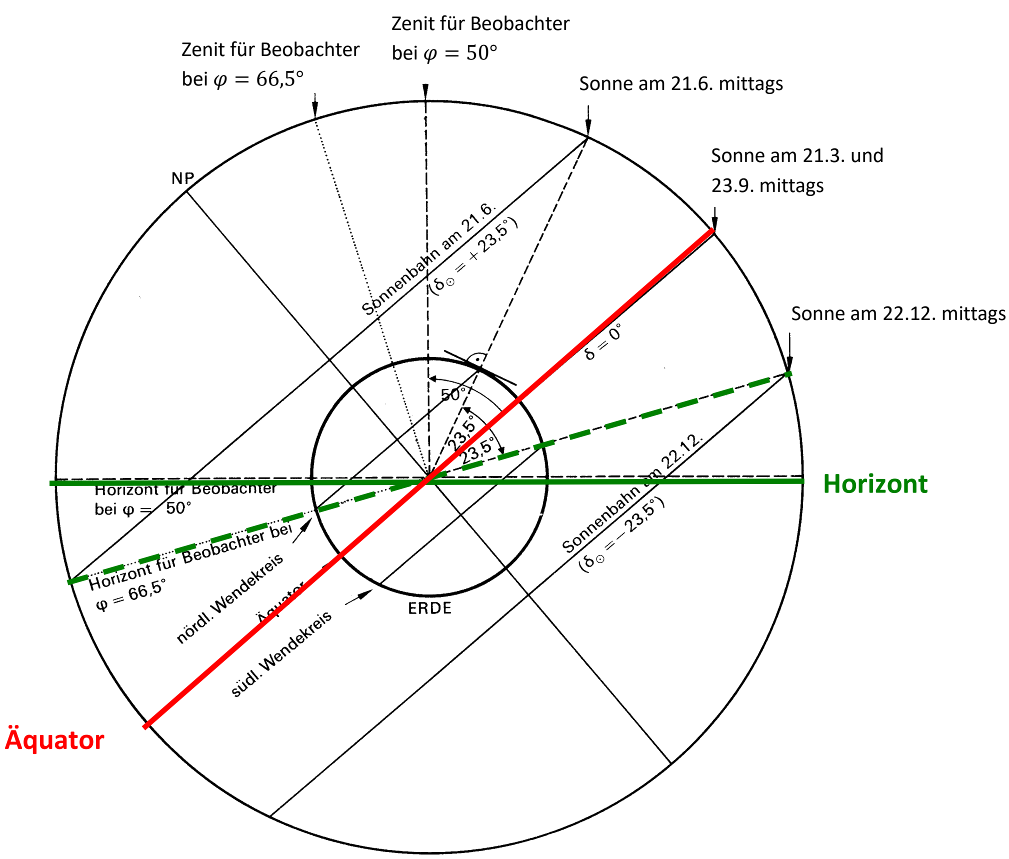
Im Laufe eines Jahres ändert sich, anders als bei den übrigen Sternen, die Kulminationshöhe h_o der Sonne. Im Sommer erreicht die Sonne einen höheren Stand als im Winter.

Weil sich für ein und denselben Beobachtungsort (geographische Breite φ ist fest) die Kulminationshöhe im Laufe eines Jahres ändert, folgt, dass sich die Deklination $\delta_\odot$ der Sonne im Jahreslauf ändern muss.

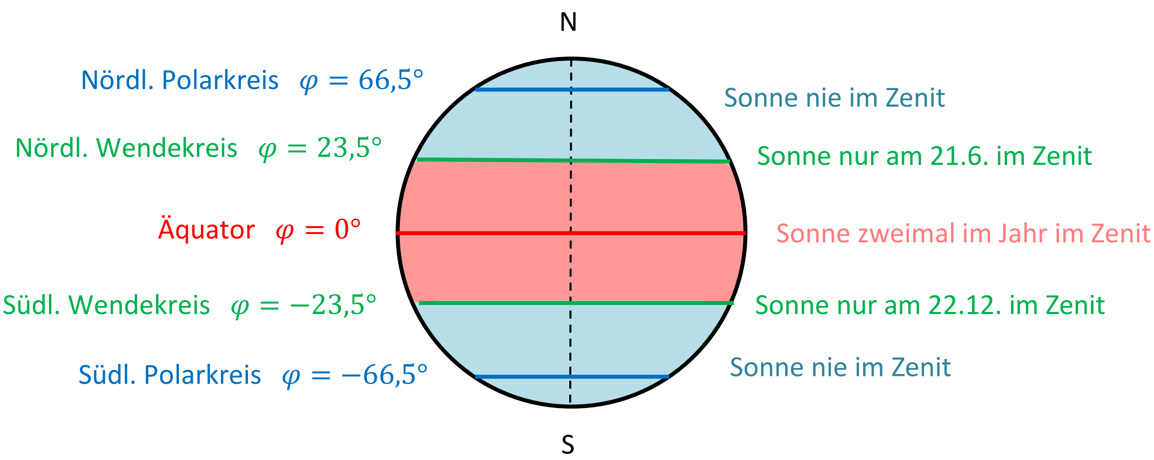
Im Gegensatz zu den übrigen Sternen ist die **Deklination $\boldsymbol{\delta_\odot}$ der Sonne** keine feste Koordinate, sondern **zeitabhängig**!

Zwischen den beiden **Sonnwenden** am **21. Juni (Sommeranfang)** und **22. Dezember (Winteranfang)** wandert die Sonne scheinbar auf einer Schraubenlinie zwischen den Deklinationen $\delta_\odot = 23{,}5°$ und $\delta_\odot = -23{,}5°$.

Beachte: In Skizzen und Berechnungen verwenden wir für „Sonnengrößen“ als Index das Sonnensymbol ⊙.



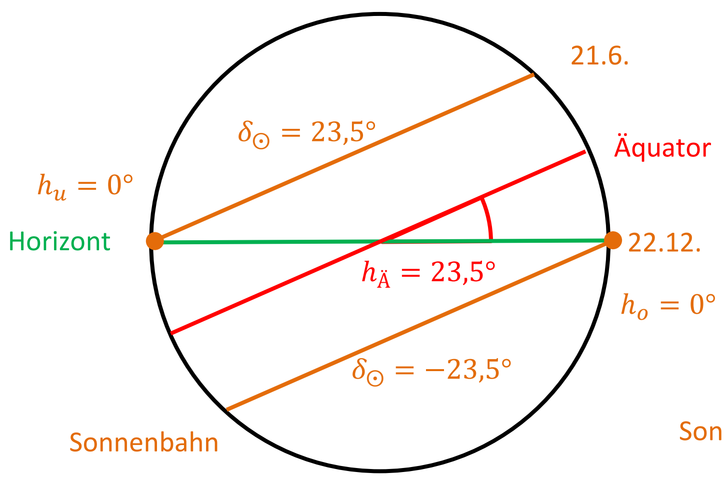
Ob und wie oft im Jahr die **Sonne** an einem Ort **im Zenit**, also senkrecht über dem Beobachter steht, hängt von der geographischen Breite φ des Beobachtungsorts ab:

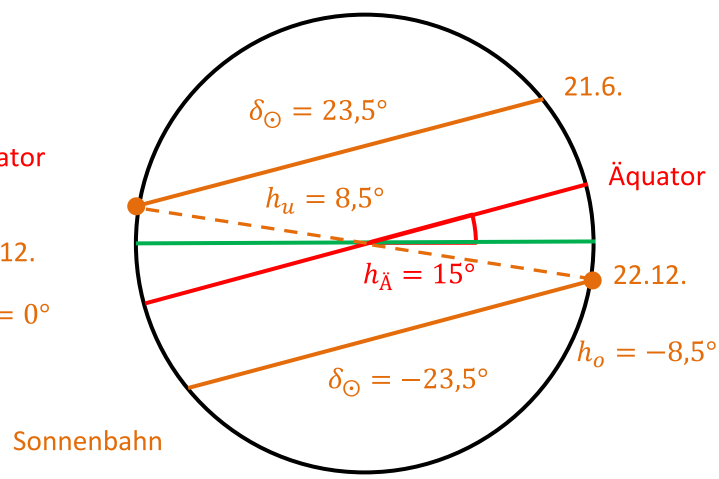


Polartag und Polarnacht:

Jenseits der Polarkreise ($\varphi = \pm 66{,}5°$) treten um die Sonnwenden **Polartag** und **Polarnacht** auf. Im Sommer wird es einige Tage (je nach geographischer Breite des Ortes) nie dunkel, im Winter wird es einige Tage nie richtig hell.

Um zu verstehen, wie Polartag und Polarnacht entstehen, zeichnen wir uns die Himmelskugel für einen Ort am nördlichen Polarkreis ($\varphi = 66{,}5°$, $h_Ä = 90° - \varphi = 23{,}5°$) und für einen Ort nördlich des nördlichen Polarkreises ($\varphi = 75°$, $h_Ä = 90° - \varphi = 15°$) auf:



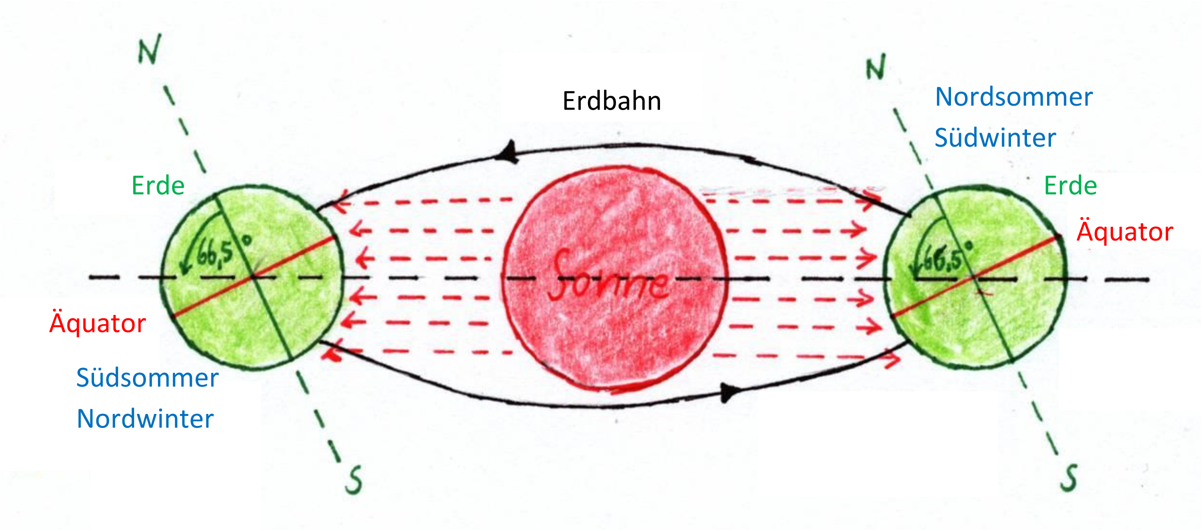


Wie jede Sternbahn verläuft auch die Sonnenbahn über einen Tag betrachtet (näherungsweise) in einer zur Äquatorebene parallelen Ebene. Im Unterschied zu den übrigen Sternbahnen wandert die Sonnenbahn aber während eines Jahres von $\delta_\odot = 23{,}5°$ über den Himmelsäquator nach $\delta_\odot = -23{,}5°$ und zurück.

Während die Sonne am nördlichen Polarkreis ($\varphi = 66{,}5°$, linke Abbildung) am Sommerbeginn (21.6.) gerade nicht untergeht ($h_u = 0°$) und am Winteranfang (22.12.) gerade nicht aufgeht ($h_o = 0°$), sieht man, dass die Sonne an Orten nördlich des nördlichen Polarkreises (z.B. $\varphi = 75°$, rechte Abbildung) in einer Zeit um den 22.12. nie aufgeht (**Polarnacht**) und in einer Zeit um den 21.6. nie untergeht (**Polartag**).

Wie entstehen die Jahreszeiten?

Die Erdachse ändert ihre Ausrichtung beim Umlauf der Erde um die Sonne nur geringfügig. Sie schließt mit der Ekliptikebene einen Winkel von 66,5° ein.



Im Lauf eines Jahres erscheint die Sonne teils oberhalb, teils unterhalb des Äquators. Deshalb fällt die Sonneneinstrahlung im Nordsommer steiler auf die Nordhalbkugel, im Nordwinter steiler auf die Süd- halbkugel der Erde.

Die Jahreszeiten sind eine Folge der geneigten Erdachse!

Aufgaben zu Kapitel I Orientierung am Nachthimmel:

Aufgabe 1: Strichspuraufnahme eines Sterns

Wenn man den Nachthimmel mit einer langen Belichtungszeit fotografiert, werden auf dem Film nicht nur die Farben der Sterne sichtbar, sondern auch ihre scheinbaren Kreisbahnen um den Polarstern sind gut erkennbar. Eine solche Aufnahme nennt man **Strichspuraufnahme**.

Auf einer Strichspuraufnahme sind der Polarstern und eine 5 cm lange Strichspur zu sehen, die einen Radius von 11,5 cm hat. Berechne aus diesen Angaben die Belichtungszeit der Aufnahme!

Lösung:

Bei einer Belichtungszeit von 24 h wäre die Strichspur (wenn man davon ausgeht, dass man die Sternbahn auch untertags auf der Fotografie sehen kann) so lang, wie der Umfang eines Kreises mit dem Radius $r = 11{,}5\ cm$, also: $u = 2\pi r\tau \approx 72{,}3\ cm$.

Belichtungszeit t:

$$\frac{t}{24\ h} = \frac{5\ cm}{72{,}3\ cm} \quad \Longrightarrow \quad t = \frac{5}{72{,}3} \cdot 24\ h \approx 1{,}66\ h \approx 99{,}6\ min \approx 1h\ 40min$$

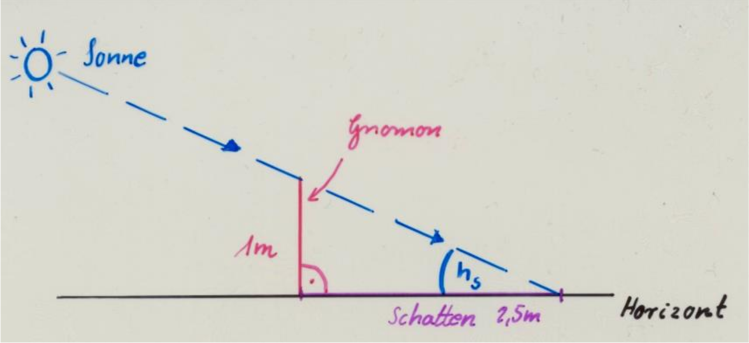
Aufgabe 2: Sonnenuhr und Zenitdistanz

1) Der Zeiger einer Sonnenuhr heißt auch „Gnomon". Ein Gnomon der Länge 1 m zeigt in Richtung Zenit und wirft einen 2,5 m langen Schatten auf dem horizontalen Ziffernblatt. In welcher Höhe steht die Sonne?

2) In Rom misst man eine Zenitdistanz des Himmelsnordpols von 48,5°, in Kairo 60°.

3) Berechnen Sie die geographischen Breiten der beiden Orte! Welche Zenitdistanz des Polarsterns würde man in Memmingen messen?

Lösung:



zu 1)

$$\tan h_s = \frac{1\ m}{2{,}5\ m} = 0{,}4 \quad \Longrightarrow \quad h_s = 21{,}8°$$

zu 2)

$$z_p = 90° - h_p = 90° - \varphi$$

$$\Longrightarrow \quad \varphi = 90° - z_p$$

Rom: $\varphi = 90° - 48{,}5° = 41{,}5°$

Kairo: $\varphi = 90° - 60° = 30°$

Aufgabe 3: **Sichtbarkeit von Sternen**

Für welche Orte auf der Erdoberfläche ist

1) der Stern δ-Valae ($\alpha = 8\,h\ 43\ min$, $\delta = -54°31'$) niemals sichtbar?

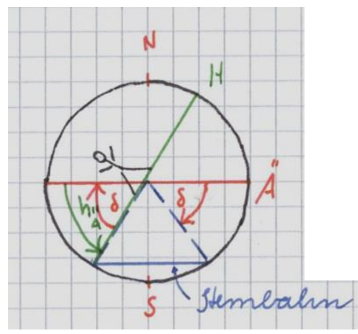
2) der Stern Algol ($\alpha = 3\,h\ 5\ min$, $\delta = 40°46'$) zirkumpolar?

3) das gesamte Sternbild Perseus ganzjährig sichtbar?
(Perseus erstreckt sich von $\delta = 59°$ bis $\delta = 32°$.)

Hinweis: Wende bei beiden Aufgaben das im Skript beschriebene 4-Schritte-Verfahren an!

Lösung:

zu 1)



Beobachter sieht N $\Longrightarrow$ auf Nordhalbkugel $\Longrightarrow$ $h_{Ä} = 90° - \varphi$

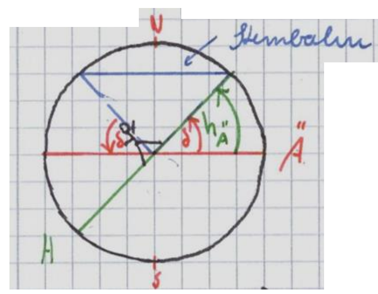
Nie sichtbar $\Longrightarrow h_{Ä} < |\delta|$; $\delta < 0 \Longrightarrow h_{Ä} < -\delta$

$\Longrightarrow\ 90° - \varphi < -\delta$

$\Longrightarrow\ \boldsymbol{\varphi} > 90° + \delta = 90° + (-54°31') = \mathbf{35°29'}$

Für Beobachter an Orten nördlich $35°29'$ nördlicher geographischer Breite ist der Stern δ-Valae nie sichtbar.

zu 2)



Algol ist Zirkumpolar, wenn Algol immer sichtbar ist.

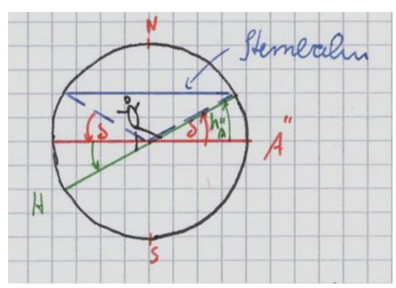
Beobachter sieht N $\Longrightarrow$ auf Nordhalbkugel $\Longrightarrow$ $h_{Ä} = 90° - \varphi$

zirkumpolar $\Longrightarrow h_{Ä} < \delta$; $\Longrightarrow$ $90° - \varphi < \delta$

$\Longrightarrow\ \boldsymbol{\varphi} > 90° - \delta = 90° - 40°46' = \mathbf{49°14'}$

Für Beobachter an Orten nördlich $49°14'$ nördlicher geographischer Breite ist der Stern Algol zirkumpolar.

zu 3)



Das Sternbild Perseus ist ganzjährig sichtbar, wenn alle seine Sterne zirkumpolar sind. Perseus ist ein am Nordhimmel sichtbares Sternbild. Die Bedingung lautet also:

„Für welche Orte ist der Stern mit $\delta = 32°$ zirkumpolar?“

Beobachter sieht N $\Longrightarrow$ auf Nordhalbkugel $\Longrightarrow$ $h_{Ä} = 90° - \varphi$

zirkumpolar $\Longrightarrow h_{Ä} < \delta$; $\Longrightarrow$ $90° - \varphi < \delta$

$\Longrightarrow\ \boldsymbol{\varphi} > 90° - \delta = 90° - 32° = \mathbf{58°}$

Für Beobachter an Orten nördlich 58° nördlicher geographischer Breite ist das Sternbild Perseus ganzjährig sichtbar.

<u>Aufgabe 4</u>: Sichtbarkeit des Sterns Mira (nach einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2015)

Mira im Sternbild Walfisch liegt etwa 3° unter dem Himmelsäquator. Begründe, dass zum Zeitpunkt einer Kulmination am klaren Nachthimmel von München (geographische Breite 48°) eine Beobachtung von Mira möglich ist.

<u>Lösung</u>:

Für einen Beobachter in München (NHK) beträgt die Äquatorhöhe $h_{\text{Ä}} = 90° - \varphi = 42°$. Wenn Mira zum Zeitpunkt der Kulmination 3° unterhalb des Himmelsäquators steht, ist seine Höhe 39 ° über dem Horizont. Mira ist dann in einer klaren Nacht gut beobachtbar.

Quellen und weiterführende Literatur:

Astronomie und Raumfahrt, Erhard Friedrich Verlag:

<u>Geschichte des Astronomischen Weltbildes</u>:
Heft 1/2006: Astronomische Weltbilder im Unterricht (S. 4 bis 8)
Heft 6/1998: Historische Weltbilder (S. 13 bis 16)
Heft 3_4/2016: Das astronomische Weltbild im Wandel (S. 64 bis 73)
Heft 4/1997: Weltmodelle im Wandel der Zeit (S. 12 bis 13)
Heft 2/1994: Meilensteine der Astronomie (S. 14 bis 19)
Heft 2/2013: Scheibe oder Kugel (S. 31 bis 34)
Heft 3_4/2007: Von Babylon bis Urknall (S. 5 bis 9)
Heft 3_4/2008: Und sie dreht sich doch… Experimente zur Drehung der Erde (S. 6 bis 7)
Heft 3/2010: Die Himmelsscheibe von Nebra (S. 23 bis 26)
Heft 5/2006: Alle Sterne weisen nach Mekka – die arabische Astronomie (S. 39 bis 42)
Heft 2/2013: Alte Astronomie im Islam (S. 22 bis 24)
Heft 3_4/2017: Astronomie im Wittenberger Gelehrtenkreis um Luther und Melanchton (S. 59 bis 63)
Heft 2/2013: Astronomie in der Bibel (S. 7 bis 11)
Heft 3_4/2012: Nicolaus Copernikus – Revolutionär wider Willen (Teil 1) (S. 69 bis 63)
Heft 5/2012: Nicolaus Copernikus – Revolutionär wider Willen (Teil 2) (S. 30 bis 34)
Heft 1/2006: Der Fall Galilei (S. 42 bis 46)
Heft 1/2009: Nicht Kreise, sondern Ellipsen (S. 7 bis 9)
Heft 2/2013: Johannes Kepler – der eigentliche Erneuerer der Astronomie (Teil 1) (S. 35 bis 37)
Heft 3_4/2013: Johannes Kepler – der eigentliche Erneuerer der Astronomie (Teil 2) (S. 19 bis 21)
Heft 5/2013: Johannes Kepler – der eigentliche Erneuerer der Astronomie (Teil 3) (S. 13 bis 16)
Heft 6/2010: Der Stern von Betlehem (S. 32 bis 36)

Astronomische Koordinatensysteme:
Heft 5/2006: Die Himmelslandschaft der Sternbilder (S. 4 bis 8)
Heft 3/2004: Leitlinien – himmlische Pfade für das „wandernde Auge“ (Sternbilder) (S. 4 bis 7)
Heft 6/2012: Vom Umgang mit der drehbaren Sternkarte (S. 11 bis 12)
Heft 3/2002: Wie das copernicanische Weltbild stabilisiert wurde (S. 28 bis 30)
Heft 3_4/2012: Schein und Wirklichkeit (S. 21 bis 24)
Heft 6/2012: Astronomische Koordinatensysteme im Astronomie-Unterricht (S. 13 bis 16)
Heft 4/2005: Astronomische Erscheinungen in hohen geographischen Breiten (S. 41 bis 44)
Heft 3_4/2008: Die Erdachse richtet sich auf (S. 56 bis 57)
Heft 6/2012: Vom Umgang mit der drehbaren Sternkarte (S. 11 bis 12)
Heft 5/2006: Vom Sextanten zum GPS (S. 9 bis 13)

Sonnenbahn:

Kosmos Himmelsjahr:

Kosmos-Himmelsjahr 2018: Wann beginnt der Frühling (Ekliptik) (83 bis 89)

Filme:

Robert Zimmermann: Blick in die Sterne - Die Entdeckung des Universums

Themen für Seminararbeiten und Referate:

- **Die Kopernikanische Revolution**

  → Das geozentrische Weltbild in Antike und Mittelalter

- **Galileo Galilei – Wegbereiter der heutigen Sicht vom Sonnensystem**

  → Die astronomischen Beobachtungen des Galileo Galilei

- **Von den astrometrischen Messgeräten der Antike zur drehbaren Sternkarte und** Computerplanetarien

  → Vorstellung des Computerplanetariums „Stellarium“

II. Licht, Spektroskopie und Teleskope

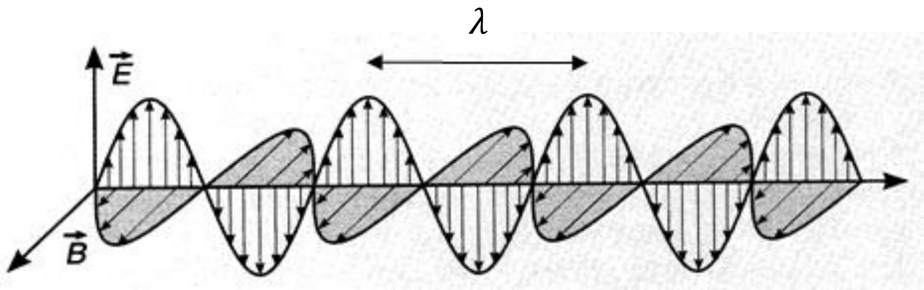
1) Licht - der wichtigste Informationsträger in der Astrophysik

Viele Informationen über kosmische Objekte oder interstellare und intergalaktische Materie im Weltraum finden wir im Licht, das von diesen abgestrahlt oder absorbiert wird.

Doch was ist eigentlich **Licht**?

Licht als elektromagnetische Welle:

Licht ist eine **elektromagnetische Welle**. Zwei aufeinander senkrecht stehende, sinusförmig schwingende elektrische bzw. magnetische Felder breiten sich mit **Lichtgeschwindigkeit** in den Raum aus.



Ausbreitungs-richtung

Wie groß die Lichtgeschwindigkeit ist, hängt vom Medium ab, in dem das Licht sich ausbreitet: je größer die optische Dichte des Mediums ist, desto kleiner ist die Lichtgeschwindigkeit. Im Vakuum breitet sich Licht mit der „**Vakuum-Lichtgeschwindigkeit**“ $\boldsymbol{c \approx 3,0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}}$ aus.

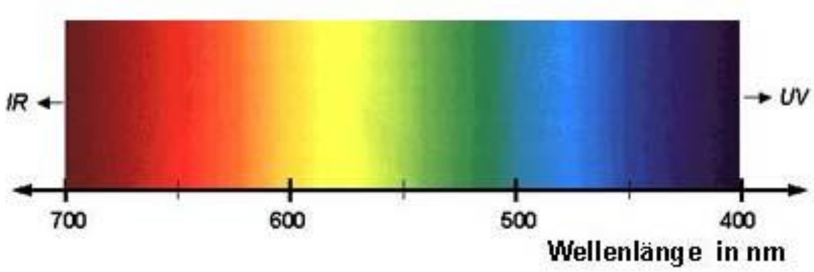
Nach der **Speziellen Relativitätstheorie** von Einstein (vgl. Kap. VIII) können Massen ausschließlich auf Geschwindigkeiten beschleunigt werden, die kleiner als die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit sind.

In Wasser beträgt die Lichtgeschwindigkeit beispielsweise lediglich $2{,}4 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}$.

Beim Übergang von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium können sich schnelle Teilchen demnach mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen.

Als Welle wird Licht charakterisiert durch die **Wellenlänge** $\boldsymbol{\lambda}$. Das ist der Abstand zweier Wellenberge und durch die **Frequenz** $\boldsymbol{f}$, die angibt, wie viele vollständige Schwingungen das elektrische bzw. das magnetische Feld an einer bestimmten Stelle pro Sekunde ausführt. Wellenlänge λ und Frequenz f hängen über $\boldsymbol{c = \lambda \cdot f}$ mit der Lichtgeschwindigkeit zusammen.

Von der Wellenlänge des Lichts hängt es ab, welche Farbe das Licht hat und ob wir das Licht mit dem Auge sehen können. Der **Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts** reicht etwa von $\boldsymbol{\lambda = 400\ nm}$ **(blau) bis** $\boldsymbol{\lambda = 800\ nm}$ **(rot)**. $(1\ nm = 1\ \text{Nanometer} =\ 10^{-9} m)$



Licht als Teilchenstrom:

Bestimmte physikalische Phänomene, wie der Photoeffekt, bei dem durch Bestrahlung mit Licht aus Metallen Elektronen abgelöst werden, lassen sich mit der Vorstellung vom Licht als elektromagnetischer Welle nicht erklären. Deshalb formulierte **Albert Einstein 1905** seine für die Quantenphysik richtungsweisende **Lichtquantenhypothese**:

> Licht verhält sich in bestimmten Situationen wie eine elektromagnetische Welle, in anderen Situationen aber wie ein Teilchenstrom. („**Welle-Teilchen-Dualismus**")
>
> Als „Lichtteilchen" oder „Lichtquant" führte Einstein das **Photon** ein.

Photonen sind **masselos** und bewegen sich grundsätzlich mit **Lichtgeschwindigkeit**.

Als „Lichtteilchen" haben Photonen eine **Wellenlänge $\boldsymbol{\lambda}$**.
Beispielsweise besteht blaues Licht der Wellenlänge $\lambda = 450\ nm$ im Teilchenbild vom Licht aus Photonen mit der Wellenlänge $\lambda = 450\ nm$.

Energie $\boldsymbol{E}$ und **Impuls $\boldsymbol{p}$** eines Photons werden über die Wellenlänge λ definiert:

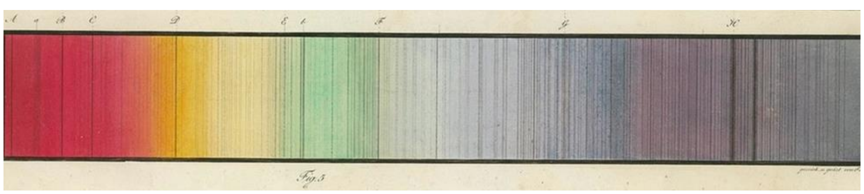
$$\boxed{\boldsymbol{E_\gamma = \frac{h \cdot c}{\lambda}} \quad \text{und} \quad \boldsymbol{p_\gamma = \frac{h}{\lambda}}}$$

Dabei ist $h = 4{,}1357 \cdot 10^{-15}\ eVs$ das Plancksche Wirkungsquantum. *(FS 39)*
Größen, die sich auf Photonen beziehen, bezeichnen wir mit dem Index γ.

2) Spektroskopie

Joseph von Fraunhofer und das Sonnenspektrum:

Der Optiker und Physiker **Joseph von Fraunhofer** (geboren 1787 in Straubing, gestorben 1826 in München) erfand 1814 den **Spektrografen** und entdeckte damit schwarze Linien im kontinuierlichen Sonnenspektrum: die nach ihm benannten **Fraunhoferlinien**.

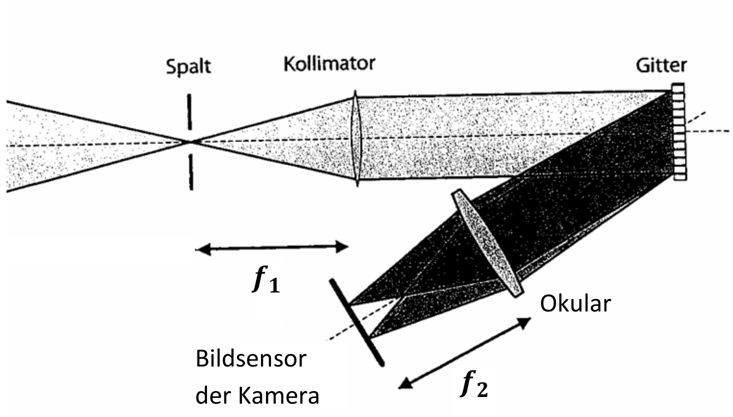


1860 fanden **Gustav Robert Kirchhoff** und **Robert Bunsen** heraus, dass die Fraunhoferlinien den chemischen Elementen in der Sonnenatmosphäre zugeordnet werden können.
Damit wurde die Entdeckung der Fraunhoferlinien zu einer wissenschaftlichen Sensation: Über die **Analyse von Sternspektren** – nicht nur des Sonnenspektrums – ließen sich zahlreiche chemische und physikalische Eigenschaften weit entfernter Himmelskörper herausfinden. Das Spektrum eines Sterns liefert fast alle Informationen über den Stern: Temperatur, Größe, Geschwindigkeit, Entfernung, Masse, ja sogar seinen Entwicklungszustand.
Auch in der **Kosmologie** bildet die Spektroskopie eines der wichtigsten Hilfsmittel, um Informationen über Galaxien und interstellare Gase zu gewinnen. Spektrografen kommen in allen professionellen Observatorien zum Einsatz.

Aufbau und Funktionsweise eines Spektrografen:

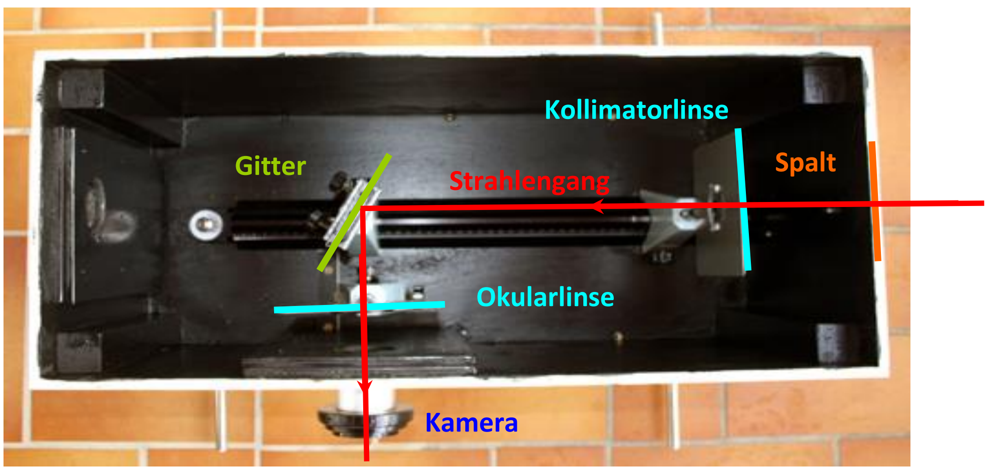
Das **optische Gitter** ist das Kernstück des Spektrografen. Es zerlegt das weiße Sonnenlicht in die Spektralfarben und erzeugt somit das Sonnenspektrum.

Damit die Spektralfarben klar getrennt werden können und sich nicht wieder vermischen, darf man das Gitter nicht mit dem Licht einer flächenhaften Lichtquelle beleuchten, sondern es wird eine punktförmige Lichtquelle oder ein schmaler Lichtstreifen benötigt. Deshalb schneidet man mithilfe eines **Spalts** zuerst einen möglichst schmalen Lichtstreifen aus dem Sonnenlicht aus. Bei der Spektroskopie von Sternen fällt der Spalt weg, da Sterne als punktförmige Lichtquellen betrachtet werden können.



Eine **Sammellinse (Kollimator)** im Abstand ihrer Brennweite f_1 vom Spalt sorgt dafür, dass das vom Spalt ausgehende Licht als paralleles Lichtbündel auf das optische Gitter trifft.
Das **Okular**, eine Sammellinse, die vom Bildsensor ihre Brennweite f_2 als Abstand hat, bildet das Spektrum scharf auf den **Bildsensor der Kamera** ab.

Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des selbst gebauten Spektrografen, den wir verwenden, um Sonnenspektren zu beobachten:



Wirkungsweise eines optischen Gitters:

Grundsätzlich ist ein optisches Gitter eine durchsichtige Fläche mit einer lichtundurchlässigen Beschichtung, in welche in gleichmäßigen Abständen feine Ritzen, sogenannte „**Linien**“ geätzt wurden (**Transmissionsgitter**). Den Abstand zweier benachbarter Linien nennt man **Gitterkonstante b**. Bei einem **Reflexionsgitter** ist die Rückseite des Gitters mit einer reflektierenden Schicht versehen. Das einfallende Licht wird an der Spiegelschicht hinter den lichtdurchlässigen Linien reflektiert.

Bildet man eine punktförmige Lichtquelle oder einen beleuchteten Spalt, durch eine Sammellinse scharf auf einen Schirm ab und bringt man dann ein optisches Gitter in den Strahlengang, so erzeugt das Gitter ein **Beugungsbild**, das aus einem weißen Bild des Spalts in der Mitte und sich links und rechts anschließenden kontinuierlichen Spektren besteht:

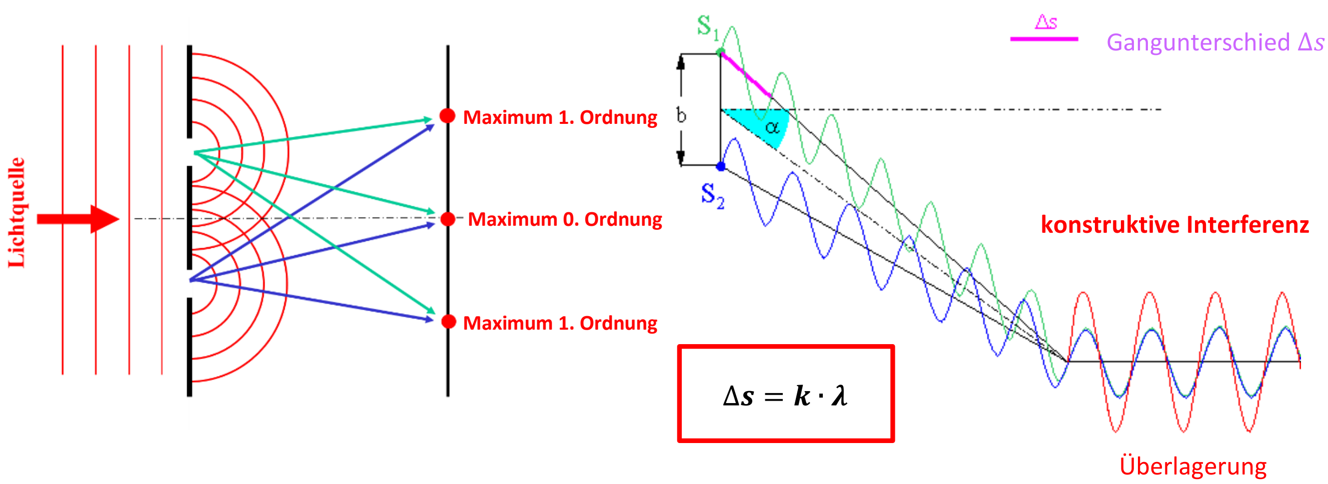
Experiment: Zerlegung des weißen Lichts einer Kohlebogenlampe mithilfe eines Transmissions- und eines Reflexionsgitters in die Spektralfarben.

Warum zerlegt ein optisches Gitter weißes Licht in die Spektralfarben?

Licht ist eine elektromagnetische Welle. Trifft nun Licht auf ein optisches Gitter (von dem in der folgenden Skizze nur zwei Linien gezeichnet sind), so breiten sich von jeder Linie des Gitters Elementarwellen aus. Das heißt, von den Linien des Gitters gehen Lichtwellen in alle Richtungen im Raum hinter dem Gitter. Wenn das Licht als paralleles Lichtbündel auf das Gitter trifft, sind die Elementarwellen hinter dem Gitter an jeder Gitterlinie gleichphasig. Eine Sammellinse, die vom Spalt ihre Brennweite als Abstand hat, erzeugt ein paralleles Lichtbündel.

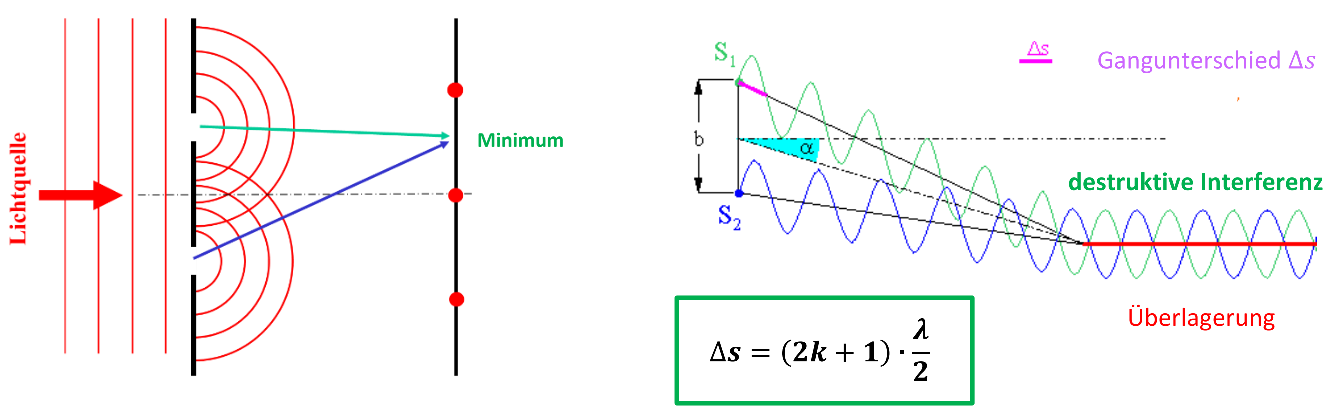
An einem beliebigen Punkt auf dem Schirm treffen Elementarwellen zusammen, die von verschiedenen Linien des Gitters ausgehen und überlagern sich. Diese Überlagerung führt zu einer maximalen Verstärkung der Lichtwelle, wo sich die Elementarwellen gleichphasig überlagern (**konstruktive Interferenz**). Man beobachtet am Schirm ein Helligkeitsmaximum. Wenn sich Lichtwellen gegenphasig überlagern, löschen sie sich gegenseitig aus (**destruktive Interferenz**). Man beobachtet am Schirm ein Helligkeitsminimum, also nichts.
Ob sich zwei Lichtwellen konstruktiv oder destruktiv überlagern, hängt vom Unterschied des Weges ab, den sie von der Linie des Gitters zurücklegen, bis sie am Schirm auftreffen. Dieser Wegunterschied heißt **Gangunterschied** Δs.

Konstruktive Interferenz am Doppelspalt:



$$\Delta s = k \cdot \lambda$$

Destruktive Interferenz am Doppelspalt:



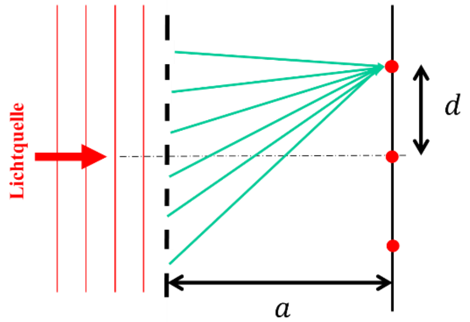
$$\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

konstruktive Interferenz (Maximum) tritt auf, wenn gilt $\Delta s = k \cdot \lambda$
Dabei ist $\boldsymbol{\lambda}$ die **Wellenlänge** des Lichts und $\boldsymbol{k} \geq \mathbf{0}$ eine ganze Zahl welche die **Ordnung des Maximums** angibt.

Wir betrachten nur **Maxima 1. Ordnung**. Für diese gilt: $\Delta s = \lambda$ **(1)**

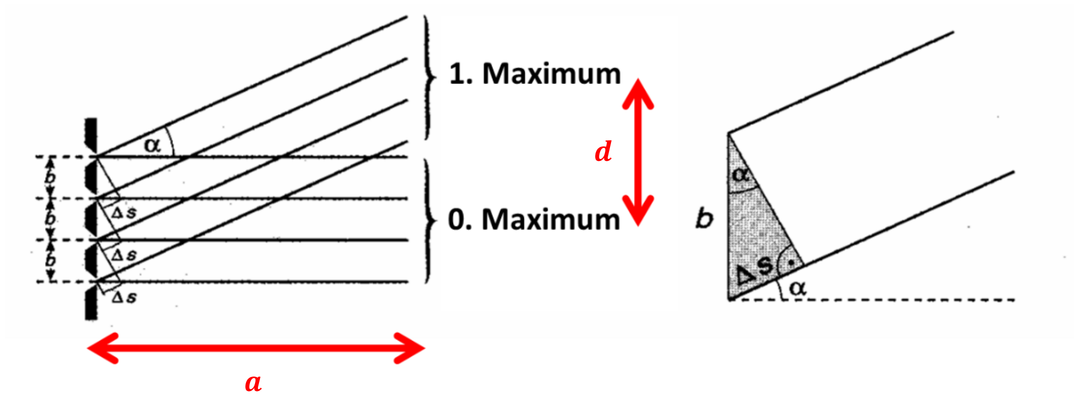
Unter welchem Winkel erscheint das kontinuierliche Spektrum?

Konstruktive Interferenz am optischen Gitter:



Ist der Abstand a des Schirms vom optischen Gitter viel größer als der Abstand d der Interferenzmaxima auf dem Schirm, dann dürfen wir in der Nähe des optischen Gitters näherungsweise von parallelen Lichtwegen ausgehen:

Näherung für $a \gg d$:



Für diese Näherung wird folgender Zusammenhang erkennbar: $|\Delta s| = b \cdot \sin\alpha$ **(2).**
Der Abstand **b** zweier Linien des Gitters heißt auch **Gitterkonstante**.

Setzt man nun die beiden Beziehungen **(1)** $\Delta s = \lambda$ und **(2)** $|\Delta s| = b \cdot \sin\alpha$ gleich, so ergibt sich für den Winkel α, unter dem des Interferenzmaximum 1. Ordnung am Schirm auftritt:

$$\boxed{\boldsymbol{b \cdot sin\alpha = k \cdot \lambda}} \quad \text{bzw.} \quad \boxed{\boldsymbol{sin\alpha = \frac{k}{b} \cdot \lambda}}$$

Man erkennt, dass der **Winkel $\boldsymbol{\alpha}$** von der **Wellenlänge $\boldsymbol{\lambda}$** und damit **von der Farbe des Lichts abhängt**.

Weißes Licht - also auch das Sonnenlicht - ist **Mischlicht aus den Spektralfarben**, deren Wellenlängen näherungsweise in einem Bereich von $\lambda = 400\ nm$ (blau) bis $\lambda = 800\ nm$ (rot) liegen. Die Bestandteile des weißen Lichts werden durch das Gitter je nach Farbe unterschiedlich stark gebeugt. Rotes Licht stärker, blaues Licht weniger stark. Das kontinuierliche Spektrum ist demnach eine Folge von Bildern des Spalts, die je nach Farbe in unterschiedlichen Winkeln von der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung des Lichts auf dem Schirm zu sehen sind.

Experiment: Beugungsbilder eines roten und eines grünen Laserstrahls am selben optischen Gitter

Warum ist das Bild des Spalts in der Mitte des Interferenzbildes weiß?

Es handelt sich um das **Maximum 0. Ordnung**. Alle Lichtwellen haben von der Linie des Gitters bis zu diesem Punkt auf dem Schirm einen gleich langen Weg zurückgelegt. Es ist also $\Delta s = 0$.

Mit $|\Delta s| = b \cdot \sin\alpha$ folgt $b \cdot \sin\alpha = 0$.

Weil die Gitterkonstante b stets größer als 0 ist, folgt somit $\sin\alpha = 0$ und damit $\alpha = 0°$. Und das gilt für alle Wellenlängen λ! Die Spektralfarben treffen im 0. Maximum also alle unter dem gleichen Winkel (0°) auf den Schirm und mischen sich wieder zu weißem Licht.

Entstehung des kontinuierlichen Sonnenspektrums:

Das kontinuierliche Sonnenspektrum im sichtbaren Wellenlängenbereich entsteht in der **Photosphäre**, einer dünnen Schicht im Aufbau der Sonne, die den Übergang zwischen der Sonne selbst und der Sonnenatmosphäre markiert (vgl. Kap. IV, S. 169). In der etwa $5800\ K$ heißen Photosphäre ist noch ein geringer Anteil (etwa 0,01%) der Wasserstoffatome ionisiert. Die Photosphäre enthält also freie Elektronen. Diese werden durch elektromagnetische Wechselwirkung mit anderen negativ geladenen Elektronen und positiv geladenen Ionen beschleunigt und abgebremst. Dabei senden sie sogenannte **Bremsstrahlung** aus (vgl. Kap. IX, S. 524), die, je nachdem, wie groß der Energieverlust ΔE_{kin} beim Abbremsen war, alle Wellenlängen λ mit $0 \leq \left(\Delta E_{kin} = \frac{h \cdot c}{\lambda}\right) \leq E_{max}$ enthält. Allerdings liegen die Wellenlängen dieser Bremsstrahlung nicht im sichtbaren Wellenbereich, sondern es handelt sich um energieärmere Infrarotstrahlung. Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich entsteht in der Photosphäre durch einen Vorgang, der zusätzliche Energie freisetzt: **Freie Elektronen lagern sich vorübergehend an Wasserstoffatome an.** Es entsteht ein negatives Wasserstoffion mit zwei Elektronen, das nach kurzer Zeit wieder zerfällt. Bei diesen Anlagerungsvorgängen wird jeweils eine Energie von $0{,}75\ eV$ frei. Die Gesamtenergie der in der Photosphäre erzeugten Strahlung setzt sich zu $E_{ges} = 0{,}75\ eV + \Delta E_{kin} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ zusammen. Die Wellenlängen λ der Strahlung liegen im sichtbaren Wellenlängenbereich und sind wegen der kontinuierlichen Verteilung von ΔE_{kin} ebenfalls kontinuierlich verteilt.

Entstehung von Absorptionslinien:

Das Sonnenspektrum ist ein kontinuierliches Spektrum mit schwarzen Linien, den Fraunhoferlinien.

Joseph Fraunhofer registrierte 1814 insgesamt 576 schwarze Linien. Heute sind etwa $25\ 000$ dieser Linien im Sonnenspektrum bekannt.

Die **Fraunhoferlinien sind Absorptionslinien**. Sie entstehen in der **Photosphäre** der Sonne. Das ist die Schicht, die manchmal als „Oberfläche", manchmal aber auch als innerste Atmosphäre der Sonne bezeichnet wird. Aus der Photosphäre kommt die sichtbare Sonnenstrahlung zu uns. Die Atome der Photosphäre absorbieren aus dem in der tieferen Photosphäre erzeugten Strahlungskontinuum Licht mit den für die entsprechenden Atome charakteristischen Wellenlängen, was für den Beobachter auf der Erde zu Lücken, also dunklen Linien im kontinuierlichen Sonnenspektrum führt.

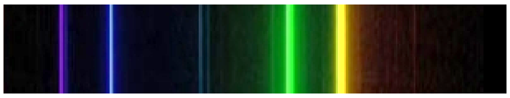
Die Fraunhoferlinien liefern **Informationen über die in der Sonnenatmosphäre vorkommenden chemischen Elemente**.

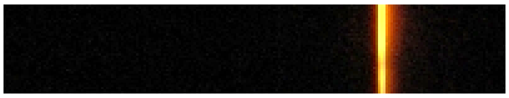
Versuche zur Entstehung von Absorptionsspektren:

Experiment 1: Emissionsspektren von Hg- und Na-Dampflampe

Schickt man das von einem heißen Gas ausgesandte Licht durch ein optisches Gitter, so entsteht ein **Emissions-Linienspektrum**.

Linienspektren sind charakteristisch für die Atome die das Licht aussenden.





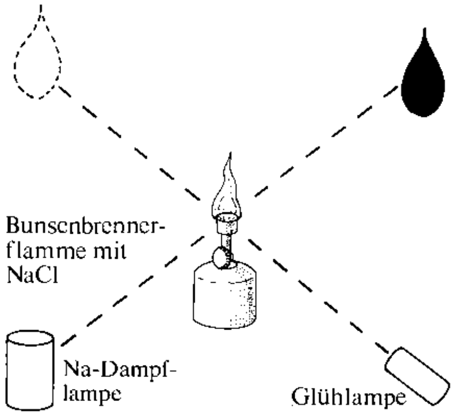
Links ist das Emissions-Linienspektrum einer Quecksilberdampflampe, rechts das Emissionslinienspektrum einer Natriumdampflampe zu sehen.

Die Emissionslinien im Spektrum der Quecksilberdampflampe haben die Wellenlängen $404,7\ nm$, $435{,}8\ nm$, $491{,}6\ nm$, $546{,}1\ nm$ und $579{,}0\ nm$.

Die Natriumlinie liegt bei geringer Auflösung bei $589\ nm$. Bei höherer Auflösung erkennt man, dass es sich tatsächlich um eine Doppellinie mit den Wellenlängen $588{,}995\ nm$ (Natrium D_2-Linie) und $589{,}592\ nm$ (Natrium D_1-Linie) handelt (Vgl. S. 42).

Experiment 2: Absorption des Lichtes einer Natriumdampflampe durch die Natriumatome in einer Bunsenbrennerflamme

Eine Bunsenbrennerflamme wird mit dem Licht einer Glühlampe und mit dem Licht einer Natriumdampflampe beleuchtet. Zwischenzeitlich wird Kochsalz (NaCl) in die Flamme gestreut. Wir beobachten die Schatten der Flamme.

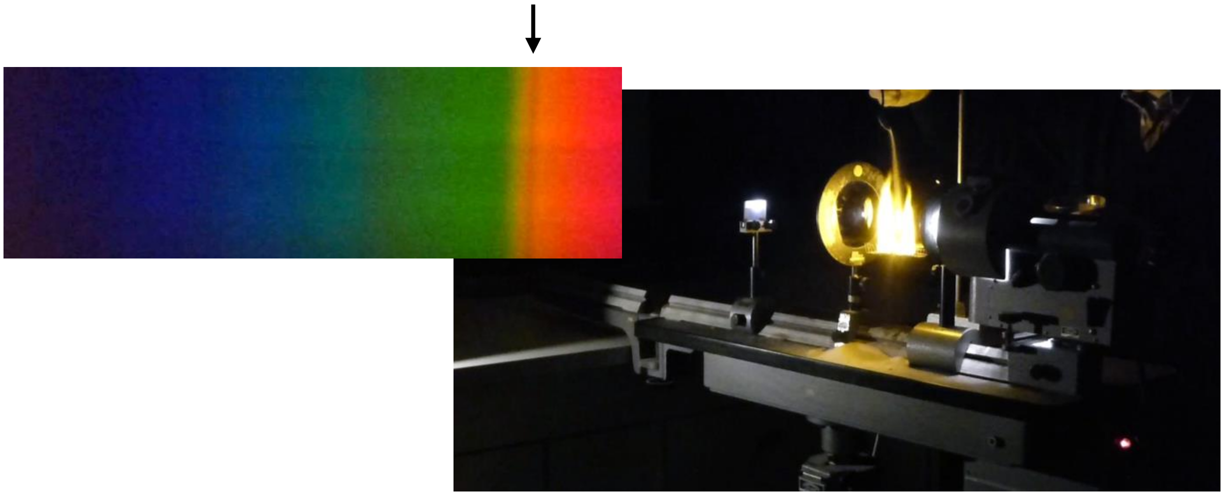


Ergebnis: Der transparente Schatten der Flamme verändert sich bei Beleuchtung mit Glühlicht kaum, wenn Salz eingestreut wird. Der von der Natriumdampflampe erzeugte Schatten wird dunkel.

Deutung: Die Natriumatome des Kochsalzes in der Bunsenbrennerflamme absorbieren genau das Licht, das von der Natriumdampflampe ausgesandt wird. Beim Durchgang durch die Flamme wird das Licht der Glühlampe daher nicht merklich geschwächt. Das Licht der Natriumdampflampe wird fast vollständig absorbiert. (**Resonanzabsorption**)

Experiment 3: Demonstration der orangen Natriumlinie als Absorptionslinie

Im Versuchsaufbau zur Erzeugung des kontinuierlichen Spektrums einer Kohlebogenlampe wird (zwischen Spalt und Linse) eine Flammenstrecke aus brennenden Trockenspiritusstücken gebracht. In die Flamme streut man Kochsalz.



Ergebnis: An der Stelle, bei der im Emissionsspektrum einer Natriumdampflampe die orange Natriumlinie auftaucht, erscheint im kontinuierlichen Spektrum eine dunkle **Absorptionslinie**.

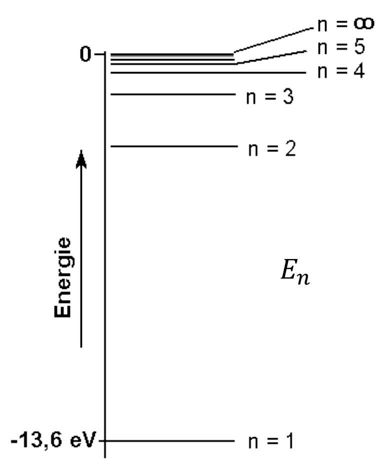
Deutung: Dieser Versuch erbringt den Nachweis, dass von den Natriumatomen genau das Licht absorbiert wird, welches sie emittieren.

Deutung von Absorptionsspektren im Energieniveauschema:

Eine grundlegende quantenphysikalische Eigenschaft von Atomen ist die **Quantelung ihrer Energie**.

Atome können nur bestimmte, „diskrete“ Energien haben. Man spricht von **Energieniveaus**.

Weil Wasserstoff das bei weitem häufigste chemische Element in der Sonnenatmosphäre und im Universum überhaupt ist, betrachten wir das **Energieniveauschema** des Wasserstoffatoms (Abbildung rechts).



Das niedrigste Energieniveau $\boldsymbol{E_1}$ bezeichnet man als energetischen **Grundzustand** des Atoms. Atome können durch Stöße bei der Kollision mit energiereichen Teilchen, durch hohe Temperaturen oder durch Bestrahlung mit Licht vom Grundzustand oder auch von einem anderen Energieniveau aus in ein höheres Energieniveau angeregt werden. Deshalb nennt man die Energieniveaus $\boldsymbol{E_n}$ **mit** $\boldsymbol{n > 1}$ auch „**angeregte energetische Zustände**“ des Atoms.

Bei der **Anregung eines Atoms** muss die zugeführte Energie genau der Energiedifferenz ΔE zwischen dem momentanen und einem höheren (nicht unbedingt benachbarten) Energieniveau entsprechen. Wird ein passender Energiebetrag auf das Atom übertragen, so springt das Atom auf ein höheres Energieniveau.

Beim darauf erfolgenden **Rücksprung** (direkt oder indirekt über Zwischenschritte) gibt das Atom die Energiedifferenz zwischen den Energieniveaus in Form von Licht bzw. eines Photons der Energie $E_\gamma = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ wieder ab.

Ist ΔE die Energiedifferenz zwischen zwei Energieniveaus,
so gilt für die **Wellenlänge $\boldsymbol{\lambda}$ des absorbierten bzw. emittierten Lichts**:

$$\boxed{\boldsymbol{\Delta E = h \cdot \frac{c}{\lambda}}}$$

Absorptionslinien im Spektrum des Sonnenlichts entstehen durch Anregung von Atomen in der Sonnenatmosphäre. Um die Lichtabsorption verstehen zu können, greifen wir auf die Vorstellung vom Licht als Photonenstrom zurück: Ein **Photon** der Energie $E_\gamma = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ wird beim Anregungsvorgang vom Atom absorbiert. Beim Rücksprung emittiert das Atom wieder ein Photon. Die Emission von Photonen in einem Gas mit vielen angeregten Atomen erfolgt allerdings gleichmäßig in alle Richtungen.

Nur ganz bestimmte, für das chemische Element charakteristische Energiebeträge können absorbiert bzw. emittiert werden. Deshalb kann nur Licht mit für das chemische Element charakteristischen Wellenlängen bzw. Farben von Atomen dieses Elements absorbiert bzw. emittiert werden. Die den chemischen Elementen zugeordneten Absorptions- und Emissionsspektren sind somit **Linienspektren**.

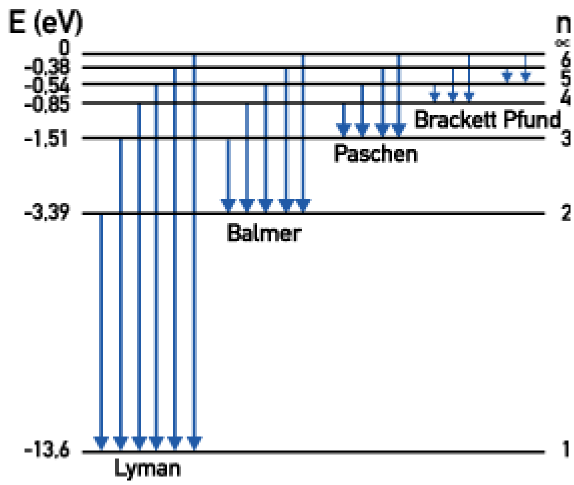
Die **Emissionslinien**, welche beim Rücksprung auf eine gemeinsame Energiestufe entstehen, werden zu **Serien** zusammengefasst:

Lymanserie: Rücksprung in den Grundzustand $(n = 1)$

Balmerserie: Rücksprung in den ersten angeregten Zustand $(n = 2)$

Paschenserie: Rücksprung in den zweiten angeregten Zustand $(n = 3)$

usw. …



Im sichtbaren Bereich liegen 4 Wasserstofflinien der Balmerserie:

$\boldsymbol{H_\alpha}$**-Linie**:	$\lambda_\alpha \approx 656{,}3\ nm$	(rot)	
$\boldsymbol{H_\beta}$**-Linie**:	$\lambda_\beta \approx 486{,}1\ nm$	(grünblau)	
$\boldsymbol{H_\gamma}$**-Linie**:	$\lambda_\gamma \approx 434{,}1\ nm$	(blau)	
$\boldsymbol{H_\delta}$**-Linie**:	$\lambda_\delta \approx 410{,}2\ nm$	(violett)	(gerundete Werte)

Diese Linien treten im sichtbaren Sonnenspektrum als **Absorptionslinien**, also als **Fraunhoferlinien** auf. Die H_α-Linie entsteht beispielsweise als Fraunhoferlinie, wenn Wasserstoffatome, die sich im ersten angeregten Zustand befinden, durch das aus der unteren Photosphäre kommende Licht in den zweiten Anregungszustand gehoben werden. Dabei werden Photonen mit der Wellenlänge $\lambda_\alpha = 656{,}3\ nm$ absorbiert. Im kontinuierlichen Spektrum des Sonnenlichts tritt folglich eine Lücke bei der Wellenlänge $\lambda_\alpha = 656{,}3\ nm$ auf.

Bei „normalen“ Temperaturen sind angeregte Zustände instabil. Das heißt: Atome in einem angeregten Zustand springen grundsätzlich unter Emission entsprechender Strahlung in den Grundzustand zurück. Die Atome können damit auch nur vom Grundzustand aus angeregt werden, wobei nur Linien der Lymanserie erzeugt werden.

Die ausgeprägten **Balmerlinien** $\boldsymbol{H_\alpha}$**,** $\boldsymbol{H_\beta}$**,** $\boldsymbol{H_\gamma}$ und $\boldsymbol{H_\delta}$ im Sonnenspektrum können somit **nicht durch Absorption in der Erdatmosphäre** entstanden sein, sondern nur in der heißen Sonnenatmosphäre, wo **stabile Wasserstoffatome im ersten angeregten Zustand** vorkommen.

Praktische Übungen zur Spektroskopie:

Experiment:

Bau eines **Handspektroskops** und Beobachtung von Fraunhoferlinien im Sonnenspektrum und von Quecksilber-Emissionslinien im Spektrum einer Leuchtstoffröhre.

Im Rahmen einer Teilnahme beim Wettbewerb „Jugend forscht“ entwickelten wir 2010 einen **Spektrografen**, der als optisches Reflexionsgitter Ausschnitte aus CDs bzw. DVDs verwendet. Mit dem Gerät können über eine Digitalkamera Emissionsspektren von Gaslampen und Sonnenspektren aufgenommen und direkt am Laptop sichtbar gemacht werden.

Bau von Reflexionsgittern:

CDs und **DVDs** bestehen aus einer durchsichtigen Polycarbonatscheibe, die einseitig mit einer reflektierenden Schicht versehen sind. In die durchsichtige Scheibe ist eine spiralförmig angeordnete Rillenstruktur gepresst, die beim Lesen einer Fotodiode als Spur dient. Diese **Rillenstruktur** ermöglicht die Verwendung von CD und DVD als **optische Reflexionsgitter**.

Um die hohe Speicherkapazität als Datenträger zu erreichen, ist eine sehr hohe Spurdichte der Rillen notwendig. Der **Spurabstand** beträgt bei einer **CD** $\mathbf{1,6\ \mu m}$, bei einer **DVD** $\mathbf{0,74\ \mu m}$. Eine CD hat also ca. 630 Rillen pro mm, eine DVD 1350 Rillen pro mm. Der Spurabstand wirkt bei der Verwendung der CD bzw. DVD als optisches Gitter als **Gitterkonstante** $\boldsymbol{b}$.

Wir schneiden passende Rechtecke aus CDs und DVDs und rahmen sie mit Diarähmchen

Beobachtung von Emissionsspektren:

Einfacher als die Erzeugung von Sonnenspektren ist die Beobachtung von Emissionsspektren von Dampflampen mit Hilfe des Spektrografen. Wir beleuchten dazu den Spalt des Spektrographen mithilfe einer Hg-, einer He- und einer Na-Dampflampe.

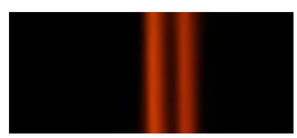
Beobachtung der Natrium-Doppellinie:

Die orange Natrium-Linie besteht tatsächlich aus zwei eng beieinanderliegenden Linien, deren Wellenlängen-Abstand nur etwa 0,6 nm beträgt. ($\lambda_1 \approx 588{,}995\ nm$ und $\lambda_2 \approx 589{,}592\ nm$)

(Zur Entstehung der Natrium-Doppellinie: vgl. Kapitel IX, S. 484)

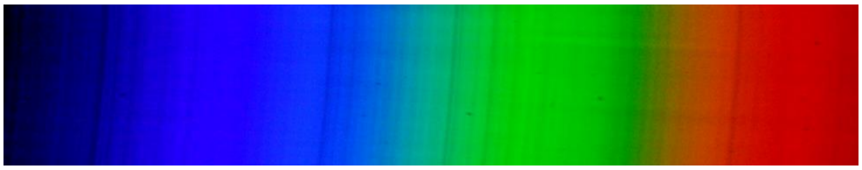
Die Trennung der Na-Doppellinie ist ein entscheidendes Kriterium für das Auflösungsvermögen unseres Spektrografen.

Die beiden Aufnahmen zeigen die Na-Doppel-linie sowohl im Emissionsspektrum einer Na-Dampflampe als auch im Sonnenspektrum. Als Reflexionsgitter wurde für diese Aufnahmen eine DVD verwendet.

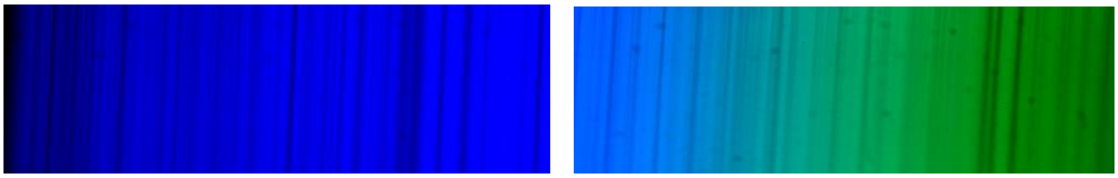


Aufnahme von Sonnenspektren:

Mit einem **CD-Gitter** aufgenommenes Sonnenspektrum:



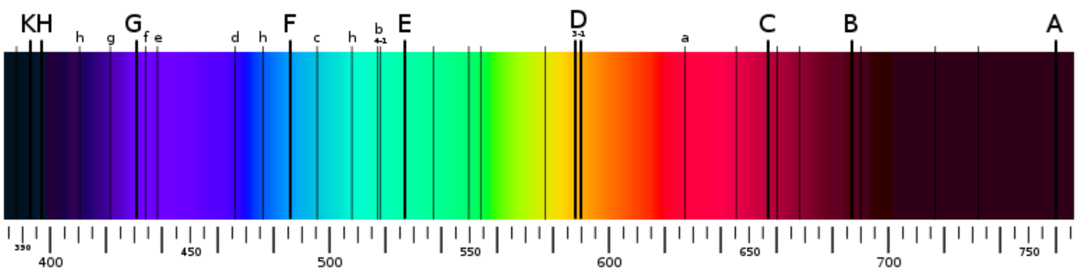
Mit einem **DVD-Gitter** aufgenommene Ausschnitte aus dem Sonnenspektrum:



In beiden Spektren sind die Fraunhoferlinien gut sichtbar. Deutlich zu erkennen ist aber auch die wesentlich höhere Auflösung des DVD-Gitters.

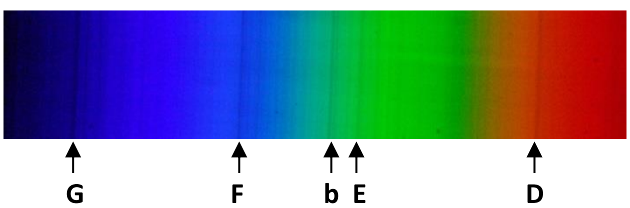
Identifizierung von Fraunhoferlinien:

Joseph von Fraunhofer kannte den Zusammenhang zwischen den von ihm beobachteten Linien und der chemischen Zusammensetzung der Sonnenatmosphäre noch nicht. Er bezeichnete die auffälligsten Linien mit Groß- und Kleinbuchstaben. In seiner Bezeichnungsweise stehen **C** für die $\boldsymbol{H_\alpha}$**-Linie**, **F** für die $\boldsymbol{H_\beta}$**-Linie**, **G** für die $\boldsymbol{H_\gamma}$**-Linie** und **h** für die $\boldsymbol{H_\delta}$**-Linie**.



Wellenlänge in nm

Eine grobe Analyse der fotografierten Spektren liefert der Vergleich mit obiger Grafik:



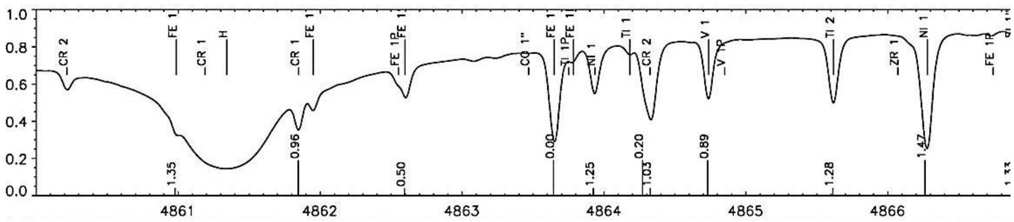
Mit Tabellen lassen sich die beobachteten Linien den chemischen Elementen in der Sonnenatmosphäre zuordnen, die sie erzeugt haben.

Im CD-Spektrum sind besonders deutlich eine Linie (G) zu sehen, die aus der H_γ-Linie, einer Ca-Linie und einer Fe-Linie besteht, die bei dieser Auflösung nicht getrennt wahrnehmbar sind. Weiter sieht man die H_β-Linie (F), eine Linie (b), die aus nicht getrennt wahrnehmbaren Linien der Elemente Mg und Fe besteht, eine Fe-Linie (E) und die Linie D, zu der die Na-Doppellinie und eine He-Linie beitragen.

Im DVD-Spektrum sind noch viele weitere Linien zu erkennen, zu deren Identifizierung einfache Tabellen nicht ausreichen.

Unter http://bass2000.obspm.fr/download/solar_spect.pdf kann man sich eine detaillierte Schwärzungskurve des Sonnenspektrums herunterladen. Das **BASS 2000-Spektrum** zeigt nicht nur die Intensitätsverteilung, sondern es wird bei den einzelnen Linien auch angegeben, welchem chemischen Element sie zuzuordnen sind.

Die Abbildung unten zeigt einen Ausschnitt aus dem BASS 2000-Spektrum, in dem bei $\lambda = 486{,}13\ nm$ die H_α-Linie als breiter „Peak" hoher Intensität zu erkennen ist.



3) Optische Teleskope

Spiegelteleskope

Wir befassen uns zuerst mit Teleskopen, die Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich beobachten. Diese nennt man **optische Teleskope**.

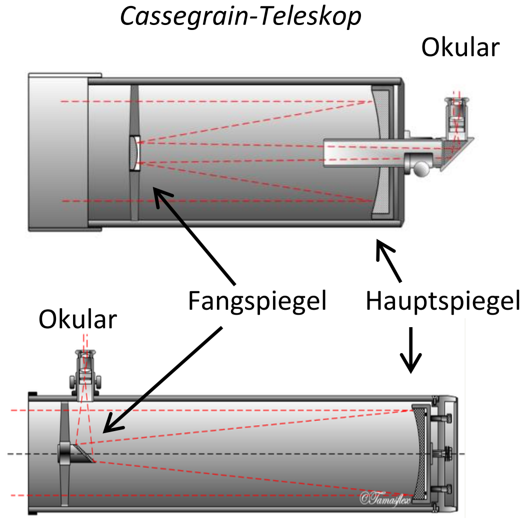
Während vom 17. bis Ende des 19. Jahrhunderts mit **Linsenteleskopen**, sogenannten Refraktoren, beobachtet wurde, kommen in der modernen Astronomie praktisch nur noch **Spiegelteleskope** oder Reflektoren zum Einsatz.

Strahlengang im Teleskop:

Im Spiegelteleskop trifft das einfallende Licht zuerst auf einen parabolisch oder hyperbolisch geschliffenen **Hauptspiegel**, der das von einem weit entfernten Objekt stammende und deshalb parallele Lichtbündel reflektiert und bündelt. Anschließend trifft das Licht auf einen kleineren **Fangspiegel**, der das Licht zum **Okular** schickt.

Bei den Spiegelteleskopen gibt es unterschiedliche Konstruktionstypen. Die beiden wichtigsten sind das **Cassegrain-Teleskop** (oben) und das **Newton-Teleskop** (unten).
Beim Cassegrain-Teleskop ist der Fangspiegel ebenfalls gekrümmt. Er weitet das Lichtbündel etwas auf und sorgt so für eine zusätzliche Verlängerung der Brennweite. Vom Fangspiegel wird das Licht durch ein Loch im Hauptspiegel zum Okular reflektiert. Beim Newton-Teleskop lenkt ein ebener Fangspiegel das Lichtbündel seitlich aus dem Teleskoptubus aus.

Cassegrain-Teleskop



Newton-Teleskop

Den Teil des Spiegelteleskops, der aus Haupt- und Fangspiegel besteht, bezeichnen wir als **Objektiv**.

Die **Brennweite des Objektivs** ist der Weg des Lichtbündels vom Hauptspiegel bis zum Schnittpunkt der Lichtstrahlen, der in der Regel außerhalb des Teleskoptubus liegt (vgl. Skizzen oben!). Weil das Lichtbündel im Spiegelteleskop mehrmals hin und her läuft, zeichnen sich Spiegelteleskope durch eine bei kompakter Bauweise große Objektiv-Brennweite aus.

Die Vergrößerung eines Teleskops:

Die Objektiv-Brennweite f_{Ob} bestimmt zusammen mit der frei wählbaren Brennweite f_{Ok} des **Okulars** die Vergrößerung des Teleskops.

Für die **Vergrößerung** eines Teleskops gilt:

$$\boxed{V = \frac{f_{Ob}}{f_{Ok}}}$$

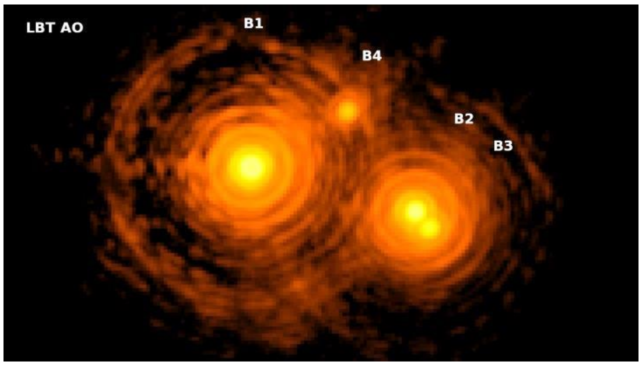
Die Vergrößerung, die man mit einem Teleskop erzielen kann, nimmt also mit der Brennweite des Objektivs zu, lässt sich aber durch die Wahl der Brennweite des Okulars steuern.

Im Amateurbereich betrachtet der Beobachter das vom Teleskop erzeugte Bild mit dem Auge, indem er ins Okular blickt. Die Bilder professioneller Teleskope werden in der Regel mit **CCD-Detektoren** aufgefangen und am Computer betrachtet bzw. weiterverarbeitet.

Experiment: Mit Linsen und Wölbspiegeln wird der prinzipielle Strahlengang bei Linsen- und Spiegelteleskopen an der optischen Wand demonstriert. Als Lichtquelle dient ein Laser, der mehrere parallele Lichtstrahlen erzeugt.

Das Auflösungsvermögen eines Teleskops:

Das **Auflösungsvermögen** und damit die erreichbare Bildschärfe eines Teleskops werden entscheidend von der Größe der Objektivöffnung und damit von der Größe des Hauptspiegels bestimmt.
Ein Teleskop bildet eine punktförmige Lichtquelle nie als Punkt ab, sondern als **Beugungsscheibchen**, das zusätzlich von Interferenzringen umgeben ist. Das Beugungsscheibchen ist umso größer, je kleiner die Objektivöffnung des Teleskops ist.
Im Bild nahe beieinanderliegende Sterne können nicht mehr getrennt wahrgenommen werden, wenn ihre Beugungsscheibchen überlappen.



Experiment: Beugung eines Laserstrahls an einem Einfachspalt abnehmender Breite. **Beugungsringe** beobachtet man, wenn man den Laserstrahl durch das mit einer Stecknadelspitze erzeugte Löchlein in einem in einem Diarähmchen aufgespannten Stück Alufolie schickt.

Das Lichtsammelleistung L eines Teleskops:

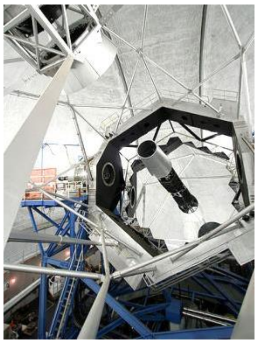
Weil das einfallende Licht auf die Spiegelfläche trifft, folgt für die **Lichtsammelleistung L**, wenn D der Spiegeldurchmesser ist:

$$\boxed{L \sim D^2}$$

Ein großer Hauptspiegel erhöht die Lichtsammelleistung L eines Teleskops, da auf eine größere Spiegelfläche mehr Licht vom beobachteten Objekt fällt.

Die Lichtsammelleistung ist gerade in der Kosmologie sehr wichtig, weil hier Objekte beobachtet werden, von denen aufgrund ihrer sehr großen Entfernung nur sehr wenig Licht auf der Erde ankommt.

Zu den **wichtigsten Anforderungen an ein Teleskop** gehört es, **möglichst helle und scharfe Bilder** von den beobachteten Objekten zu erzeugen. Beides wird durch **große Hauptspiegel** begünstigt. Die größten Teleskopspiegel sind zurzeit im Keck-Observatorium auf Hawaii im Einsatz; sie haben einen Durchmesser von $10{,}4\ m$. (Bild rechts)



- Vergleichen wir die Lichtsammelleistung unseres Schulteleskops ($D = 20\ cm$) mit der des Keck-Teleskops ($D = 10{,}4\ m$), so erhalten wir für das Keck-Teleskop eine um den Faktor $270\,400$ höhere Lichtsammelleistung!

Das Bestreben, Auflösungsvermögen und Lichtsammelleistung neuer Teleskope immer weiter zu verbessern, führte zum Ende der Tradition der Linsenteleskope: Linsen mit mehreren Metern Durchmesser führen zu unlösbaren mechanischen Problemen: Die Linse wird schwer und in sich instabil. Große Spiegel lassen sich leichter montieren, da sie von der Rückseite her unterstützt werden können.

Störfaktoren beim Beobachten mit erdgebundenen Teleskopen:

Die theoretische Leistungsfähigkeit eines Teleskops wird durch die von der **Erdatmosphäre** vorgegebenen Beobachtungsbedingungen, dem sogenannten „**Seeing**“, eingeschränkt. Staub und Wasserdampf in der Luft streuen und absorbieren Licht von Beobachtungsobjekten.

Warme Luft steigt in Schlieren vom Erdboden in den kühleren Nachthimmel auf. Weil warme Luft Licht anders bricht als kalte Luft, ändert sich ständig die Ausbreitungsrichtung des Lichts. Für den Beobachter auf der Erde führt dies zu scheinbaren geringfügigen Ortsveränderungen des Objekts und damit zu einer Unschärfe. Das bekannte „Flackern“ horizontnaher Sterne ist auf dasselbe Phänomen zurückzuführen.

Großteleskope korrigieren Schwankungen im Seeing durch **adaptive Optiken**:

Die aktuelle Bildqualität wird mithilfe eines **künstlichen Laserleisterns** gemessen. Dieser Laserstern ist ein Lichtfleck, der entsteht, wenn Natrium-Atome in etwa $90\ km$ Höhe über dem Teleskop durch einen orangen Laserstrahl zum Leuchten angeregt werden. Mithilfe eines Feldes von Detektoren wird am Ort des Spiegels gemessen, welche optische Qualität das beobachtete Bild des Laserleitsterns gerade hat.

Der dünne und leicht **verformbare Hauptspiegel** wird auf vielen Stempeln gelagert, über die seine Form sehr rasch verändert werden kann. Dadurch werden Schwankungen im Seeing in Echtzeit ausgeglichen.

Ein weiteres Problem bei astronomischen Beobachtungen ist die **Lichtverschmutzung** des Nachthimmels in der Nähe von Städten. Das Streulicht künstlicher Lichtquellen führt dazu, dass sich lichtschwache Beobachtungsobjekte kaum vom erhellten Hintergrund abheben.

Um Störeffekte durch Streulicht und atmosphärische Luftunruhe möglichst gering zu halten, werden Großteleskope häufig in kaum besiedelten Gebieten und in großer Höhe gebaut. Das Keck-Observatorium befindet sich zum Beispiel auf dem 4200 m hohen Mauna Kea auf Hawaii.

Die effektivste, aber auch teurere Möglichkeit, unabhängig von der atmosphärischen Luftunruhe zu beobachten, ist die Beobachtung außerhalb der Erdatmosphäre mit Satellitenteleskopen, wie dem **Hubble-Space-Telescope**.

Das Very Large Telescope (VLT):

Das derzeit bedeutendste erdgebundene optische Teleskop ist das **VLT (Very Large Telescope)** der ESO (European Space Organisation) auf dem $2635\ m$ hohen Cero Paranal in der chilenischen Atacama-Wüste. Das VLT besteht aus **vier Spiegelteleskopen** und vier kleineren 1,8 m-Teleskopen. Die 23 Tonnen schweren Hauptspiegel mit $8{,}2\ m$ Durchmesser ruhen auf jeweils 150 Stempeln, über die die Spiegelform computergesteuert an die über einen Laserleistern errechneten Beobachtungsbedingungen angepasst werden kann (**adaptive Optik**). Durch den Zusammenschluss der vier Teleskope zu einem „**Interferometer**" wird ein Auflösungsvermögen erzielt, das einem Teleskop mit einem 16 m-Spiegel entspricht. Das VLT ist seit 1999 in Betrieb.

Die Teleskope des VLT eignen sich für Beobachtungen in den **Wellenlängenbereichen vom nahen UV über das sichtbare Licht bis hin zum mittleren Infrarot**. Außerdem wird am VLT hochauflösende **Spektroskopie** betrieben.

Forschungsschwerpunkte:

- Beobachtung weit entfernter Galaxien,
- Suche nach Exoplaneten,
- Erforschung von kosmischen Phänomenen mit hoher zeitlicher Frequenz, wie sie bei Pulsaren und Schwarzen Löchern auftreten und
- Supernovaforschung.

Das Bild zeigt eine VLT-Aufnahme des $15000\ Lj$ entfernten „**Thors Helm-Nebels**" im Sternbild Großer Hund.

Weitere wichtige moderne Teleskope sind des **Keck-Observatorium**, das **GTC (Gran Telescopio Canarias)** auf La Palma (jeweils 10,4 m-Siegel) und das **LBT (Large Binocular Telescope)** (zwei 8,4 m-Spiegel).

Großteleskope für die Zukunft:

E-ELT (European Extremely Large Telescope):

- Standort: Cero Armazones, Atacama-Wüste in Chile
- Der 39 m-Hauptspiegel wird aus 798 sechseckigen Spiegelelementen zusammengesetzt sein.
- Mit dem Bau des Teleskops wurde im Juni 2014 begonnen.

GMT (Giant Magellan Telescope):

- Standort: Las Campanas, Chile
- 7 Hauptspiegel mit 8,4 m Durchmesser
- genehmigt 2009, Fertigstellung voraussichtlich 2022

TMT (Thirty Meter Telescope):

- Standort: Mauna Kea, Hawaii
- Der 30m-Hauptspiegel wird aus 492 Segmenten zusammengesetzt.
- Baubeginn Oktober 2014, Fertigstellung voraussichtlich 2022

Unser Schulteleskop:

In unserem Kosmologie-Kurs beobachten wir mit einem **CELESTRON Nexstar 8 Teleskop**, einem computergesteuerten Cassegrain-Spiegelteleskop mit 20 cm-Spiegel-Durchmesser und mit dem 60 cm-Spiegelteleskop der **Allgäuer Volkssternwarte in Ottobeuren**.

Die Allgäuer Volkssternwarte in Ottobeuren:

Die Allgäuer Volkssternwarte (AVSO) in Ottobeuren verfügt mit ihrem **60-cm-Spiegelteleskop** über eines der leistungsfähigsten Teleskope in Deutschland.

Mit Vorträgen und Führungen leistet die AVSO einen wichtigen Beitrag zur astronomischen Bildung in der Öffentlichkeit.

An den Teleskopen der AVSO, zu denen auch ein Sonnenteleskop mit H_α-Filter gehört, können interessierte Besucher unter Anleitung selbst beobachten.

Beeindruckende Ergebnisse werden an der AVSO insbesondere im Bereich der Astrofotografie erzielt. Das Bild zeigt ein an der AVSO aufgenommenes Foto von unserer Nachbargalaxie, der Andromeda-Galaxie.

2011 wurde an der Allgäuer Volkssternwarte in Ottobeuren von der ESO ein Laserleitstern für das Paranal-Observatorium in Chile getestet.

Das Observatorium der LMU München auf dem Wendelstein:

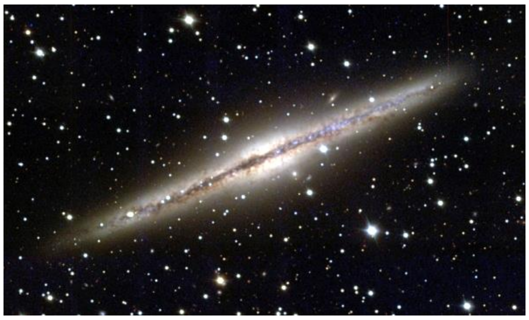
Auf dem 1838 m hohen Wendelstein im oberbayerischen Inntal betreibt die Ludwig-Maximilians-Universität München ein Observatorium mit drei Teleskopen.

Der Wendelstein zeichnet sich vor allem durch sein ausgezeichnetes Seeing aus, das mit dem der besten Teleskopstandorte weltweit vergleichbar ist.

Das größte Teleskop auf dem Wendelstein ist das 2011 installierte **Fraunhofer-Teleskop** mit einem **Spiegeldurchmesser von 2 Metern**. Zu diesem Teleskop gehören eine Weitwinkelkamera und ein leistungsfähiges Spektroskop. Das Fraunhofer-Teleskop befindet sich momentan noch in der abschließenden Erprobungsphase, liefert aber bereits wissenschaftliche Ergebnisse.

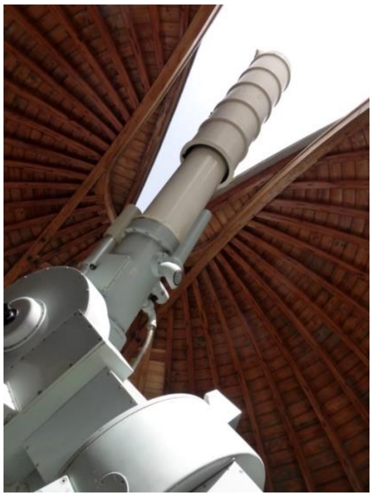
Beobachtungsaufgaben sind unter anderem

- Beobachtung von Exoplaneten unter Ausnutzung des Mikrolensing-Effekts (Vgl. Kapitel V, S. 256)
- Gravitationslinsenabbildung von Quasaren (Vgl. Kapitel VIII, S. 448)
- Spektroskopie von Galaxien
- Langzeitbeobachtung masseaustauschender Doppelsternsysteme



Mit dem Fraunhofer-Teleskop wurde auch das Foto von der 90 Millionen LJ entfernten Galaxie NGC 891 im Sternbild Andromeda aufgenommen.

Ein insbesondere unter historischen Gesichtspunkten interessantes Teleskop ist der **Sonnenkoronograph** des Wendelsteinobservatoriums, mit dem Besucher Protuberanzen der Sonne beobachten können. Durch Einsetzen von Kegelblenden kann eine Sonnenfinsternis simuliert werden. Unter günstigen Bedingungen wird es so möglich, die Sonnenatmosphäre zu beobachten.



Das Bild links zeigt eine mit dem Sonnenkoronographen auf dem Wendelstein aufgenommene Sonnenprotuberanz.

Vor allem zur Ausbildung von Studenten wird das dritte Teleskop auf dem Wendelstein, ein **40 cm-Spiegelteleskop**, genutzt.

Das Hubble Space Telescope:

Das wohl bekannteste Satellitenteleskop ist das **Hubble Space Telescope (HST)**.

Am 24. April 1990 wurde das HST mit dem Space Shuttle „Discovery" in eine **Erdumlaufbahn in $600\ km$ Höhe** transportiert. Eine höhere Umlaufbahn konnte das Space Shuttle nicht erreichen. Weil es sich bei dieser Flughöhe noch um einen relativ niedrigen Orbit handelt, wird das HST durch Luftreibung in der Restatmosphäre leicht abgebremst und sinkt deshalb im Lauf der Zeit ab. Es wird vermutlich 2024 in die Erdatmosphäre eintreten und verglühen. An Orten mit einer geographischen Breite zwischen 45 Grad südlicher und 45 Grad nördlicher Breite ist das HST als sternähnlicher, leuchtender Punkt zu beobachten, der von West nach Ost zieht. Von Deutschland aus ist das HST nicht sichtbar.

Das Satellitenteleskop ist etwa so groß wie ein Bus und wiegt etwa 11,6 Tonnen. Bei der Optik des HST handelt es sich um ein **Cassegrain-Spiegelteleskop** mit einem **Spiegeldurchmesser von $2,4\ m$.**

- Das Lichtsammelvermögen des HST ist so groß, dass es ein Glühwürmchen in $16\,000$ km Entfernung noch abbilden könnte. Das Teleskop eignet sich für Beobachtungen in den Wellenlängenbereichen UV ($\lambda > 110\ nm$) über sichtbares Licht bis hin zur Infrarotstrahlung ($\lambda < 2400\ nm$).

Als das HST in Betrieb genommen wurde, zeigte sich, dass das Teleskop aufgrund eines **Fehlers beim Schleifen des Hauptspiegels** unscharfe Bilder lieferte. Dieser Fehler konnte erst drei Jahre später behoben werden, als im Rahmen einer Servicemission von Astronauten eine **Korrekturoptik** eingebaut wurde. Dazu wurde das Weltraumteleskop vom Space Shuttle Endeavour „eingefangen". Seit dem Einbau der Korrekturoptik liefert das Teleskop gestochen scharfe Bilder.

Das Bild zeigt das HST über der Nutzlastbucht des Space Shuttles.

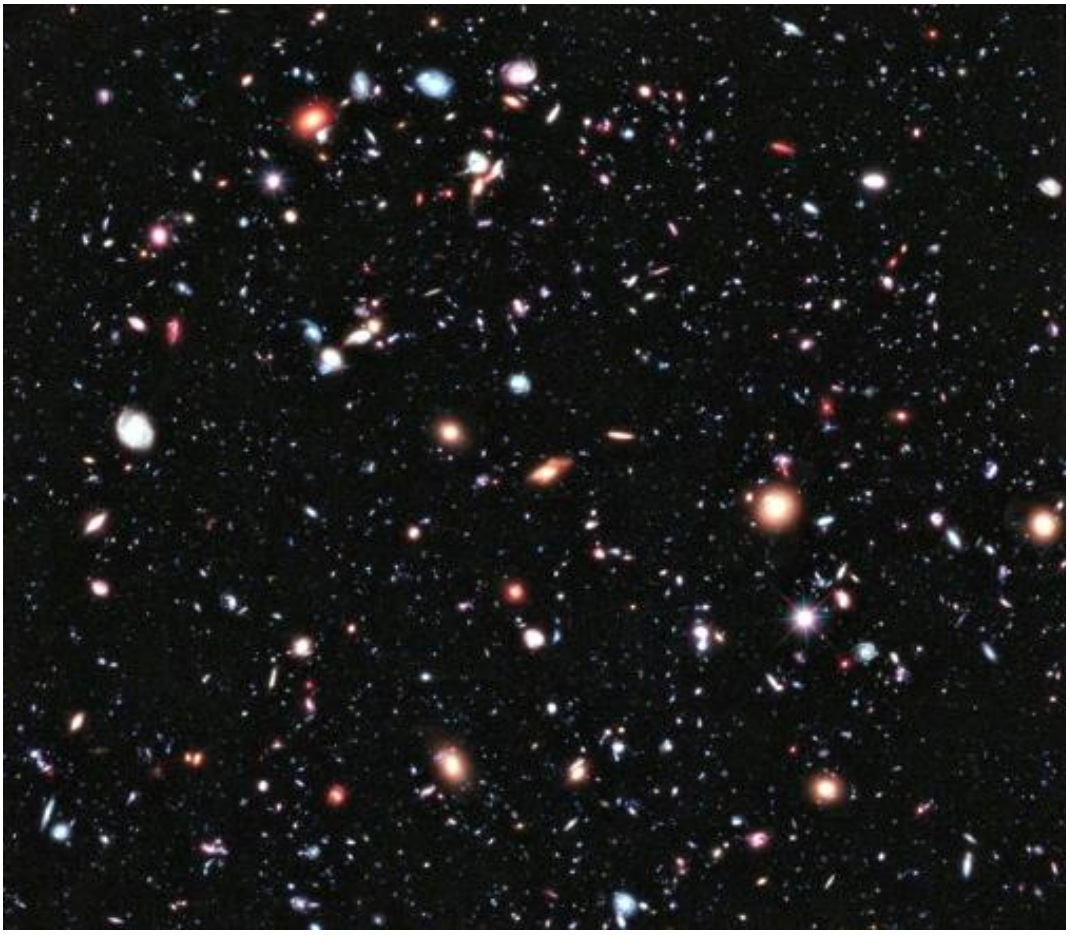
Speziell für das HST entwickelte **CCD-Kameras** zeichnen die Bilder des Teleskops auf. Mehrere **Spektroskope** liefern Informationen, aus denen sich die chemische Zusammensetzung und über die Dopplerverschiebung die Geschwindigkeit kosmischer Objekte bestimmen lässt (vgl. Kap. V, S. 212ff). Die Daten sendet das HST im Wesentlichen mit zwei Parabolantennen über Kommunikationssatelliten zur Erde.

Die innovative Technik des HST und die ungestörten Beobachtungsbedingungen außerhalb der Erdatmosphäre lieferten für die Kosmologie richtungsweisende Erkenntnisse.

Die Hubble Deep Fields:

Eine besondere Bedeutung kommt den **Hubble Deep Fields** zu: 1995 wurden von einem winzigen Ausschnitt des Nachthimmels im Sternbild „Großer Bär" wurden 1995 über einen Zeitraum von 10 Tagen 342 Einzelbilder aufgenommen und zu einem Bild überlagert. Der Himmelsausschnitt mit einer Kantenlänge von 144 Bogensekunden ist so klein, wie ein Tennisball aus $100\ m$ Entfernung erscheint. Er wurde so gewählt, dass er kaum störende Sterne der Milchstraße enthält. Das Hubble Deep Field zeigt viele, weit - teilweise Milliarden Lichtjahre - entfernte und damit auch sehr junge Galaxien. Das **Hubble Ultra Deep Field** (2004) mit einer Belichtungszeit von 11,3 Tagen und das **Hubble Extreme Deep Field** (2012) mit einer Belichtungszeit von 23,1 Tagen liefern noch tiefere Einblicke ins Weltall. Die Deep Field-Aufnahmen des HST dürfen zu Recht als „**Blick bis an den Rand des sichtbaren Universums**" bezeichnet werden.

Folgende Abbildung zeigt das Hubble Extreme Deep Field:



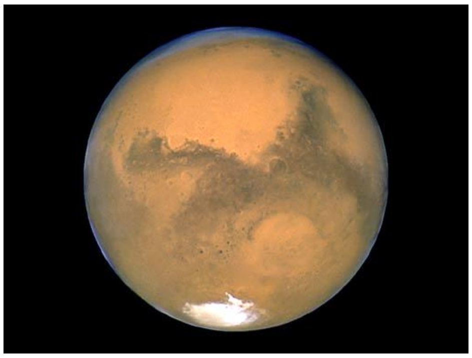
Die **Beobachtungsaufgaben** des HST sind vielfältig.
Forschungsschwerpunkte sind

- Aufnahmen mit höchster Auflösung zur Untersuchung der Entwicklung von Galaxien (Hubble Deep Fields).
- Beobachtung von Cepheidensternen zur Entfernungsbestimmung naher Galaxien
- Eingrenzung des Werts der Hubblekonstanten (vgl. Kap. VI, S. 308)
- Untersuchung der beschleunigten kosmischen Expansion durch Beobachtung ferner Supernovae (vgl. Kap. VI, S. 309 und Kap. VII, S. 352ff)
- Nachweis von schwarzen Löchern in den Zenten naher Galaxien

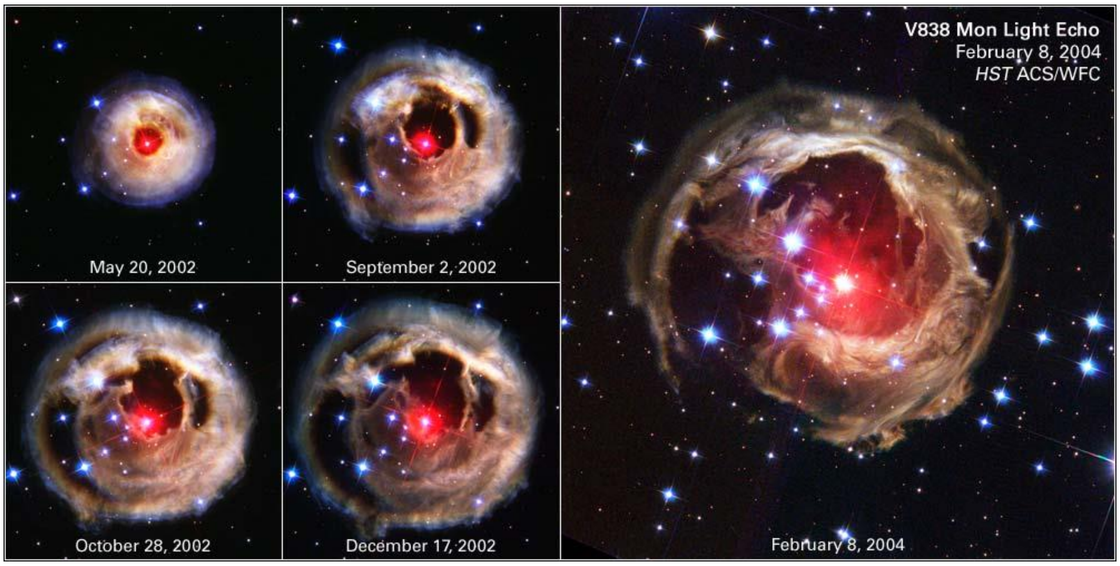
Mit den faszinierenden HST-Fotos aus dem Weltall gelingt es seit etwa 25 Jahren aber auch, die Öffentlichkeit für die Astrophysik zu begeistern.

Beispiele für Hubble-Aufnahmen:

Vom HST stammt das schärfste Foto vom **Planeten Mars**, das jemals aus der Umgebung der Erde gemacht wurde. Man erkennt nicht nur eine der beiden Polkappen aus Wassereis und Kohlendioxideis sondern auch zahlreiche Krater, Gebirge und Oberflächenmerkmale.



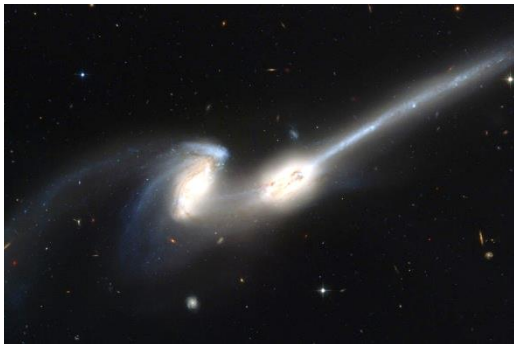
Der Ausschnitt aus dem 5000 bis 6000 Lichtjahre entfernten **Schwan-Nebel M17** im Sternbild Schütze zeigt eine sternbildende Region. Die Farben stammen von angeregtem Wasserstoff- (grün), Sauerstoff- (rot) und Schwefelgas (gelb). Die wellenartige Struktur wird von starker UV-Strahlung verursacht, die von jungen Sternen ausgeht.



Die **„Rote Nova“ V838** im Sternbild „Einhorn“ zeigt „Lichtechos“ bei der Ausbreitung des Lichtblitzes einer Sternexplosion. Entfernung: 20 000 Lichtjahre.

Der etwa 32 000 Lichtjahre entfernte **Katzenaugen-Nebel** ist ein Planetarischer Nebel. Er bildet sich bei relativ leichten Sternen am Ende ihrer Lebenszeit als Übergangsstadium vom Roten Riesen zum Weißen Zwerg. Der Stern stößt seine Hülle als starken Sternwind ab. Übrig bleibt ein Weißer Zwerg, der im Zentrum des Planetarischen Nebels bereits sichtbar ist (vgl. Kap. V, S. 239).

Der Katzenaugennebel bläst pro Sekunde 20 Billionen Tonnen Materie ins Weltall.



Im Sternbild „Haar der Berenice“ beobachtete das HST eine 300 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxienkollision. Wegen der „Schwänze“ aus Sternen und Gas, die beim Verschmelzen der beiden Galaxien weit ins Weltall hinauswachsen, bezeichnet man die Galaxien als die **„Mäuse“**.

Eine weitere berühmte Aufnahme des Hubble-Teleskops zeigt den 13 Milliarden Lichtjahre entfernten **Galaxienhaufen Abell 2218**. Deutlich erkennbar sind Einsteinringe, durch den Gravitationslinseneffekt verzerrte Bilder von Hintergrundgalaxien. (Vgl. Kap. VIII, S. 447)

Eine große Auswahl von Hubble-Bildern mit Erläuterungen bietet die Hubble-Image-Gallery http://hubblesite.org/gallery/.

Lagebestimmung und Nachführung des HST:

Lange Belichtungszeiten erfordern eine perfekte **Lagebestimmung** und **Nachführung** des HST.
Für das „Hubble Ultra Deep Field“ musste das HST während 400 Erdumläufen immer exakt auf die gleiche Stelle am Himmel blicken.

Die Lage des Satelliten im Raum wird mithilfe von Sensoren vermessen, die sich an der Ausrichtung zur Sonne, an der Ausrichtung zum Erdmagnetfeld und an der Ausrichtung zu Leitsternen orientieren.

- Mithilfe verschiedener Steuermechanismen lässt sich das Teleskop so präzise ausrichten, dass es über eine Entfernung von 600 km eine bewegte 10 Ct-Münze mit einem Laserstrahl über einen langen Zeitraum hinweg beleuchten könnte.

Über die Messung von auf schnell rotierende Kreisel (**Gyroskope**) wirkende Präzessionskräfte werden Lageveränderungen des Satelliten im Raum registriert.

Experiment: Gyroskop (Bild)

Eine besonders präzise Vermessung der Lage des Teleskops erfolgt über **Sternsensoren**, die in die Beobachtungsoptik eingebaut wurden und parallel zu den Beobachtungsinstrumenten geringste Veränderungen der Ausrichtung des Teleskops in Bezug auf den Sternhintergrund registrieren.

Die **Lageregelung** erfolgt beim HST über Elektromagnete, die mit dem Erdmagnetfeld wechselwirken und über zwei jeweils $45\ kg$ schwere Trägheitsräder (ebenfalls Gyroskope) mit $59\ cm$ Durchmesser. Weil der Gesamtdrehimpuls von Satellit und Trägheitsrädern eine Erhaltungsgröße ist, können die Trägheitsräder durch Änderung ihrer Drehgeschwindigkeit einen Drehimpuls auf den Satelliten übertragen, der zu einer Lageänderung führt.

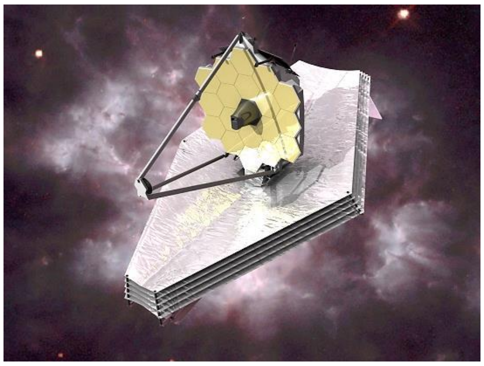
Energieversorgung des HST:

Die **Energieversorgung** des HST erfolgt über zwei Sonnensegel mit Solarzellen. In Nickel-Wasserstoff-Akkus wird ein Teil der Solarenergie gespeichert, damit das Teleskop auch mit Strom versorgt wird, während das HST im Erdschatten fliegt.

Das HST wird zu 85% von der **NASA** und zu 15% von der **ESA** betrieben. Mit zwei Milliarden Euro liegen die **Kosten** des Projekts etwa viermal so hoch wie die des VLT.

Das James Webb Space Telescope - Nachfolger des HST:

Als Nachfolger des Hubble Space Teleskops ist das **James Webb Space Telescope (JWST)** geplant. Der Hauptspiegel des Teleskops wird einen Durchmesser von $6{,}5\ m$ haben und erst im Weltall aus 18 Segmenten zusammengesetzt werden. Das JWST soll weit entfernte Galaxien beobachten, die eine starke Rotverschiebung aufweisen und von für sichtbares Licht kaum durchlässigen Staubwolken umgeben sind. Deshalb ist das Teleskop ausschließlich für die Beobachtung im Infrarotbereich ausgelegt.



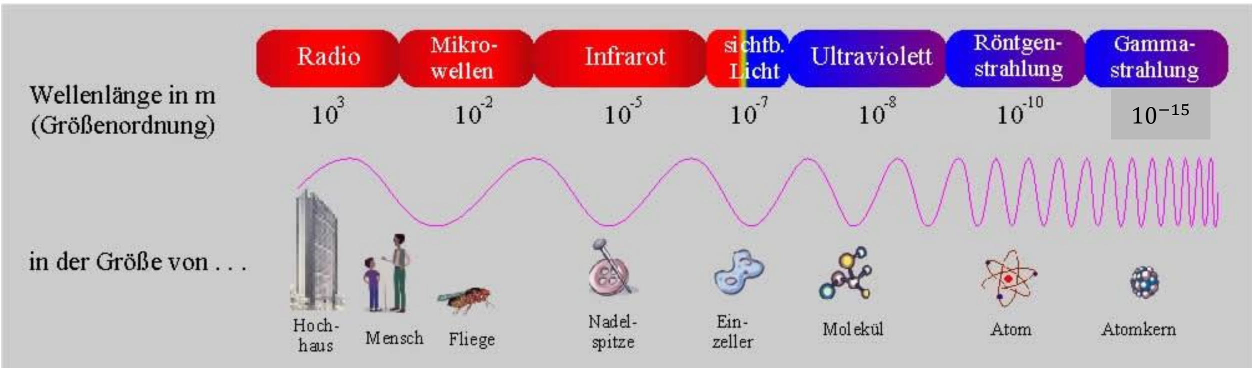
Forschungsschwerpunkte des JWST sind

- die Suche nach Sternen, die als erste nach dem Urknall entstanden,
- die Untersuchung der Struktur und Entwicklung von Galaxien,
- die Erforschung von Planetensystemen außerhalb des Sonnensystems und
- die Suche nach dem Ursprung des Lebens.

Das JWST ist ein Gemeinschaftsprojekt der NASA, der ESA und der kanadischen Weltraumorganisation CSA. Die Baukosten werden auf 8,7 Milliarden Dollar geschätzt. Die Entwicklung der Komponenten ist bereits weit fortgeschritten. Mit dem Start einer Ariane 5-Rakete mit dem Satelliten wird aber erst frühestens 2018 gerechnet.

4) Beobachtung in für das Auge nicht sichtbaren Wellenlängenbereichen des Lichts

Kosmische Objekte senden auch Licht in Wellenlängenbereichen aus, die für das menschliche Auge nicht sichtbar sind. Wichtige **Strahlungsarten** sind dabei **Radiowellen**, **Mikrowellenstrahlung** und **Infrarotstrahlung**, die größere Wellenlängen haben als das sichtbare Licht und damit energieärmer sind und **Ultraviolettstrahlung**, **Röntgenstrahlung** und **Gammastrahlung**, deren Wellenlängen kleiner sind und die energiereicher sind als bei sichtbarem Licht.

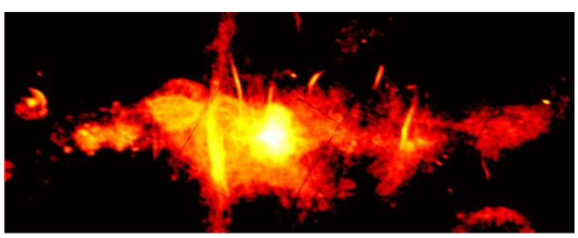


Auch Licht in nicht mit dem Auge sichtbaren Wellenlängenbereichen kann mit geeigneter Technik registriert und sichtbar gemacht werden. Licht unterschiedlicher Wellenlängenbereiche liefert unterschiedliche Informationen über ein kosmisches Objekt.

Ein interessantes Beispiel ist ein **Blick in Richtung des Zentrums der Milchstraße**, unserer Heimatgalaxie, wo sich vermutlich ein Schwarzes Loch befindet:

Im **sichtbaren Wellenlängenbereich** versperren Staubwolken, die das galaktische Zentrum umgeben, den Blick in die Zentralregion der Milchstraße. (Bild rechts)

Die drei unteren Bilder zeigen Aufnahmen im **Infrarot-**, im **Röntgen**- und im **Radiowellenbereich**. Man erkennt, dass die interstellare Materie für Licht dieser Wellenlängenbereiche durchlässiger ist und zusätzliche Informationen sichtbar werden.

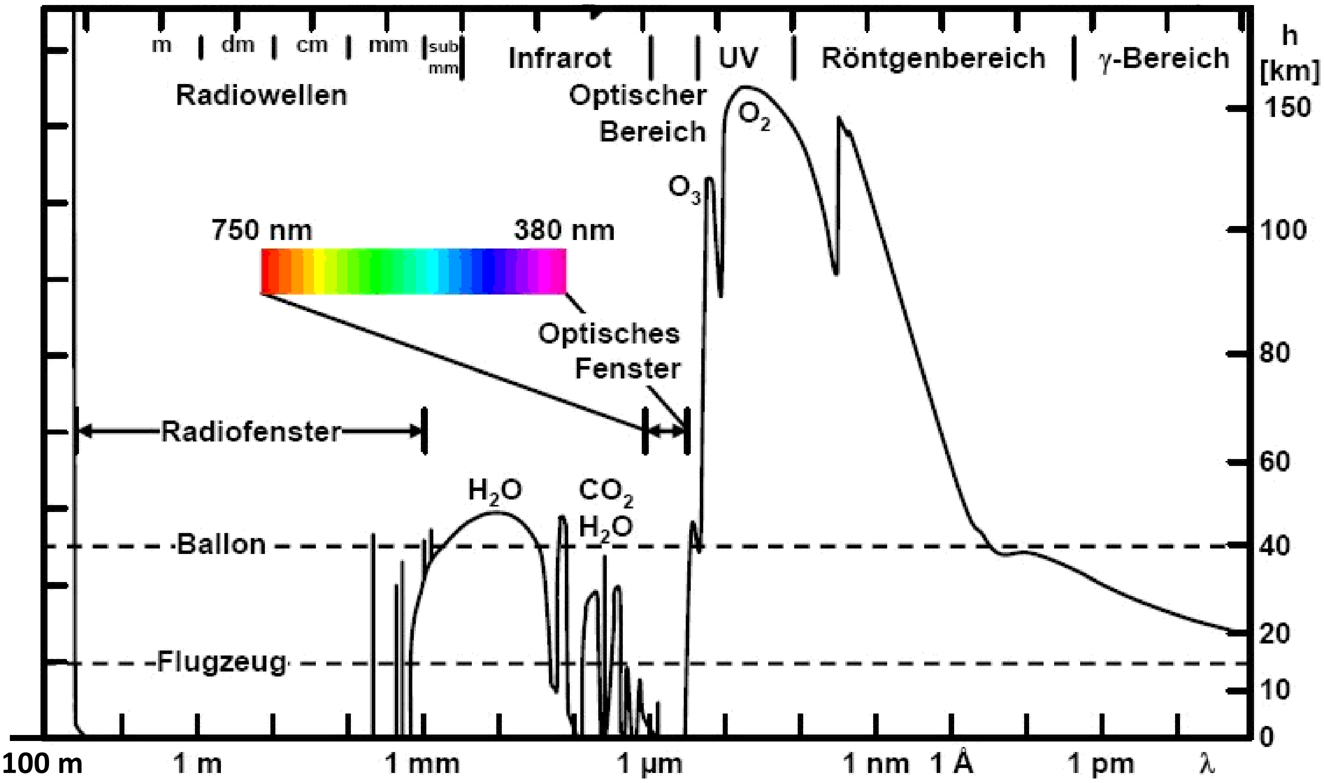


Von dem aus dem Weltall zu uns kommenden Licht wird der größte Teil durch die Erdatmosphäre absorbiert. Nur sichtbares Licht und Radiowellen durchdringen die Atmosphäre. Man spricht vom „**Radiofenster**“ und vom „**optisches Fenster**“.

Noch im Bereich des sichtbaren Lichts liegen die sogenannten **H II-Regionen**. Das sind Wolken leuchtender interstellarer Materie, die große Mengen ionisierter Wasserstoffatome, also Protonen, enthalten. H II-Regionen lassen sich über eine helle Emissionslinie bei der Wellenlänge $\boldsymbol{\lambda = 500{,}7\ nm}$ identifizieren. Sie sind typische **Sternentstehungsgebiete**. Dort werden im umgebenden Wasserstoffgas Wasserstoffatome durch die UV-Strahlung junger Sterne ionisiert. Beispiele für eine H II-Region sind der Orionnebel oder der **Adlernebel** (Bild).

Dass die Erdatmosphäre hochenergetische Strahlung aus dem Weltall abhält, ist gut, weil auf der Erde kein Leben möglich wäre, wenn Röntgen- oder Gammastrahlung die Erdoberfläche erreichen würde. Andererseits enthalten diese Strahlungen wichtige Informationen über kosmische Objekte. Um auch diese Informationen nutzen zu können, benötigt man **Satellitenteleskope**.

Die Graphik zeigt, ab welcher Höhe die Erdatmosphäre für Strahlung bestimmter Wellenlängen durchlässig wird:



Energiereiche Strahlung (UV-, Röntgen- und Gammastrahlung) wird durch Ozon (O_3), aber auch durch Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle der Atmosphäre absorbiert; Infrarotstrahlung hauptsächlich durch Wasserdampf.

Die Beobachtung von Licht bzw. Strahlung in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen erfordert unterschiedliche Teleskoptechnik.

Infrarot-Astronomie:

Die Infrarot-Astronomie unterscheidet drei Wellenlängenbereiche:

Infrarot

Nahes Infrarot	Mittleres Infrarot	Fernes Infrarot
800 nm bis 1 μm	$1\ \mu m$ bis $30\ \mu m$	$30\ \mu m$ bis $300\ \mu m$

Werden von der Erdatmosphäre durchgelassen.

Wird vom Wasserdampf in der Erdatmosphäre absorbiert.

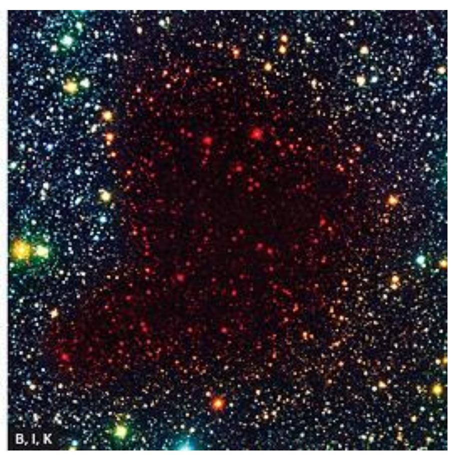
Beachte:
Der Wellenlängenbereich der Infrarotstrahlung ist um ein Vielfaches größer als der Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts!

Im Fernen Infrarot-Bereich liegen **Spektrallinien von Atomen und Ionen, deren Häufung auf Sternentstehungsgebiete hinweist**. Aber auch **kalter interstellarer Staub** strahlt im Bereich des fernen Infrarot.

Daraus ergeben sich für die Infrarot-Astronomie typische **Beobachtungsaufgaben**:

- Erforschung von Sternentstehungsgebieten
- Analyse des Gas- und Staubgehalts in Protosternen und zirkumstellaren Scheiben, aus denen später Planeten entstehen können.
- Untersuchung von transneptunischen Objekten im Kuipergürtel (Asteroiden, Planetoiden, …), die Rückschlüsse auf Bedingungen zur Entstehungszeit des Sonnensystems zulassen.

Wichtig ist auch die Spektroskopie im Infrarot-Bereich. Weit entfernte kosmische Objekte zeigen starke Rotverschiebungen. Deshalb werden in ihren Spektren die Spektrallinien, die sich bei ruhenden Objekten im sichtbaren Bereich befinden, in den Infrarotbereich verschoben. Über die relative Wellenlängenverschiebung solcher Linien kann man die Fluchtgeschwindigkeit und daraus mit dem Hubble-Gesetz ihre Entfernung ermitteln (vgl. Kap. VI, S. 312).



Der **„Kohlensack“** ist eine Dunkelwolke aus Staub im Sternbild „Kreuz des Südens“. Die Staubwolke versperrt bei Beobachtung im Bereich des sichtbaren Lichts den Blick auf die dahinter liegenden Sterne (linkes Bild). In einem Infrarot-Teleskop werden die hinter der Staubwolke liegenden Sterne sichtbar, weil ihre Wärmestrahlung die Staubwolke durchdringt.

Wie bei allen Bildern im nicht sichtbaren Bereich handelt es sich um **Falschfarbenbilder**. Der Infrarotstrahlung unterschiedlicher Wellenlänge wurden bestimmte Farben zugeordnet.

Das Herschel-Teleskop:

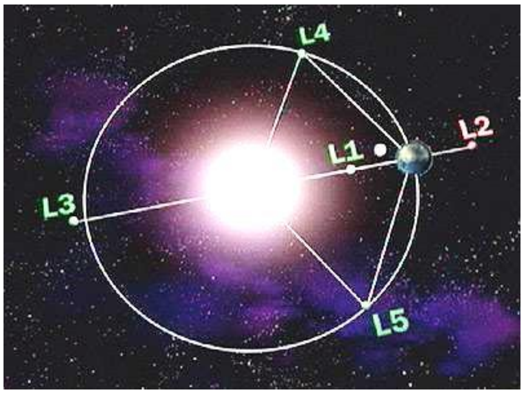
Eines der wichtigsten Infrarot-Satellitenteleskope ist das **Herschel-Teleskop**.

Das Satellitenteleskop der ESA wurde bei EADS in Friedrichshafen am Bodensee gebaut. Es verfügt über den mit einem Durchmesser von **3,5 Meter** größten in einem Stück gebauten **Spiegel**, der sich im Weltall befindet.

Als Kameras zur Bilderzeugung und für die Aufnahme von Spektren werden beim Herschel-Teleskop nicht CCD-Chips eingesetzt, sondern sogenannte **Bolometer**. Das sind kleine Thermometer, die minimale Temperaturunterschiede messen.

➢ Infrarot-Detektoren des Herschel-Teleskops wurden am **Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik** in München entwickelt. Im Rahmen einer Institutsführung können dort Modelle und Originalbauteile besichtigt werden.

Weil die Temperatur der zu messenden Infrarotstrahlung sehr niedrig ist, müssen auch die Messgeräte des Teleskops gekühlt werden. Die Bolometer arbeiten bei einer extrem niedrigen Temperatur von $0{,}285\ K$. Die Sonnenstrahlung wird durch einen **Sonnenschutzschild** abgehalten. Auf der Außenseite dieses Schildes befinden sich Solarzellen, über die der Satellit mit Energie versorgt wird.



Der Herschel-Satellit umläuft die Sonne zusammen mit der Erde auf dem **Lagrange-Punkt L2** (vgl. Kap. IV, S. 175). An diesem Ort in 1,5 Millionen km Entfernung ist die Zentrifugalkraft auf den Satelliten gleich groß wie die Summe der Anziehungskräfte, die Sonne und Erde auf den Satelliten ausüben. Sonne und Erde befinden sich immer auf der gleichen Seite des Satelliten. Die Wärmestrahlung von Sonne und Erde trifft deshalb immer von der gleichen Seite auf den Satelliten bzw. auf seinen Sonnenschutzschild. Somit dient die Wahl des Aufenthaltsorts des Herschel-Satelliten im Weltall auch der Kühlung.

Die Teleskoptechnik des Satelliten muss aber nicht nur gegen die Wärmestrahlung von Sonne und Erde geschützt werden, sondern auch gegen die Wärme, die ständig von der Elektronik des Satelliten erzeugt wird. Hier hilft keine passive Kühlung durch einen Schutzschild, sondern es muss aktiv gekühlt werden. Herschel führte deshalb in einem Tank 2400 Liter flüssiges, $1{,}7\ K$ kaltes Helium $He4$ mit. Zur weiteren Kühlung der Bolometer auf ihre Betriebstemperatur von $0{,}285\ K$ wurde Helium $He3$ verwendet.

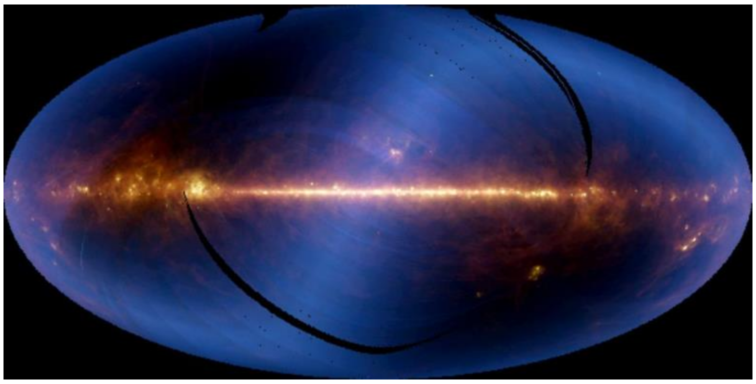
➢ Ein $He4$/ $He3$-Gemisch wird auch beim COMPASS-Experiment am CERN verwendet, um das Target auf besonders tiefe Temperaturen zu kühlen (vgl. Kap. IX, S. 551)

Der Kühlmittelvorrat begrenzt die Lebensdauer von Infrarotsatelliten.

Herschel wurde am 14. Mai 2009 zusammen mit dem PLANCK-Satelliten mit einer Ariane 5-Rakete ins Weltall transportiert. Am 29.4.2013 endete die Herschel-Mission, weil der $He3$-Vorrat des Satelliten aufgebraucht war.

Die Infrarot-Aufnahme des Herschel-Satelliten zeigt links den **Kokon-Nebel** im Sternbild „Schwan“. Es handelt sich dabei um das Entstehungsgebiet eines jungen offenen Sternhaufens. Die Farben gelb, grün, blau sind zunehmenden Temperaturen der Infrarotstrahlung zugeordnet. Die filamentartigen Ansammlungen von heißem Gas und Staub in der rechten Bildhälfte sind in einem optischen Teleskop nicht sichtbar.

Im Bild rechts ist der **gesamte Himmel im Infrarotlicht** zu sehen. Das helle Band in der Mitte zeigt die von der Milchstraße ausgehende Wärmestrahlung. Die blauen Schlieren sind auf die Wärmestrahlung zurückzuführen, die der **Staub in der Ekliptikebene** abgibt. Hier zeigt sich, dass die Ekliptik gegenüber der galaktischen Scheibe der Milchstraße um einen Winkel von 63° geneigt ist.



Das Spitzer-Weltraumteleskop:

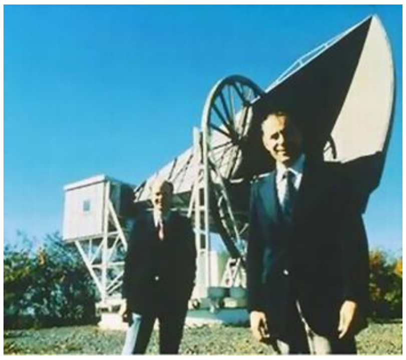
Ein weiteres wichtiges Infrarot-Satellitenteleskop war das **Spitzer-Weltraumteleskop**. Das Infrarot-Teleskop der NASA war von 2003 bis 2009 in Betrieb, verfügte aber im Gegensatz zu Herschel über einen Teleskopspiegel mit nur $85\ cm$ Durchmesser.

Mikrowellen-Astronomie:

Die kosmische Hintergrundstrahlung

Unter kosmischer Hintergrundstrahlung versteht man eine **Mikrowellenstrahlung** mit Wellenlängen im mm- und cm-Bereich, die das gesamte Universum ausfüllt und als „**Nachhall des Urknalls**“ gedeutet wird. Sie wird auch „**kosmischer Mikrowellenhintergrund**“ oder, wegen ihrer Strahlungstemperatur „**3K-Hintergrundstrahlung**“ genannt.

Entdeckt wurde die kosmische Hintergrundstrahlung **1965** von **Arno Penzias und Robert Wilson**. Die beiden Radioastronomen registrierten mit einer Hörnerantenne eine in allen Richtungen gleiche Mikrowellenstrahlung.



Penzias und Wilson erkannten, dass es sich bei dieser Strahlung um die bereits 1948 von **George Gamov** vorhergesagte **Strahlung aus der heißen Frühphase des Universums** handelt, die inzwischen auf knapp 3 Grad über dem absoluten Nullpunkt der Temperatur abgekühlt ist. Die Abkühlung ist auf die kosmologische Rotverschiebung, also auf die Rotverschiebung der Strahlung infolge der kosmischen Expansion zurückzuführen. (Vgl. Kap. VI, S. 307)

Für ihre wichtige Entdeckung erhielten Penzias und Wilson **1978** den **Nobelpreis**.

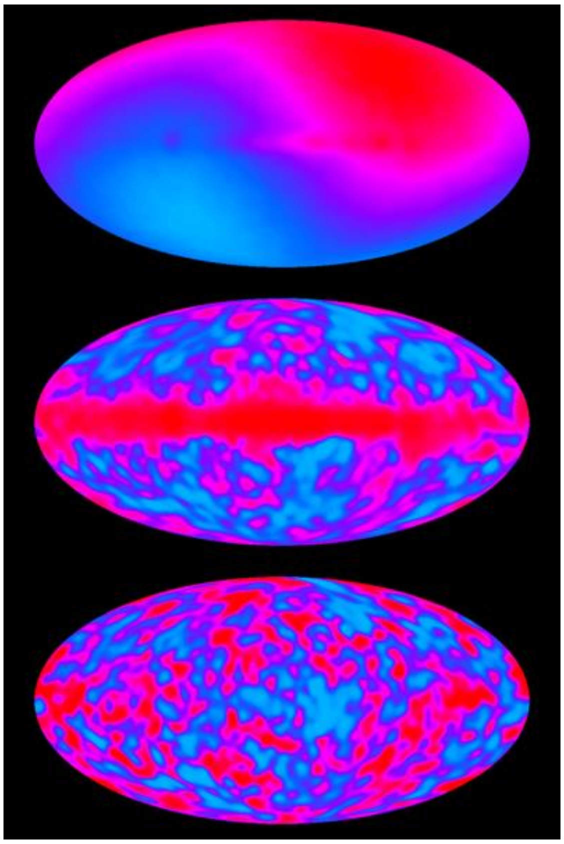
- Die Elektronik der Hörnerantenne, mit der Penzias und Wilson die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckten, kann man im **Deutschen Museum** in München besichtigen.

Die kosmische Hintergrundstrahlung wurde von Penzias und Wilson in einer Wellenlänge von einigen Zentimetern gemessen, also in einem Wellenlängenbereich, für den die Erdatmosphäre durchlässig ist. Sie enthält aber auch Strahlung mit Wellenlängen um $1\ mm$. Dieser Wellenlängenbereich ist für die Forschung besonders aufschlussreich.

Weil Strahlung im mm-Bereich stark vom Wasserdampf in der Erdatmosphäre absorbiert wird, werden entsprechende Experimente zur Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung außerhalb der Erdatmosphäre durchgeführt.

Mehrere **Satelliten** wurden speziell mit dem Ziel entwickelt, minimale Temperaturunterschiede im kosmischen Mikrowellenhintergrund zu vermessen: **COBE** (1989 bis 1993), **WMAP** (2001 bis 2010) und **Planck** (von 2009 bis Oktober 2013).

Die Folge von **COBE-Bildern** zeigt, wie eine repräsentative **Temperaturverteilung** der Kosmischen Hintergrundstrahlung über den gesamten Himmel entsteht. Wärmere Bereiche sind rot dargestellt, kühlere Bereiche blau.

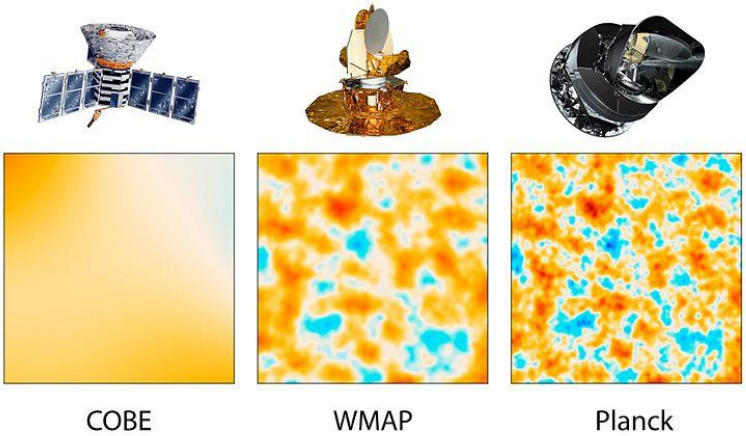


Die dipolartige Temperaturverteilung im ersten der drei Bilder ist nicht auf die kosmische Hintergrundstrahlung zurückzuführen. Sie resultiert aus der Dopplerverschiebung infolge der Bewegung der Erde relativ zum Mikrowellenhintergrund (vgl. Kap. V, S. 212ff). Der Umlauf der Erde um die Sonne, die Bewegung der Sonne in der Milchstraße, die Bewegung der Milchstraße in der Lokalen Gruppe und schließlich die Bewegung der Lokalen Gruppe auf den Virgohaufen zu, führen zu einer Geschwindigkeit der Erde relativ zum Mikrowellenhintergrund von $370\ \frac{km}{s}$. Dieser Effekt bewirkt Temperaturschwankungen im Bereich einiger Milli-Kelvin.

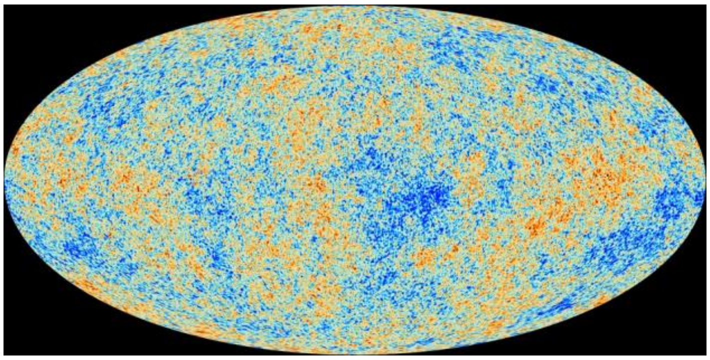
Wenn man diesen Effekt abzieht, entsteht das mittlere Bild. Das rote (warme) Band in der Mitte des Bildes ist auf energiereiche Strahlung aus der Milchstraße zurückzuführen. Auch dieser Einfluss muss herausgerechnet werden.

Das dritte Bild zeigt schließlich die Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung. Die Temperaturunterschiede der kosmischen Hintergrundstrahlung liegen im Hunderttausendstel-Grad-Bereich.

Mit großem technischem Aufwand wurde das Auflösungsvermögen der Teleskope für die Temperaturmessung immer weiter verbessert.



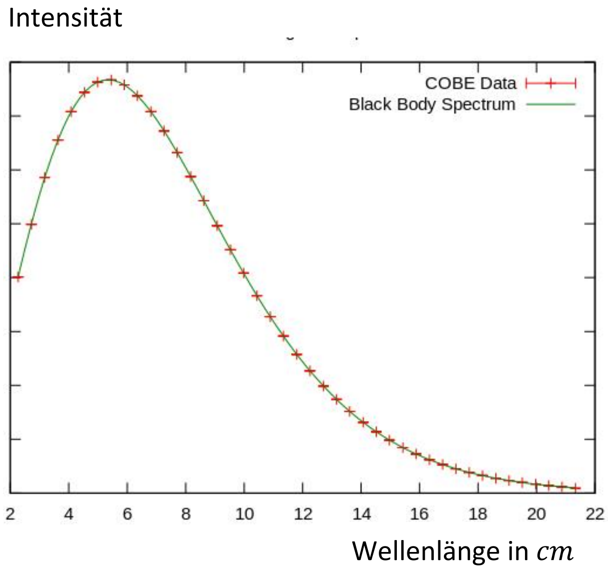
Das Bild rechts zeigt eine Himmelskarte der Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung, die vom **Planck-Satelliten** erstellt wurden:



Eine genaue Untersuchung durch **COBE, WMAP und Planck** zeigte, dass es sich bei der kosmischen Hintergrundstrahlung um eine Mikrowellenstrahlung mit einer durchschnittlichen Strahlungstemperatur von $2{,}725\ K$ handelt, die winzige Temperatur-Fluktuationen im μK-Bereich aufweist. Sie erfüllt das gesamte Universum und sieht in jeder Blickrichtung gleich aus.

Eine Strahlung, die einen abgeschlossenen Raum vollständig ausfüllt und eine gleichmäßige Temperaturverteilung zeigt, bezeichnet man als **Hohlraumstrahlung**. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist ein ideales Beispiel für eine solche Hohlraumstrahlung.

Max Planck (1858 bis 1947) analysierte die Hohlraumstrahlung. Er entwickelte eine Funktion, die den Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und der Intensität bzw. der Energiedichte der Hohlraumstrahlung beschreibt. Diese Funktion wurde experimentell sehr gut bestätigt. Als Graphen der Energiedichte-Funktion ergeben sich je nach Temperatur der Hohlraumstrahlung unterschiedliche sogenannte **Planckspektren**. Die Energiedichte zeigt jeweils bei einer bestimmten Wellenlänge ein Maximum. Mit zunehmender Temperatur verschiebt sich die Wellenlänge, bei der die Energiedichte maximal wird zu kleineren Wellenlängen hin.



Die kosmische Hintergrundstrahlung besteht - wie weißes Licht - aus Licht unterschiedlicher Wellenlängen. Wie groß die Anteile der Energiedichten der kosmischen Hintergrundstrahlung bei den einzelnen Wellenlängen sind, wurde von den Mikrowellensatelliten COBE, WMAP und Planck genau vermessen.

Das Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung unterscheidet sich so gut wie nicht vom Planckspektrum für die Strahlungstemperatur $2{,}725\ K$. Das Intensitätsmaximum der kosmischen Hintergrundstrahlung liegt bei einer Wellenlänge von $5{,}5\ cm$.

Die kosmische Hintergrundstrahlung und insbesondere deren genaue Messung durch den Planck-Satelliten lieferten wichtige Erkenntnisse über die **Verteilung der Materie in der Frühphase des Universums** und über den **Anteil von Dunkler Materie und Dunkler Energie an der Gesamtmasse des Universums**. Die Planck-Ergebnisse werden häufig als **Belege für die Urknallhypothese** herangezogen. Aus den Temperaturfluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung lassen sich sogar **Schlüsse für die zukünftige Entwicklung des Universums** ziehen.

Warum die kosmische Hintergrundstrahlung so viele grundlegende Informationen über unser Universum enthält, werden wir in Kapitel VI „Ursprung und Entstehung des Universums“ lernen.

Die Radio-Astronomie:

Die Erdatmosphäre ist außer für sichtbares Licht auch durchlässig für Radiowellen, so dass mit erdgebundenen Teleskopen von kosmischen Objekten ausgestrahlte Radiowellen beobachtet werden können. Radiowellen haben Wellenlängen von etwa $1\ mm$ bis hin zu mehreren Kilometern.

Die Mikrowellenastronomie gehört also eigentlich in den Bereich der Radioastronomie. Wegen der großen Bedeutung der kosmischen Hintergrundstrahlung, wird sie aber gesondert behandelt.

In der Radioastronomie unterscheidet man zwischen **thermischer Radiostrahlung** und **nichtthermischer Radiostrahlung**.

Thermische Radiostrahlung wird von extrem kalten Quellen wie interstellarem Gas emittiert. Nichtthermische Radiostrahlung entsteht, wenn Elektronen mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit durch Magnetfelder abgelenkt werden. Dies passiert beispielsweise in Supernova-Überresten. Die Radioastronomie liefert somit Informationen über extreme Zustände.

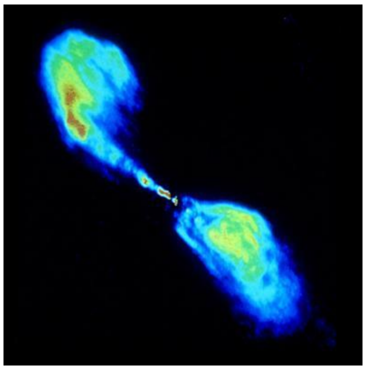
Vor allem Radiowellen mit Wellenlängen im Millimeterbereich werden durch Wasserdampf in der Erdatmosphäre relativ stark absorbiert. Deshalb wählt man als Standorte für Radioteleskop-Arrays trockene Gebiete in großer Höhe.

Radiowellen werden durch interstellaren Staub wesentlich weniger stark gestreut als sichtbares Licht. Damit erlaubt die Beobachtung von Radiowellen tiefe Einblicke in Sternentstehungsgebiete, in die Struktur junger Galaxien oder in die Zentralregion der Milchstraße.

Radioteleskope:

Ein Radioteleskop besteht aus einem **Parabolspiegel**, der einfallende Radiowellen reflektiert und in einem vor dem Parabolspiegel angebrachten Empfänger dem „Horn“ bündelt. Das **Auflösungsvermögen** eines Radioteleskops hängt, wie bei einem optischen Teleskop, von der Größe des Parabolspiegels ab. Professionelle Radioteleskope haben Spiegeldurchmesser von bis zu mehreren hundert Metern (Arecibo-Obeservatorium in Puerto Rico: $304{,}8\ m$; Radioteleskop Effelsberg: $100\ m$, Bild rechts).

Dennoch ist das Auflösungsvermögen eines einzelnen Radioteleskops deutlich geringer als das eines optischen Teleskops. Um das Auflösungsvermögen für Radiowellen zu steigern, schaltet man mehrere Radioteleskope zu **Interferometern** zusammen. So ergibt sich - wie beim Zusammenschalten optischer Teleskope zu einem Interferometer (vgl. VLT, S. 47) - ein noch größerer effektiver Spiegeldurchmesser. In den letzten Jahrzehnten wurden große Radioteleskop-Parks, sogenannte „**Arrays**“ gebaut. Wichtige Beispiele sind das **VLA (Vera Large Array)** in New Mexiko mit 27 Teleskopen mit $25\ m$-Spiegeln, die auf Y-förmig angeordneten Schienen verschoben werden können (Bild links) und **ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array)** in Chile mit 66 Teleskopen, das weiter unten genauer beschrieben wird. Eine deutliche Steigerung des Auflösungsvermögens erhält man, wenn man nicht nur mit den Teleskopen <u>eines</u> Arrays Interferometrie betreibt, sondern <u>weltweit</u> Radioteleskope auf dasselbe Ziel ausrichtet und zu einem Interferometer zusammenschaltet. Im Internationalen Projekt **VLBI (Very Long Baselined Interferometry)** erzeugt man durch weltweite Vernetzung von Radioteleskopen ein virtuelles Teleskop mit dem Erddurchmesser als Spiegeldurchmesser. Man erreicht so Auflösungen, die das Auflösungsvermögen des Hubble Space Teleskops um das bis zu 500-fache übertreffen.



Das Bild links wurde mit dem VLA vom 12 Millionen LJ entfernten **Quasar Centaurus A** aufgenommen. Die Jets aus Elektronen und Protonen erstrecken sich über Millionen Lichtjahre und erzeugen nichtthermische Radiostrahlung.

Im Gegensatz zu optischen Spiegelteleskopen eignen sich **Radioteleskope** nicht nur als Empfänger sondern auch **als Sender für Radiowellen**. Parabolspiegel werden deshalb auch für den Datenaustausch mit weit entfernten Sonden eingesetzt.

Das Arecibo-Teleskop in Chile wurde 1979 als Sender für eine Radiobotschaft an potenzielle außerirdische Empfänger eingesetzt. Eine Antwort aus dem Weltall hat man bisher noch nicht erhalten…

ALMA:

Das derzeit größte und modernste Radioteleskop-Array ist **ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)**, das in der chilenischen Atacamawüste auf 5100 Meter Höhe gebaut wurde und am 13. März 2013 offiziell in Betrieb ging. ALMA besteht aus **54 Radioteleskopen mit 12 m Spiegeldurchmesser und 12 Radioteleskopen mit 7 m Spiegeldurchmesser**. ALMA beobachtet in einem Wellenlängenbereich von $0{,}3\ mm$ bis $9{,}6\ mm$. Das Auflösungsvermögen von ALMA soll zehnmal besser sein, als das des Hubble Space Teleskops. Auf einem Gelände mit $14\ km$ Durchmesser können die Teleskope auf Transportern in variablen Abständen positioniert werden.

ALMA wird von einem internationalen Konsortium, zu dem die USA, Kanada, Ostasien und Chile gehören, finanziert. Die Kosten betragen mehr als eine Milliarde US-Dollar.

Forschungsschwerpunkte von Alma sind

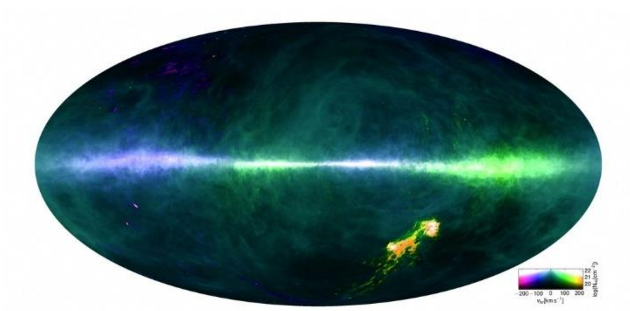
- Beobachtung von Sternen und Planeten,
- die Erforschung junger und damit weit entfernter Galaxien,
- supermassereiche Schwarze Löcher und
- die Erforschung Dunkler Materie und Dunkler Energie.

Beobachtet wird mit ALMA bereits seit Oktober 2011. Dabei entstand auch die spektakuläre Aufnahme zweier kollidierender Galaxien, den **Antennengalaxien** (linkes Bild). Zu sehen sind unter anderem Wolken von kaltem, dichtem Staub aus dem neue Sterne entstehen.

Aus dem Jahr 2015 stammt die rechts abgebildete Aufnahme der 12 Millionen Lj entfernten **Radiogalaxie Centaurus A**.

Die 21cm-Linie des atomaren Wasserstoffs:

Atomarer Wasserstoff ist mit einem Anteil von durchschnittlich etwa 75% das häufigste chemische Element im Universum. Er dominiert die Sternmaterie sowie interstellares und intergalaktisches Gas. Zusätzlich zu den bekannten Linien des Wasserstoffs im optischen Bereich (vgl. S. 41) emittiert atomarer Wasserstoff eine sehr schwache Linie im Radiobereich. Diese sogenannte **HI-Strahlung** entsteht durch den Hyperfeinstrukturübergang zwischen der parallelen und antiparallelen Spin-Orientierung des Elektrons relativ zum Spin des Protons des neutralen Wasserstoffatoms (vgl. Kap. IX, S. 484). Der Energieunterschied beträgt etwa $5{,}9 \cdot 10^{-6} eV$, was nach $E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ etwa der Wellenlänge $\lambda = 21\ cm$ entspricht. Mit Bezug auf ihre Wellenlänge wird die HI-Linie im Wasserstoffspektrum auch **21cm-Linie** genannt. Trotz der extrem geringen Energie der HI-Strahlung, ist diese Strahlung wegen der extremen Häufigkeit von atomarem Wasserstoff im Universum von großer Bedeutung und mit Radioteleskopen gut beobachtbar.



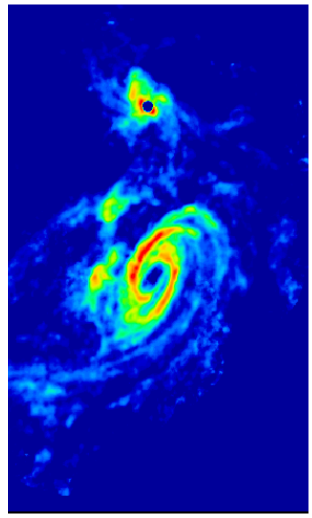
2016 wurde mithilfe des Radioteleskops am Effelsberg und des Parks-64m-Radioteleskops in Australien eine Gesamtaufnahme des Himmels im Licht der HI-Linie erstellt und unter dem Namen **HI4PI** veröffentlicht. Die Aufnahme zeigt große Mengen atomaren Wasserstoffs in und in der Umgebung der galaktischen Ebene der Milchstraße. Auffällig sind außerdem die Ansammlungen von atomarem Wasserstoff im Bereich der Großen und der Kleinen Magellanschen Wolke (rechts unten) sowie der Andromeda-Galaxie und der Dreiecksgalaxie (links unten). Die der Radiostrahlung zugeordneten Farben zeigen Rot- und Blauverschiebungen aufgrund der Relativbewegung der Strahlungsquellen in Bezug auf den Beobachter (vgl. Kap. V, S. 212ff).

Auf der Internetseite https://www.icrar.org/hi4pi/ findet sich eine aus bei unterschiedlichen Wellenlängen in der Umgebung der Wellenlänge der HI-Linie aufgenommenen HI4PI-Karten zusammengestellte Simulation, in der man gut erkennen kann, welche HI-Gebiete sich mit welchen Relativgeschwindigkeiten auf uns zu bzw. von uns wegbewegen. Insbesondere erkennt man, dass sich die Andromeda-Galaxie auf die Milchstraße zu bewegt.

Radiostrahlung der Wellenlänge $\lambda = 21\ cm$ wird beim Durchgang durch die Erdatmosphäre kaum absorbiert. Galaxien erscheinen im Licht der 21cm-Linie des atomaren Wasserstoffs in 3- bis 6-facher Größe im Vergleich zur Beobachtung im sichtbaren Licht.

In Galaxienhaufen bewegen sich die Galaxien auf Ellipsenbahnen um den Schwerpunkt des Galaxienhaufens. Dabei wirken Gezeitenkräfte (Gravitationskräfte und Fliehkräfte), die Gas und Sterne aus den Galaxien reißen. Im intergalaktischen Gas kondensieren große dichte Gaswolken aus, in denen neue Zwerggalaxien entstehen. Dieses intergalaktische Gas emittiert Radiostrahlung der Wellenlänge $21\ cm$ und ist in Radioteleskopen gut sichtbar. Über die Dopplerverschiebung der 21cm-Linie kann man die Rotationsgeschwindigkeit von Galaxien und damit den Anteil Dunkler Materie in den Galaxien bestimmen.
(Vgl. Kapitel VI, S. 315).

Die wechselwirkenden **Galaxien M81 und M82** im Sternbild „Großer Bär" erscheinen im Licht der 21cm-Linie nicht mehr voneinander getrennt. Man erkennt, dass sie in eine riesige Gaswolke eingebettet sind. Das linke Bild zeigt die beiden Galaxien im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts. In Radioteleskop-Array VLA gewonnenen Bild rechts wird die Verteilung des atomaren Wasserstoffs in der gemeinsamen Gaswolke des Galaxienpaares im Licht der 21cm-Linie sichtbar.



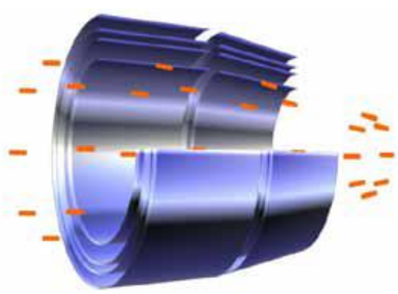
Röntgen- und Gamma-Astronomie:

Objekte mit hoher Massendichte wie Neutronensterne oder Schwarze Löcher erzeugen besonders energiereiche **Röntgenstrahlung**. Wenn das massereiche Objekt Materie aus seiner Umgebung anzieht, entsteht Synchrotronstrahlung mit Wellenlängen, die insbesondere im Röntgenbereich liegen (vgl. Kap. IX, S. 524). Von Supernovae und in Pulsaren (vgl. Kap. V, S. 240) wird sogar noch energiereichere Gammastrahlung freigesetzt. Häufig können diese oft weit entfernten Objekte nur über die emittierte Röntgen- bzw. Gammastrahlung identifiziert werden.

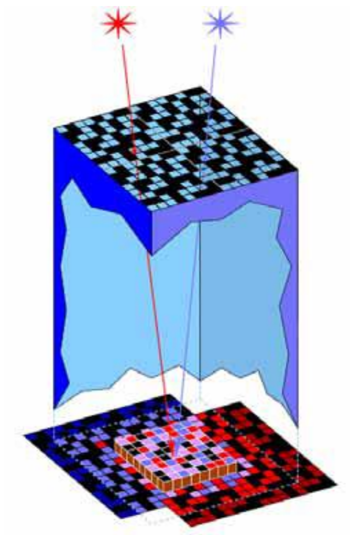
Der Übergang von Röntgen- zu Gammastrahlung ist fließend. Allgemein wird Strahlung mit **Wellenlängen zwischen $0,25\ nm$ und $1\ pm$** als **Röntgenstrahlung** und Strahlung mit **Wellenlängen unter $10\ pm$** als **Gammastrahlung** bezeichnet. Die Erdatmosphäre ist für beide Strahlungsarten nicht durchlässig. Die direkte Beobachtung kosmischer Röntgen- und Gammaquellen ist deshalb nur mithilfe von **Satellitenteleskopen** möglich. Cherenkov-Blitze, die auftreten können, wenn Gammastrahlung auf Atomkerne in der oberen Erdatmosphäre trifft, können allerdings auch mit speziellen erdgebundenen Teleskopen wie H.E.S.S. oder MAGIC beobachtet werden (indirekte Beobachtung von Gamma-Quellen). (Vgl. S. 69)

Röntgenteleskope:

Optische Spiegel reflektieren Röntgen- und Gammastrahlung nicht. Deshalb sind optische Spiegel für diese kurzwelligen Strahlungsarten ungeeignet. Langwelligere und damit relativ energiearme, sogenannte „weiche" Röntgenstrahlung wird mithilfe sogenannter „**Wolterteleskope**" registriert. Ein Wolterteleskop besteht aus mehreren konzentrisch ineinander geschachtelten Spiegelröhren, die sich in Einfallsrichtung verengen. Röntgenstrahlung, die sehr flach auf eine Spiegelfläche trifft, wird an dieser totalreflektiert. Die Verengung führt zu einer **mehrfachen Totalreflexion** und damit zu einer Bündelung der Röntgenstrahlung. Im Brennpunkt wird die Röntgenstrahlung mithilfe eines CCD-Chips registriert.



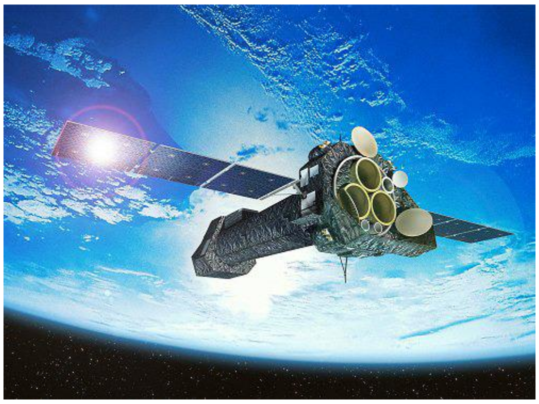
Experiment: Totalreflexion von Lichtstrahlen an einer Wasseroberfläche



Für hochenergetische, sogenannte „harte“ Röntgenstrahlung eignen sich auch Wolterteleskope nicht. Hier arbeitet man mit sogenannten **kodierten Masken**: In einigem Abstand vor einer Schicht von CCD-Detektoren ist eine für Röntgenstrahlung undurchlässige Schicht angebracht, in die ein Lochmuster mit einer speziellen Symmetrie eingearbeitet wurde. Aus dem Schattenwurf, den die Lochmaske auf die CCD-Detektoren bewirkt, schließt man auf die Richtung, aus der die Röntgenstrahlung einfällt.

- Auch zur Röntgenteleskopie liefert eine Institutsführung am **Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik** in München wertvolle Informationen. Dort sind zahlreiche Originale und Modelle zu in Röntgensatelliten verwendeten Teleskopen ausgestellt. Das Engenieursmodell des Röntgensatelliten ROSAT kann man in der Astronomie-Ausstellung im **Deutschen Museum** in München anschauen.

Die wichtigsten aktuell betriebenen Röntgensatelliten sind **Chandra** (NASA, linkes Bild) und **XMM-Newton** (ESA, rechtes Bild). Beide Satellitenteleskope sind seit 1999 im Einsatz.



Forschungsschwerpunkte sind Vorgänge im Universum, bei denen Röntgenstrahlung freigesetzt wird. Dazu gehören Supernovae (vgl. Kap. V, S. 241f) und Materieeinfall auf Schwarze Löcher (vgl. Kap. V, S. 244ff).

Chandra wurde 1999 mit dem Spaceshuttle Columbia in eine elliptische Umlaufbahn gebracht. Chandra fliegt in Höhen zwischen 20 000 km und 129 000 km.

Die folgenden drei Bilder zeigen Aufnahmen von Chandra: Röntgenaufnahmen eines **Quasars**, einer **Supernova in der Großen Magellanschen Wolke** und der **Zentralregion der Andromeda-Galaxie** die ein Schwarzes Loch enthält.



Zahlreiche Bilder des Chandra-Teleskops finden sich auf der **Chandra-Homepage**:

http://chandra.harvard.edu/photo/

- Häufig fließen in veröffentlichte Bilder von kosmischen Objekten **Informationen aus verschiedenen Wellenlängenbereichen** und damit Daten, die von verschiedenen Teleskopen gesammelt wurden, ein. Wie aus in verschiedenen Wellenlängenbereichen aufgenommenen Bilder überlagert werden, wird an vielen Beispielen auf der Chandra-Homepage gezeigt.

Gammateleskope:

Die Entdeckung kosmischer Gammastrahlungsquellen geht auf die Zeit des Kalten Krieges zurück: **1963** schlossen die USA und die Sowjetunion ein **Kernwaffenstopp-Abkommen**, in dem sich die beiden Supermächte gegenseitig verpflichteten, auf Kernwaffentests zu verzichten. Die Einhaltung dieses Abkommens wurde mit militärischen **VELA-Satelliten** überwacht. Die Gammastrahlendetektoren der VELA-Satelliten registrierten Gammastrahlungsquellen. Allerdings auf der von der Erde abgewandten Seite im Universum.

In den 1970er-Jahren begann man mit wissenschaftlichen Satelliten nach den Quellen kosmischer Gammastrahlung zu suchen. Wichtige Gamma-Satellitenteleskope waren der italienisch-niederländische Satellit **Beppo-SAX** (1996 bis 2003) und das Gammateleskop **COMPTON** (NASA, 1991 bis 2000). Momentan befinden sich die NASA-Gammasatelliten **SWIFT** (seit 2004) und **FERMI** (seit 2008) und der ESA-Satellit **INTEGRAL** (seit 2002) im Einsatz. Im Bild ist INTEGRAL dargestellt.

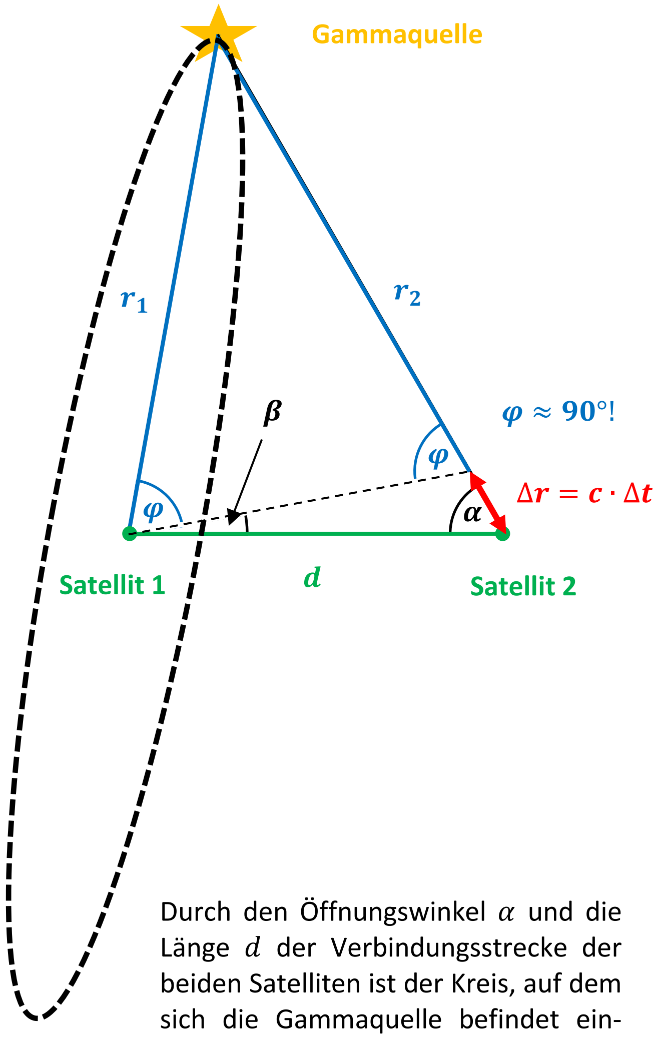
Gamma-Teleskope sind **Teilchendetektoren**. Beim FERMI-Satelliten trifft beispielsweise die Gammastrahlung auf eine Wolframfolie, in der sie einen Paarbildungsprozess auslöst. Es entstehen Elektron-Positron-Paare mit großer Bewegungsenergie. Die Bahnen dieser Teilchen werden mit Hilfe von Halbleiterdetektoren aufgezeichnet. Anschließend wird in einem Kalorimeter die Energie der Teilchen gemessen. Mit Teilchendetektoren befassen wir uns eingehend in Kapitel IX „Grundlagen der Teilchenphysik“ ab S. 543.

Kosmische Gammastrahlenausbrüche sind sehr helle aber kurzzeitige Ereignisse, die in der Regel nur wenige Sekunden dauern. Man bezeichnet sie deshalb auch als **Gammablitze** oder **Gamma Ray Bursts**.

Zur **Lokalisierung einer kosmischen Gammaquelle** benötigt man mindestens drei Gammasatelliten (SWIFT, FERMI und INEGRAL).

Die Position der Gammaquelle wird mithilfe von **Satellitentriangulation** ermittelt:

Zwei Satelliten empfangen das Gammasignal aufgrund ihres unterschiedlichen Abstands von der Quelle zu unterschiedlichen Zeiten. Aus dem Zeitunterschied Δt und dem bekannten Abstand d der beiden Satelliten lässt sich der Ort der Gammastrahlungsquelle an der Himmelskugel auf einen Kreisring mit dem Öffnungswinkel α genau festlegen.



Die Entfernungen r_1 und r_2 der Gammaquelle sind sehr groß im Vergleich zum Wegunterschied Δr. Deshalb ist der Winkel β sehr klein und es gilt näherungsweise: $\varphi \approx 90°$.

Mit der Näherung $\varphi \approx 90°$ folgt: $\sin\beta = \frac{\Delta r}{d}$.

Weil der Winkel β sehr klein ist, gilt mit der Kleinwinkelnäherung für den Winkel β im Bogenmaß: $\beta \approx \sin\beta$.

Es folgt: $\beta = \frac{\Delta r}{d}$ (im Bogenmaß)

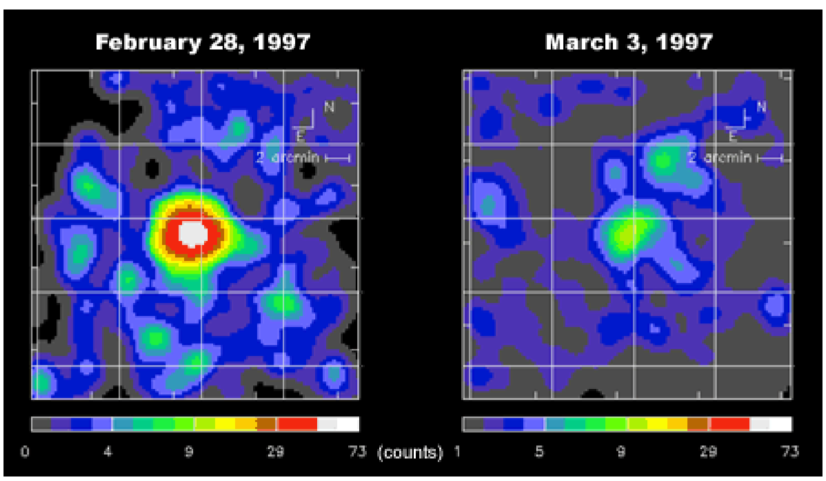
und damit: $\alpha \approx \frac{\pi}{2} - \beta = \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta r}{d}$.

Im Gradmaß gilt: $\boldsymbol{\alpha \approx \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\Delta r}{d}\right) \cdot \frac{180°}{\pi}}$.

Durch den Öffnungswinkel α und die Länge d der Verbindungsstrecke der beiden Satelliten ist der Kreis, auf dem sich die Gammaquelle befindet eindeutig festgelegt.

Ein dritter Satellit legt mit jedem der beiden ersten Satelliten auf die gleiche Weise einen Kreisring fest. Im Schnittgebiet der drei Kreisringe befindet sich die Gammaquelle.

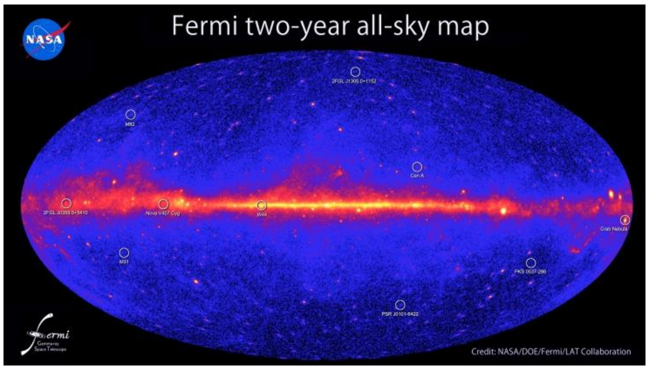
Hilfreich für die Lokalisierung kosmischer Gammablitze ist auch, dass diese häufig einige Zeit **im Röntgenbereich nachglühen (Afterglow)**. Die beiden Bilder rechts zeigen die Röntgenstrahlung einer Gammaquelle unmittelbar nach dem Gammablitz und drei Tage später. Aus diesem Grund sind Gamma-Satellitenteleskope in der Regel zusätzlich mit Röntgendetektoren ausgestattet.

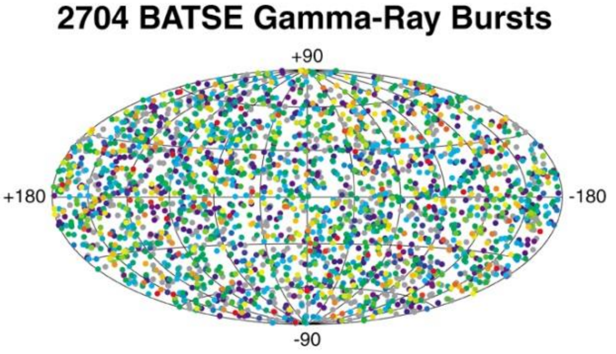


Wenn mithilfe von Gammateleskopen ein Gammablitz registriert und geortet wurde, versucht man, mit einem optischen Teleskop die Quelle des Gammablitzes zu finden. Es sind Fälle bekannt, in denen der Gammablitz sogar mit einem Aufleuchten im sichtbaren Bereich verbunden war.

Kosmische Gammaquellen:

Die Statistik zeigt, dass einerseits **in der Milchstraße kosmische Gammaquellen gehäuft in der galaktischen Ebene** vorkommen und andererseits **auf das gesamte Universum bezogen die Gammaquellen näherungsweise gleichverteilt** sind.





Die Kartierungen stammen vom FERMI- und vom COMPTON-Satelliten.

Als kosmische Gammaquellen kommen sowohl **Neutronensterne** und **kompakte Doppelsternsysteme** innerhalb der Milchstraße als auch extragalaktische Quellen wie **aktive Galaxien** infrage.

Wenn hochenergetische Gammastrahlung auf Atomkerne der äußeren Erdatmosphäre trifft, kann sie **Luftteilchenschauer** auslösen. Es handelt sich dabei um eine große Zahl von Teilchen-Antiteilchen-Paaren – hauptsächlich Elektronen und Positronen – die mit Überlichtgeschwindigkeit (bezogen auf die Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre!) in die unteren Atmosphärenschichten eindringen. Wenn elektrisch geladene Teilchen sich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen, beobachtet man blaue Lichtblitze, sogenannte **Cherenkov-Blitze**. Cherenkov-Blitze werden in einer Höhe von etwa $10\ km$ erzeugt und dauern nur wenige Milliardstel-Sekunden. Dennoch können sie mit sogenannten **Cherenkov-Teleskopen** von der Erdoberfläche aus registriert werden. Dank des Cherenkov-Effekts ist es also möglich, Gammastrahlung aus dem Universum über ihre Wechselwirkung mit der Erdatmosphäre mit erdgebundenen Teleskopen indirekt zu beobachten. (Zum Cherenkov-Effekt: vgl. Kap. IX, S. 548)

Das **H.E.S.S-Teleskop** in Namibia (linke Abbildung) besteht aus vier Spiegeln mit $108\ m^2$ Spiegelfläche, die aus jeweils 382 Segmenten zusammengesetzt wurden und seit 2012 einem fünften Teleskop mit $614\ m^2$ Spiegelfläche. Die Spiegelteleskope lassen sich auf jeden Himmelspunkt ausrichten. Die Spiegel fokussieren das Licht von Cherenkov-Blitzen auf eine im Brennpunkt des Spiegels angebrachte hochempfindliche CCD-Kamera.

Nach dem gleichen Prinzip arbeiten die beiden **MAGIC-Teleskope** auf La Palma (rechte Abbildung). Das größere der beiden MAGIC-Teleskope hat eine Spiegelfläche von $239\ m^2$.

Neutrino-Astronomie:

Ein ganz aktuelles Teilgebiet der Astroteilchenphysik ist die Beobachtung und Erforschung von hochenergetischen **Neutrinos aus dem Universum**.

Neutrinos sind ungeladene Elementarteilchen mit extrem geringer Masse (vgl. Kap. IX, S. 478). Vermutlich gibt es im Universum so viele Neutrinos, dass ihre Gesamtmasse mehr als 1 Prozent der Masse des Universums beträgt.

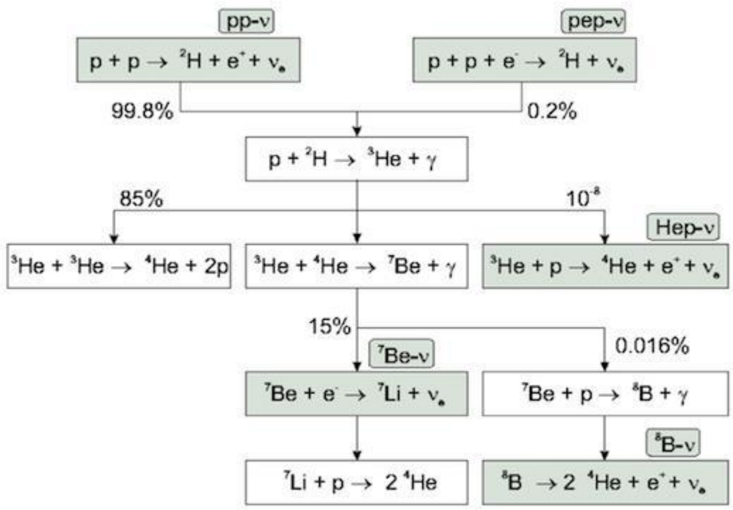
Pro Sekunde durchdringen ständig etwa 66 Millionen Neutrinos jeden Quadratzentimeter Fläche. Trotzdem sind Neutrinos nur schwer nachweisbar, weil sie mit Materie kaum wechselwirken. Neutrinos durchlaufen beispielsweise die Erde in der Regel ungehindert.

Kosmische Neutrinos entstehen

- bei durch die **kosmische Strahlung** verursachten Kernreaktionen in der Erdatmosphäre (Neutrinos mit Energien bis $100\ GeV$),
- bei **Fusionsprozessen im Kern der Sonne** (solare Neutrinos mit Energien von $0{,}1\ GeV$ bis $20\ GeV$) oder
- bei **Supernovae** (Neutrinos mit Energien von einigen MeV).
- Das gesamte Universum ist von einer sehr niedrigenergetischen **Neutrino-Hintergrundstrahlung** ausgefüllt, die auf den Urknall zurückgeführt wird und über die kosmische Hintergrundstrahlung nachgewiesen werden kann. Diese Neutrinos haben Energien von lediglich $0{,}0004\ eV$.
- In den letzten Jahren konnten mit dem ICECube Experiment aber auch extrem **hochenergetische Neutrinos** mit Energien von mehreren Hundert bis Tausend TeV nachgewiesen werden (vgl. S. 72).

Sonnenneutrinos:

Im Kern der Sonne laufen unterschiedliche Fusionsprozesse ab, bei denen teilweise Neutrinos in verschiedenen Energiebereichen entstehen. Welche anteilige Bedeutung die einzelnen Fusionsprozesse haben, hängt vor allem von der Temperatur im Sonnenkern ab und kann über die Energie der nachgewiesenen solaren Neutrinos abgeschätzt werden. Der Nachweis von solaren Neutrinos und die Messung von deren Energie ermöglicht es somit, die Fusionsprozesse im Kern der Sonne zu erforschen.



Während das Licht wegen der elektromagnetischen Wechselwirkung der Photonen mit den geladenen Teilchen des Plasmas im Sonneninneren etwa $100\ 000$ Jahre benötigt, um die Sonne verlassen zu können, durchdringen die ungeladenen Neutrinos das Sonennplasma ungehindert. Durch Vergleich der tatsächlichen Strahlungsleistung der Sonne mit der aufgrund der nachgewiesenen solaren Neutrinos zu erwartenden Strahlungsleistung kann man überprüfen, ob und wie stark sich die Leuchtkraft der Sonne in einem Zeitraum von $100\ 000$ Jahren verändert hat. Es zeigte sich, dass die Strahlungsleistung der Sonne in diesem Zeitraum gleichgeblieben ist.

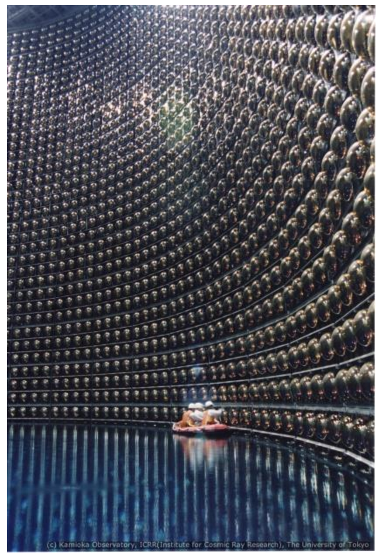
Wichtige Experimente zur Erforschung von Sonnenneutrinos:

Das erste Experiment zur Erforschung solarer Neutrinos war das **Homestake-Experiment** in South Dakota (1970 bis 1994). In einer ehemaligen Goldmine wurde ein Tank mit 615 Tonnen Tetrachlordiethylen installiert (Bild rechts). In der Kernreaktion

$$^{0}_{0}\nu_e + ^{37}_{17}Cl \rightarrow ^{37}_{18}Ar + ^{\;\,0}_{-1}e$$

entstehen, wenn ein Neutrino auf einen Chlor-Kern trifft, ein Argon-Kern und ein Elektron. Um die Neutrinos zu zählen, wurden die bei der Kernreaktion gebildeten Argon-Atome gesammelt und über den radioaktiven Zerfall von $Ar137$ in $Cl37$ nachgewiesen.

Beim **Kamioka-Experiment** (Japan, 1983 bis 1996) wurden in einem Tank mit 3000 Tonnen hochreinem Wasser mit 1000 Photomultipieren (vgl. Kap. IX, S. 547) Cherenkov-Blitze registriert, die auftreten, wenn bei elastischen Streuungen von Neutrinos an Elektronen die Elektronen im Wasser auf Überlichtgeschwindigkeit beschleunigt werden.



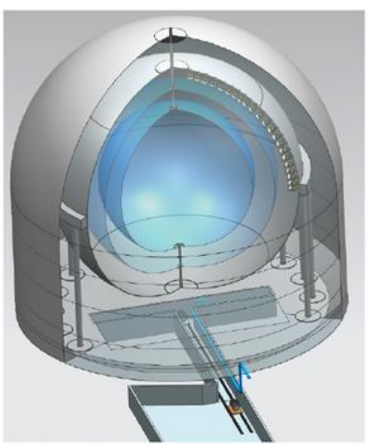
1996 ging als Nachfolgeprojekt des Kamioka-Experiments das **Super-Kamiokande-Experiment** (Bild rechts) in Betrieb. Es handelt sich dabei um den weltgrößten Cherenkov-Detektor. In 1000 Metern Tiefe wurde ein Tank für 32 000 Tonnen hochreinen Wassers mit 11 200 Photomultipliern ausgekleidet. Das Experiment erforscht neben solaren Neutrinos auch kosmische Neutrinos. Bei Super-Kamiokande wurden erstmals Neutrinooszillationen gemessen, mit denen die Masse von Neutrinos begründet wird (vgl. Kap. IX, S. 480).

Die **Gallium-Germanium-Detektoren GALLEX** (Gran Sasso, Italien, 1991 bis 1997) und **SAGE** (Kaukasus) nutzten die Kernreaktion

$$^{0}_{0}\nu_e + ^{71}_{31}Ga \rightarrow ^{71}_{32}Ge + ^{\;\,0}_{-1}e$$

um solare Neutrinos nachzuweisen.

Das Borexino-Experiment:



Seit 2007 werden am **Borexino-Experiment** unter dem Gran-Sasso-Massiv in Norditalien die Energien von Sonnenneutrinos gemessen. In einem Tank, der 280 Tonnen des Flüssigszintillators Pseudocumol (PC, ein organisches Lösungsmittel) enthält, werden, ähnlich wie beim Kamioka-Experiment, Neutrinos über Cherenkov-Blitze nachgewiesen. Der Szinitillatortank von Borexino ist von einer Stahlhülle zur Abschirmung und einem zweiten Tank mit 2400 Tonnen hochreinem Wasser umgeben. In diesem werden mit 208 Photomultipliern Myonen aus der kosmischen Strahlung und Elektronen aus radioaktiven Betazerfällen im umgebenden Fels nachgewiesen. Der Wassertank mit den Photomultipliern dient als Veto-Detektor für das eigentliche Neutrinoexperiment.

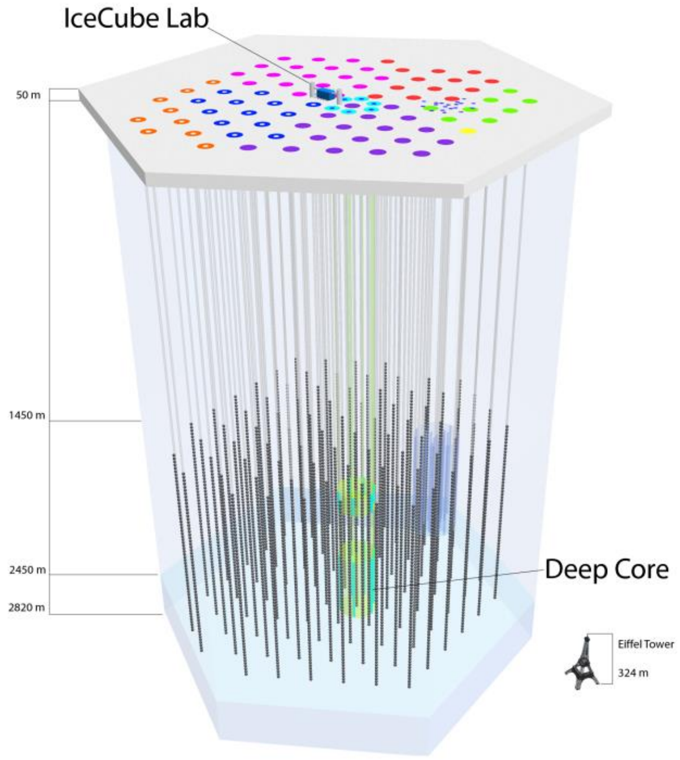
Die Auflösungsvermögen für Neutrino-Energien beim Borexino-Experiment ist so gut, dass Neutrinos aus den unterschiedlichen Fusionsreaktionen im Kern der Sonne getrennt nachgewiesen werden können. Neutrinos, die bei der $Be7$-Fusionsreaktion $^{7}_{4}Be + ^{\;\,0}_{-1}e \rightarrow ^{7}_{3}Li + ^{0}_{0}\nu_e$ (siehe Abbildung auf S. 70) entstehen, haben beispielsweise eine Energie von $862\ keV$. Die Energie von Neutrinos aus der pep-Reaktion beträgt $1{,}44\ MeV$. Die Proton-Proton-Reaktion ist mit einem Anteil von 99,8% mit Abstand die wichtigste Fusionsreaktion im Kern der Sonne (vgl. Kap. IV, S. 181). Weil aber die bei der p-p-Reaktion freigesetzten Neutrinos eine Energie von nur $420\ keV$ haben, sind gerade diese Sonnenneutrinos schwer nachweisbar. Erst 2012 gelang es am Borexino-Experiment, pp-Neutrinos vom Messuntergrund zu unterscheiden.

Das Neutrino-Observatorium ICECube:

Das **ICECube-Experiment** ist Teil der **Amundsen-Scott-Station** am geographischen Südpol in der **Antarktis**.

Seit 2010 misst ICECube die Energien von hochenergetischen Neutrinos mit Energien von mehr als $10\ GeV$. Für Sonnenneutrinos ist ICECube unempfindlich.

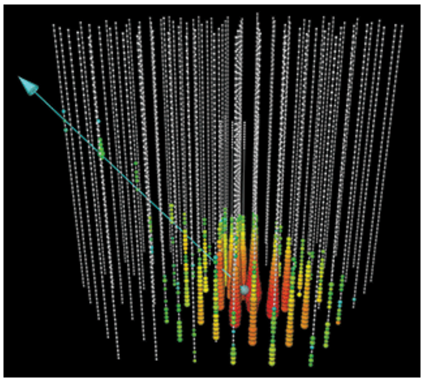
Insgesamt 5160 Photomultiplier, die an Stahlseilen in $2450\ m$ tiefen Bohrlöchern im Eis versenkt wurden, wirken als riesiger Detektor für Neutrinos.



Die Photomultiplier verstärken Cherenkov-Blitze, die entstehen, wenn infolge der elastischen Streuung von Neutrinos an Elektronen sich Elektronen mit Überlichtgeschwindigkeit durch das Eis bewegen. Im Prinzip wie bei den Driftkammern der Teilchendetektoren am CERN (vgl. Kap. IX, S. 345) lässt sich mithilfe der Photomultiplier-Ketten der Weg aufzeichnen, auf dem ein Neutrino die Messanordnung durchfliegt.

Die 86 Bohrlöcher von ICECube haben Abstände von $125\ m$ und sind auf eine Fläche von einem Quadratkilometer verteilt. Im Zentrum der Anordnung befinden sich 8 Stränge mit je 480 Photomultipliern im Abstand von nur 7 Metern. Dieser Detektorbereich wird wegen seines hohen Auflösungsvermögens als „Deep Core Detektor“ bezeichnet. Das kleinere Vorgänger-Experiment **AMANDA**, das von 1997 bis 2009 Neutrinos im Polareis nachwies, ist in das ICECube-Experiment integriert.

Die beiden Bilder unten zeigen einen Photomultiplier, der am Stahlseil im Bohrloch versenkt wird und ein „Neutrino-Ereignis“, das mithilfe der Detektoren von ICECube registriert wurde.



Auch wenn das IceCube Experiment äußerlich keine Ähnlichkeit etwa mit einem Spiegelteleskop besitzt, ist das Ziel des Experiments doch, kosmische Quellen, die Neutrinos aussenden, zu finden und zu lokalisieren. Deshalb betrachten wir auch IceCube als Teleskop: als **Neutrino-Teleskop**.

Bei ICECube arbeiten ca. 250 Wissenschaftler aus 40 Instituten in 11 Ländern. In Deutschland sind DESY (Deutsches Elektron Synchrotron) und sieben Universitäten beteiligt. Die Messdaten werden von ICECube über Satellit zur Auswertung an die Forschungsinstitute übertragen.

ICECube weist pro Jahr etwa $100\,000$ Neutrinos nach, von denen aber fast alle infolge der Höhenstrahlung in der Erdatmosphäre entstehen. Das **Forschungsziel** von ICECube ist jedoch die **Suche nach kosmischen Quellen hochenergetischer Neutrinos** in und außerhalb der Milchstraße.

- Vor ICECube wurden von nur einem Ereignis hochenergetische kosmische Neutrinos gemessen: 1987 wies das Kamioka-Experiment Neutrinos im Energiebereich von $4\ MeV$ bis $6\ MeV$ nach, als deren Quelle die **Supernova 1987A** in der Großen Magellanschen Wolke identifiziert werden konnte.

Bis 2015 konnte ICECube insgesamt 37 hochenergetische Neutrinos mit Energien von mehr als $30\ TeV$ nachweisen. 34 dieser Ereignisse lagen im Bereich von $30\ TeV$ bis $250\ TeV$.
Statistisch stammen mindestens 12 dieser 37 Neutrinos nicht aus Kernreaktionen in der Erdatmosphäre.

Drei Neutrinos hatten spektakuläre Energien von mehr als $1000\ TeV$ bzw. $1\ PeV$. Diese drei Neutrinos erhielten Namen:

- **Bert**: $E_\nu = 1{,}04\ PeV$, bekanntgegeben im August 2011
- **Ernie**: $E_\nu = 1{,}14\ PeV$, bekanntgegeben im Januar 2012
- **Big Bird**: $E_\nu = 2{,}2\ PeV$, bekanntgegeben im Dezember 2012

Die Energie von „Big Bird“ ist immerhin etwa 150-mal so groß, wie die maximale Kollisionsenergie von zwei Protonen bei den LHC-Experimenten am CERN (vgl. Kap. IX, S. 530).

Wie diese Neutrinos beschleunigt werden und aus welchen Quellen sie kommen, ist eine spannende Frage. Mögliche Quellen hochenergetischer Neutrinos sind Galaxienkollisionen, Neutronensterne oder Akkretionsscheiben von Schwarzen Löchern. Eine spekulative Vorstellung ist, dass hochenergetische Neutrinos beim Zerfall von hypothetischen Teilchen der Dunklen Materie entstehen könnten. (Zur Dunklen Materie: vgl. Kap. VI, S. 314ff)

Es liegt nahe, im Neutronenstern des Crab-Nebels eine starke, weil junge und relativ nahe Neutronenquelle zu vermuten. Aus der Richtung des Crab-Nebels konnte ICECube bisher aber keine hochenergetischen Neutrinos nachweisen.

Die Winkelauflösung von ICECube ist leider nicht besonders gut. Nur 20% der Neutrinoquellen lassen sich auf 1 Grad genau lokalisieren; der Rest nur bis auf 15 Grad genau. Deshalb kann man die Frage nach der Herkunft hochenergetischer Neutrinos bisher noch kaum beantworten. Auffällig ist, dass die Neutrinoquellen relativ gleichmäßig über den Himmel verteilt sind und sich nicht auf die galaktische Scheibe der Milchstraße konzentrieren. Daraus kann man schließen, dass Neutrinoquellen auch außerhalb der Milchstraße zu suchen sind.

Aufgaben zu Kapitel II Licht, Teleskope und Spektroskopie:

Aufgabe 1: Sonnenspektrum (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2006)

1) Beschreibe das Zustandekommen der Absorptionslinien im Sonnenspektrum und erläutere, wie man aus ihnen Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung der Photosphäre ziehen kann!

2) Eine auffällige Linie im Sonnenspektrum ist die H_α-Linie des Wasserstoffs. Inwiefern spielt die Temperatur der Photosphäre eine wichtige Rolle bei der Entstehung dieser Linie?

Lösung:

zu 1) Das in der tieferen Photosphäre entstehende Licht mit kontinuierlichem Spektrum regt in der äußeren Photosphäre und der Sonnenumgebung Gasatome an. Dabei wird Licht der Wellenlängen absorbiert, die den Anregungsenergien der Atome entsprechen. Die Atome strahlen zwar bei den Rücksprüngen wieder Licht der entsprechenden Wellenlängen ab, aber gleichverteilt in alle Richtungen, so dass vernachlässigbar wenig Licht dieser Wellenlängen den Beobachter auf der Erde erreicht. Aus dem Fehlen der Linien kann man deshalb auf die Gasatome und deren mengenmäßige Verteilung in der Photosphäre schließen.

zu 2) Da die H_α- Linie als Absorptionslinie beim Anregen von Wasserstoffatomen aus dem ersten angeregten Zustand in den zweiten angeregten Zustand entsteht, muss der Wasserstoff zuvor mindestens in den ersten angeregten Zustand angeregt worden sein. Im Gegensatz zur Erdatmosphäre ist die Sonnenatmosphäre heiß genug, dass genügend Wasserstoffatome durch thermische Anregung in den ersten angeregten Zustand versetzt werden.

Aufgabe 2: Sonnenspektrum (aus einer Aufgabe aus Musterabitur für das G8)

Die Sonne ist für Astronomen von großer Bedeutung, da sie der nächstliegende Stern ist und der einzige, den wir im Detail untersuchen können. Wichtige Erkenntnisse über die Eigenschaften der Sonne erhält man durch die Untersuchung ihres Spektrums. Im Sonnenspektrum befindet sich bei der Wellenlänge $\lambda = 656\ nm$ eine starke Absorptionslinie, die sogenannte H_α-Linie.

a) Erläutere das Zustandekommen von Absorptionslinien im Sonnenspektrum.

b) Mithilfe der Serienformel des Wasserstoffatoms $\frac{1}{\lambda} = R_H \cdot \left(\frac{1}{{n_2}^2 - {n_1}^2}\right)$ kann die Wellenlänge eines Photons berechnet werden, das beim Übergang eines angeregten Wasserstoffatoms im Zustand n_2 in einen energetisch niedrigeren Zustand n_1 ausgesandt wird. Dabei ist $R_H = 1{,}0967758 \cdot 10^7\ \frac{1}{m}$ die Rydbergkonstante für Wasserstoff. Die H_α-Linie entsteht bei einem Übergang in den ersten angeregten Zustand ($n_1 = 2$). Welches ist das Ausgangsniveau? Begründe Deine Behauptung.

Lösung:

zu 1) Vgl. S. 38ff

zu 2) $\frac{1}{\lambda} = R_H \cdot \left(\frac{1}{{n_2}^2 - {n_1}^2}\right) \implies n_2 = \sqrt{R_H \cdot \lambda + {n_1}^2} = \sqrt{1{,}0967758 \cdot 10^7\ \frac{1}{m} \cdot 656 \cdot 10^{-9}\ m + 4} \approx 3{,}3$

$\implies$ Das Ausgangsniveau ist der zweite angeregte Zustand ($n_2 = 3$).

Aufgabe 2: Interferenz am optischen Gitter (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 1999)

Ein Gitter mit 500 Linien pro Zentimeter wird senkrecht mit dem Licht eines Lasers der Wellenlänge $632\ nm$ beleuchtet.

1) Wie viele Hauptmaxima der Intensität sind höchstens zu erwarten?

2) Das Interferenzbild wird auf einem $4{,}00\ m$ vom Gitter entfernten, senkrecht zur Hauptrichtung aufgestellten Schirm aufgefangen. Berechne die Entfernung zwischen dem Hauptmaximum nullter Ordnung und dem Hauptmaximum zweiter Ordnung.

Lösung:

zu 1) Gitterkonstante:

$$b = \frac{1}{500\ \frac{1}{cm}} = 2{,}00 \cdot 10^{-5}\ m$$

Mit $k \cdot \lambda = b \cdot \sin\alpha$ und $\sin\alpha \leq 1$ folgt:

$$k \leq \frac{b}{\lambda} = \frac{2{,}00 \cdot 10^{-5}\ m}{632 \cdot 10^{-9}\ m} \approx 31{,}6$$

Es gibt also links und rechts vom 0. Maximum jeweils 31 Maxima. Insgesamt: 63 Maxima.

zu 2)

$$2 \cdot \lambda = b \cdot \sin\alpha \ \Longrightarrow\ \sin\alpha = \frac{2 \cdot 632 \cdot 10^{-9}\ m}{2{,}00 \cdot 10^{-5}\ m} = 0{,}0632 \ \Longrightarrow\ \alpha \approx 3{,}62°$$

Im Abstand a des Schirms vom Gitter folgt für den Abstand d zwischen dem Maximum 0-ter Ordnung und einem Maximum 2. Ordnung:

$$\tan\alpha = \frac{d}{a} \Longrightarrow\ d = a \cdot \tan\alpha = 4{,}00\ m \cdot \tan 3{,}62° \approx 25{,}3\ m$$

Quellen und weiterführende Literatur:

Bergmann Schäfer: Sterne und Weltraum, Hubble Space Teleskop, S. 6 bis 23
Bergmann Schäfer: Sterne und Weltraum, Röntgenteleskope, S. 29 bis 45
Bergmann Schäfer: Sterne und Weltraum, COMPTON-Teleskop, S. 23 bis 29
M. Gamenzind: Astronomie und Kosmologie, Kosmische Hintergrundstrahlung, S. 401 bis 428

Astronomie und Raumfahrt, Erhard Friedrich Verlag:

<u>Teleskope</u>:
Heft 5/2009: Als Astronom am Very Large Telescope in Chile (S. 38 bis 42)
Heft 5/2009: Klare Sicht mit adaptiver Optik (S. 34 bis 37)
Heft 2/2010: Ein traumhafter, klarer Blick ins All (Hubble Space Telescope) (S. 26 bis 33)
Heft 3/2006: Europäische Satellitenprojekte (S. 30 bis 33)
Heft 3_4/2015: Herschel und die Zukunft der Fern-Infrarot-Astronomie (S. 6 bis 10)
Heft 5/2000: Astronomie mit Radiowellen (S. 4 bis 7)
Heft 2/2002: Die Geschichte der Radioastronomie (S. 28 bis 31)
Heft 1/2014: Radioastronomie oder von der Astronomie zur Astrophysik (S. 5 bis 7)
Heft 1/2014: Mit Radioaugen das Weltall entdecken (S. 16 bis 21)
Heft 5/2000: Röntgenastronomie – Grundprinzipien der Beobachtungstechnik (S. 8 bis 11)
Heft 5/2000: Beobachtung kosmischer Gammastrahlung (S. 38 bis 43)
Heft 1/2001: Kosmische Gammastrahlenausbrüche (S. 4 bis 7)
Heft 2/2000: Der kosmische Mikrowellenhintergund (S. 8 bis 11)
Heft 5/2008: Strukturen am Mikrowellenhimmel (S. 10 bis 13)
Heft 2/2000: Die Entschlüsselung des Quasarlichts (S. 20 bis 23)

Kosmos Himmelsjahr:
Kosmos-Himmelsjahr 2011: Ein ehrgeiziges Projekt (E-ELT) (S. 108 bis 112)
Kosmos-Himmelsjahr 2018: Das James-Webb-Weltraumteleskop (S. 64 bis 69)
Kosmos-Himmelsjahr 2014: ALMA und SKA – Radioteleskope der Superlative (S. 226 bis 232)

Sterne und Weltraum, Max-Planck-Gesellschaft:
Heft 1/2010 Eine Nacht im Zentrum der Milchstraße (VLT) (S. 56 bis 65)
Heft 1/2010 Blick ins staubige Universum (ALMA) (S. 34 bis 43)
Heft 1/2010 Interferometrie mit ALMA (S. 44 bis 45)
Heft 1/2010 Ein neues Fenster zum Kosmos – Gamma-Astronomie mit HESS (S. 66 bis 74)

Bild der Wissenschaft:
Heft 9/2013 Der Himmelscode (kosmische Hintergrundstrahlung) (S. 40 bis 51)
Heft 9/2013 Die Achse des Bösen (kosmische Hintergrundstrahlung) (S. 52 bis 59)
Heft 2/2015 Auf Neutrinofang im ewigen Eis (ICECube) (S. 28 bis 31)
Heft 2/2015 Direkter Blick ins Sonnenfeuer (Borexino) (S. 32 bis 34)

Filme:
MAGIC Collaboration: The MAGIC Telescopes - Eyes for the Extreme Universe
ESA: Eyes on the Skies
Robert Zimmermann: Blick in die Sterne - Die Entdeckung des Universums

Themen für Seminararbeiten und Referate:

- **Beobachtung mit erdgebundenen Spiegelteleskopen**
  → Das Very Large Telescope (VLT)
- **Das Hubble Space Weltraumteleskop**
  → Die Hubble Deep Fields –tiefe Einblicke in das Universum
- **Die kosmische Hintergrundstrahlung**
  → Erforschung der kosmischen Hintergrundstrahlung mit dem Planck-Satelliten
- **Radio-Astronomie**
  → ALMA - das große Radio-Teleskop-Array der ESO in der Atacamawüste
- **Röntgen-Astronomie**
  → Der Röntgensatellit Chandra
- **Neutrinos – schnelle Teilchen aus dem All**
  → ICECube - Neutrinoteleskop in der Antarktis
- **Zukünftige Großteleskope und ihre Forschungsaufgaben**
  → Das European Extremely Large Telescope (E-ELT)

III. Das Sonnensystem

1) Entfernungseinheiten für das Sonnensystem

Bereits die Entfernungen zur Sonne und zu den Planeten unseres Sonnensystems sind so groß, dass Entfernungsangaben in den Einheiten Meter oder Kilometer sehr unanschaulich werden. Der äußerste Planet Neptun ist beispielsweise von der Sonne etwa 4,5 Milliarden km entfernt.

Entfernungen innerhalb des Sonnensystems gibt man häufig als Vielfache der **mittleren Entfernung der Erde zur Sonne** an. Diese Längeneinheit heißt **Astronomische Einheit**:

$$\boxed{\mathbf{1\ AE = 1\ Astronomische\ Einheit\ \approx 1,496 \cdot 10^{8}\ km}}$$ *(FS 41)*

Beispiel: Neptun ist 30,1 AE von der Sonne entfernt. *(FS 44)*

Für Objekte außerhalb des Sonnensystems verwendet man die größere Entfernungseinheit

$$\boxed{\mathbf{1\ Lj = 1\ Lichtjahr\ \approx 9,46 \cdot 10^{12}\ km\ \approx 6,324 \cdot 10^{4}\ AE}}$$ *(FS 41)*

Ein Lichtjahr ist die **Länge des Weges, den das Licht im Vakuum in 1 Jahr zurücklegt**.

Wenn zum Ausdruck gebracht werden soll, wie lange das Licht, oder beispielsweise ein Funksignal von einem Raumfahrzeug von einem Ort im Sonnensystem bis zur Erde braucht, verwendet man gelegentlich auch die Einheit **„Lichtsekunde"**:

$$\mathbf{1\ Ls = \frac{1}{31{,}6 \cdot 10^{6}}\ Lj \approx 3,15 \cdot 10^{5}\ km\ \approx 2,00 \cdot 10^{-3}\ AE}$$

Rechenbeispiel: Rechne 1 Lichtjahr in Meter um:

$$v = \frac{s}{t} \Longrightarrow s = v \cdot t \quad \Longrightarrow \quad \mathbf{1\ Lj} = c \cdot 1\ a = 3{,}0 \cdot 10^{8}\ \frac{m}{s} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600\ s \approx \mathbf{9,46 \cdot 10^{15}\ m}$$

Entfernungsbeispiele:

Mond:	1,3 Lichtsekunden
Sonne:	8 Lichtminuten
α-Centauri (nächster Fixstern):	4,34 Lj
Zentrum der Milchstraße:	30000 Lj
Andromeda-Galaxie (nächste von der Nordhalbkugel aus sichtbare Galaxie):	2,5 Millionen Lj
Quasare (entfernteste, heute beobachtbare Objekte):	etwa 10 Milliarden Lj

2) Das Gravitationsgesetz und die Keplerschen Gesetze

Das Gravitationsgesetz:

Zwei Körper ziehen sich grundsätzlich aufgrund ihrer Massen gegenseitig an. Der eine Körper übt jeweils auf den anderen eine gleich große **Gravitationskraft** $\vec{F}_G$ aus. Den Betrag der Gravitationskraft und ihre Abhängigkeit von den Massen (m_1 und m_2) und dem Abstand r der Körper liefert das **Gravitationsgesetz von Isaac Newton**:

$$\boxed{F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}} \qquad \textit{(FS 13)}$$

Dabei ist $G \approx 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$ die **Gravitationskonstante**.

Die Keplerschen Gesetze:

Auf der Grundlage von Messdaten seines Vorgängers **Tycho von Brahe** (1546 bis 1601) entdeckte **Johannes Kepler** (1571 bis 1630, Hofastronom in Prag, vgl. Kap. I, S. 9) drei Gesetze, die die Bewegung der Planeten um die Sonne beschreiben.

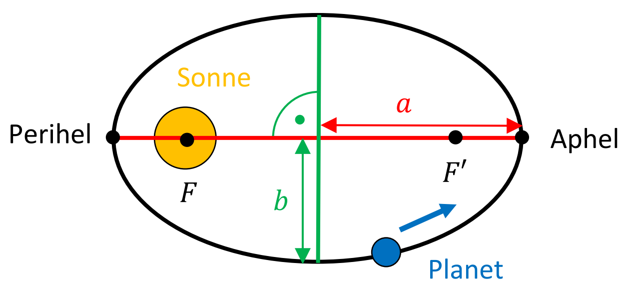
Diese Gesetze lassen sich auf die Bahnen beliebiger Himmelskörper wie Monde, Kometen, aber auch Satelliten und Sonden übertragen.

Das 1. Keplersche Gesetz:

Die Planeten bewegen sich auf Ellipsenbahnen, wobei in einem Brennpunkt die Sonne steht.

Eine **Ellipse** ist der geometrische **Ort aller Punkte, deren Abstände von 2 Punkten (Brennpunkte) zusammen gleich groß sind**.

Demonstration: Die „Gärtnermethode“ zum Zeichnen einer Ellipse.



F, F': **Brennpunkte**

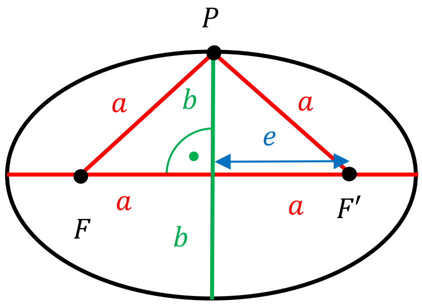
a **= große Halbachse**

b **= kleine Halbachse**

Der sonnennächste Punkt der Ellipsenbahn eines Planeten heißt **Perihel**, der sonnenfernste Punkt **Aphel**.

Bei der elliptischen Bahn einer Sonde übernehmen statt der Sonne die Erde oder ein Planet die Rolle des Massenzentrums in einem der Brennpunkte der Bahnellipse. Der erdnächste Bahnpunkt heißt dann **Perigäum** und der erdfernste Bahnpunkt **Apogäum**.

Die lineare **Exzentrizität e** ist die halbe Entfernung der Brennpunkte.



Weil die Entfernung aller Punkte auf der Ellipse zusammen gleich groß ist (Ellipsendefinition), gilt:

$$\overline{\boldsymbol{FP}} + \overline{\boldsymbol{PF'}} = \boldsymbol{2a} \implies \overline{\boldsymbol{FP}} = \boldsymbol{a} \quad \textit{(FS 12)}$$

Für die **lineare Exzentrizität e** folgt mit dem Satz von Pythagoras:

$$\boxed{\boldsymbol{e^2 = a^2 - b^2}} \qquad \text{(FS 12)}$$

Die lineare Exzentrizität e benötigen wir, um die Periheldistanz und die Apheldistanz eines Planeten von der Sonne bzw. der Sonde von der Erde zu berechnen:

Periheldistanz:	$\boldsymbol{r_P = a - e}$
Apheldistanz:	$\boldsymbol{r_A = a + e}$

Ein Maß für die Abweichung der Ellipsenbahn von einer Kreisbahn ist die **numerische Exzentrizität ε:**

$$\boxed{\boldsymbol{\varepsilon = \frac{e}{a} = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}}} \qquad (FS\ 12)$$

Die numerische Exzentrizität ist das Verhältnis „lineare Exzentrizität : große Halbachse“.
Damit beschreibt die numerische Exzentrizität die **Krümmung der Ellipse**:

Wie man leicht sieht, gilt: $0 \le \varepsilon \le 1$

Grenzfälle:

$\boldsymbol{\varepsilon = 0}$	$\Leftrightarrow \frac{b}{a} = 1$	$\Leftrightarrow a = b$	$\Leftrightarrow$	**Kreisbahn**
$\boldsymbol{\varepsilon \to 1}$	$\Leftrightarrow \frac{b}{a} \to 0$	$\Leftrightarrow a \gg b$	$\Leftrightarrow$	**extrem gekrümmte Ellipsenbahn**

Die numerische Exzentrizität ε der Planetenbahn ist eine der Größen, die in den meisten Datentabellen der Planeten aufgelistet werden. Sie wird in der Regel **Bahnexzentrizität** genannt.

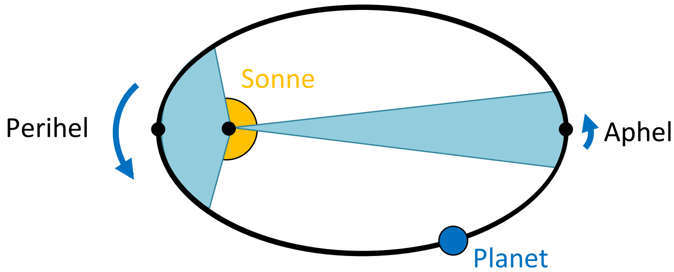
Beispiele für die Exzentrizitäten einiger Planetenbahnen:

Venus: $\varepsilon = 0{,}0067$ $\implies$ nahezu kreisförmige Umlaufbahn um die Sonne
Saturn: $\varepsilon = 0{,}057$ $\implies$ stärkere Bahnkrümmung als bei der Venus
Mars: $\varepsilon = 0{,}094$ $\implies$ für Planetenbahnen relativ stark gekrümmte elliptische Umlaufbahn

Kometenbahnen und Bahnen von Asteroiden sind wesentlich stärker gekrümmt als Planetenbahnen. Die Bahn des Halleysche Kometen besitzt beispielsweise die Exzentrizität $\varepsilon = 0{,}967$.

Das 2. Keplersche Gesetz:

Die Strecke Sonne-Planet überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.



Folgerung 1:

Die Bahngeschwindigkeit des Planeten ändert sich während eines Umlaufs: Je kleiner der Abstand zur Sonne, desto schneller der Planet.

Folgerung 2:

Aphelgeschwindigkeit v_A und **Perihelgeschwindigkeit** v_P eines Planeten verhalten sich umgekehrt zueinander wie die entsprechenden Abstände r_A und r_P des Planeten von der Sonne.

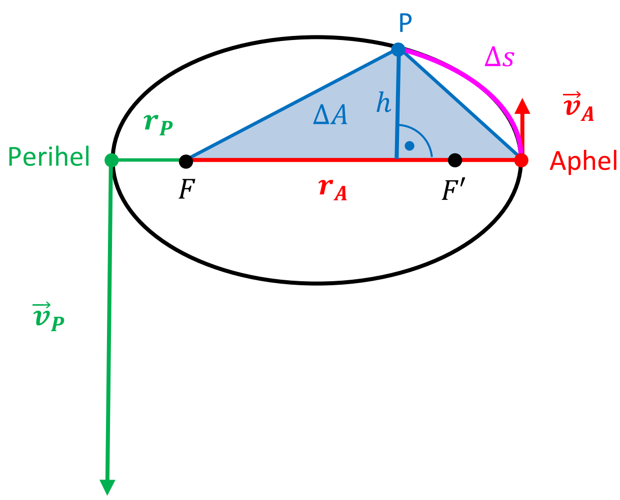
$$\boxed{\frac{v_A}{v_P} = \frac{r_P}{r_A}}$$

Begründung:

Exakte Berechnungen mit Teilflächen von Ellipsen werde schnell sehr unübersichtlich. Deshalb setzten wir in der folgenden Herleitung ein Näherungsverfahren ein: Wir nähern die von der Strecke Sonne – Planet überstrichenen Teilflächen der Bahnellipse durch Dreiecksflächen. Diese Näherung beschreibt die Realität umso besser, je kürzer die betrachteten Zeitabschnitte Δt und damit je kleiner die zurückgelegten Wege Δs sind. Diese Vorgehensweise ist zulässig, weil sich jede Bewegung aus vielen, beliebig kleinen Teilbewegungen zusammensetzen lässt. Um die in die Berechnungen eingehenden geometrischen Eigenschaften des Dreiecks, durch das ein sehr kleines Flächenstück genähert wird, deutlich erkennen zu können, zeichnen wir in der Skizze dennoch ein relativ großes Flächenstück, das zu einem großen Wegstück Δs und einem entsprechend großen Zeitabschnitt Δt gehört.

Für einen kurzen Zeitabschnitt Δt bzw. für einen entsprechend kurzen Wegabschnitt Δs gilt näherungsweise

- Die von der Strecke $[FP]$ überstrichene Teilfläche der Ellipse ist so groß wie die Dreiecksfläche $\Delta A = \frac{1}{2} \cdot r_A \cdot h$
- $\Delta s \approx h$



Mit diesen beiden Näherungen folgt:

$$\Delta A \approx \frac{1}{2} \cdot r_A \cdot \Delta s$$

$$\Longrightarrow \quad \frac{\Delta A}{\Delta t} \approx \frac{1}{2} \cdot r_A \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot r_A \cdot v_A$$

Für das Perihel zeigt man auf entsprechende Weise:

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} \approx \frac{1}{2} \cdot r_B \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot r_B \cdot v_B$$

Nach dem 2. Keplerschen Gesetz ist $\frac{\Delta A}{\Delta t} = konst. \quad \Longrightarrow \quad r_A \cdot v_A = r_P \cdot v_P \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{\frac{v_A}{v_P} = \frac{r_P}{r_A}}$

Rechenbeispiel:

Der Zwergplanet Pluto umläuft die Sonne auf einer Ellipsenbahn mit der numerischen Exzentrizität $\varepsilon = 0{,}26$. Im Aphel seiner Bahn bewegt er sich mit einer Geschwindigkeit von $3{,}57\ \frac{km}{s}$ und ist $49{,}62\ AE$ von der Sonne entfernt.

Berechne Sonnenabstand und Bahngeschwindigkeit des Pluto im Perihel seiner Bahn.

Sonnenabstand im Perihel:

$$\varepsilon = \frac{e}{a} = \frac{r_A - a}{a} \quad \Longrightarrow \quad a = \frac{r_A}{\varepsilon + 1}$$

$$\boldsymbol{r_P} = 2 \cdot a - r_A = 2 \cdot \frac{r_A}{\varepsilon + 1} - r_A = 2 \cdot \frac{49{,}62\ AE}{0{,}26 + 1} - 49{,}62\ AE \approx \boldsymbol{29{,}14\ AE}$$

Bahngeschwindigkeit im Perihel:

$$\frac{v_A}{v_P} = \frac{r_P}{r_A} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{v_P} = \frac{r_A}{r_P} \cdot v_A = \frac{49{,}62\ AE}{29{,}14\ AE} \cdot 3{,}57\ \frac{km}{s} \approx \boldsymbol{6{,}08\ \frac{km}{s}}$$

Das 3. Keplersche Gesetz:

Für zwei verschiedene Planeten gilt:

Die Quadrate der Umlaufzeiten verhalten sich wie die 3. Potenzen der großen Halbachsen.

$$\boxed{\frac{\boldsymbol{T_1}^2}{\boldsymbol{T_2}^2} = \frac{\boldsymbol{a_1}^3}{\boldsymbol{a_2}^3}} \qquad (\boldsymbol{FS\ 12})$$

Insbesondere gilt für die Bahnen aller Himmelskörper, die ein gemeinsames „Zentralgestirn“ umlaufen:

$$\boxed{\frac{\boldsymbol{T^2}}{\boldsymbol{a^3}} = \boldsymbol{konst.}}$$

Diese Konstante hat für jeden Planeten den gleichen Wert; auch für die Erde.
Somit folgt für alle <u>Planeten</u>:

$$\frac{\boldsymbol{T^2}}{\boldsymbol{a^3}} = \frac{(1\ a)^2}{(1\ AE)^3} = 1\frac{a^2}{AE^3} = \frac{(3600 \cdot 24 \cdot 365{,}25\ s)^2}{(1{,}496 \cdot 10^{11}\ m)^3} \approx \boldsymbol{3{,}0 \cdot 10^{-19}}\ \frac{\boldsymbol{s^2}}{\boldsymbol{m^3}}$$

Das 3. Keplersche Gesetz gilt nicht nur für die **Bahnen zweier Planeten um die Sonne**, sondern auch für die **Bahnen zweier Monde um einen Planeten** oder für die **Bahnen zweier Satelliten um die Erde**.
Allerdings hat je nach „Zentralgestirn“ (Sonne, Planet, Erde) die Konstante $\frac{T^2}{a^3}$ unterschiedliche Werte.

Das 3. Keplersche Gesetz lässt sich aus dem Gravitationsgesetz herleiten:

Als Näherung verwenden wir, dass die Planeten sich auf **Kreisbahnen** um die Sonne bewegen. Die große Halbachse a ist dann der mittlere Bahnradius und die Umlaufgeschwindigkeit v ist konstant.

Wenn ein Planet (Masse m_P) sich auf einer Kreisbahn um die Sonne (Masse m_S) bewegt, gilt:

Zentripetalkraft = Gravitationskraft

$$\frac{m_P \cdot v^2}{a} = G \cdot \frac{m_P \cdot m_S}{a^2}$$

$$m_P \cdot \left(\frac{2\pi a}{T}\right)^2 \cdot \frac{1}{a} = G \cdot \frac{m_P \cdot m_S}{a^2}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\boldsymbol{T^2}}{\boldsymbol{a^3}} = \frac{4\pi^2}{G \cdot m_s} = konst. = \frac{4\pi^2}{6{,}673 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot 1{,}989 \cdot 10^{30}\ kg} \approx \boldsymbol{3{,}0 \cdot 10^{-19}}\ \frac{\boldsymbol{s^2}}{\boldsymbol{m^3}}$$

Rechenbeispiel:

Der Saturn bewegt sich auf einer Ellipse mit der großen Halbachse $a = 9{,}56\ AE$ um die Sonne.
Wie lange braucht der Saturn für den Weg vom Aphel zum Perihel?

$$\frac{{T_S}^2}{{a_S}^3} = \frac{{T_E}^2}{{a_E}^3} = 1\,\frac{a^2}{AE^3} \quad \Longrightarrow \quad {T_S}^2 = 1\,\frac{a^2}{AE^3} \cdot {a_S}^3 = 1\,\frac{a^2}{AE^3} \cdot (9{,}56\ AE)^3 \approx 873{,}72\ a^2 \quad \Longrightarrow \quad T_S \approx 29{,}6\ a$$

Von Aphel zu Perihel benötigt Saturn eine halbe Umlaufzeit, also ca. 14,8 Jahre.

3) Der Mond

Erde und Mond im Vergleich:

Der **Durchmesser des Mondes** ist mit $3474\ km$ etwa 3,7-mal kleiner als der Erddurchmesser.

Weil das Kugelvolumen $V_K = \frac{4}{3}R^3\pi$ mit der 3. Potenz des Radius wächst, folgt, dass das **Mondvolumen** etwa 50-mal in das Erdvolumen passt.

Die **Masse des Mondes** beträgt mit $7{,}349 \cdot 10^{22}\ kg$ etwa 1,2% bzw. $\frac{1}{81}$ der Masse der Erde.

Geringere Fallbeschleunigung auf dem Mond:

Die geringere Masse des Mondes führt dazu, dass die Gewichtskraft eines Körpers auf dem Mond nur etwa $\frac{1}{6}$ der Gewichtskraft ist, die der gleiche Körper auf der Erde erfahren würde:

$$\frac{F_{G,M}}{F_{G,E}} = \frac{\frac{G \cdot m_K \cdot m_M}{{R_M}^2}}{\frac{G \cdot m_K \cdot m_E}{{R_E}^2}} = \frac{m_M}{m_E} \cdot \frac{{R_E}^2}{{R_M}^2} \approx \frac{1}{81} \cdot 3{,}7^2 \approx 0{,}17 \approx \frac{1}{6}$$

Damit ist auch die **Fallbeschleunigung** auf dem Mond etwa $\frac{1}{6}$ der Fallbeschleunigung auf der Erde. Die geringere Fallbeschleunigung ermöglicht es Astronauten auf dem Mond, Massen zu heben, die ein Mensch auf der Erde nicht heben könnte. Das erstmals bei der Mondlandemission Apollo 15 (1971) eingesetzte „Mondauto" wog $490\ kg$, konnte aber auf dem Mond von zwei Astronauten gehoben werden.

Bei Astronauten auf dem Mond beobachtet man einen hüpfenden Gang, weil ihr Körper wesentlich weniger stark vom Mond angezogen wird.

> ***Versuch***:
> Hebe zum Vergleich der Gewichtskräfte, die auf einen Körper derselben Masse wirken, einen Aluminiumtopf mit 6 Gewichtsscheiben und mit nur einer Scheibe.

Landschaftsformen auf dem Mond:

Mit bloßem Auge oder - noch wesentlich besser - mit einem Teleskop sind die charakteristischen Landschaftsformen auf dem Mond erkennbar: **Mondmeere** (Maria), **Mondgebirge** und **Mondkrater**. Die Mondkrater sind Meteoritenkrater. Die Mondmeere sind besonders große und alte Meteoritenkrater. Durch den hohen Druck beim Einschlag großer Meteoriten verflüssigte sich das Gestein und sammelte sich im Bereich der Mondmeere an. Die Mondgebirge sind ähnlich hoch, wie die Gebirge auf der Erde: bis zu mehrere 1000 Meter. Die Höhe der Mondberge kann aus dem Schattenwurf berechnet werden.

Ursprung und innerer Aufbau des Mondes:

Man geht heute davon aus, dass der **Mond vor etwa 4,5 Milliarden Jahren gemeinsam mit der Erde entstand**. Vermutlich kollidierte damals ein Himmelskörper von der Größe des Planeten Mars mit der gerade entstehenden Erde. Dabei wurde Material aus der Erdkruste und dem einschlagenden Himmelskörper in eine Erdumlaufbahn geschleudert und verdichtete sich durch Gravitationskräfte zum Mond.

Durch die beim Zusammenstoß freigesetzte Energie und die bei der Verklumpung freiwerdende Gravitationsenergie wurde das Mondmaterial aufgeschmolzen. Bei der Abkühlung bildete sich allmählich um einen flüssigen Magmakern eine feste Kruste. Der in der Frühphase des Mondes flüssige Kern bewirkte (wie heute noch auf der Erde) Vulkanismus und Magnetismus.

Heute besteht der Mond aus einem **eisenhaltigen Kern**, der von einem **Basaltmantel** und einer **Gesteinskruste** umgeben ist. Die Mondoberfläche ist von einer unterschiedlich dicken Schicht aus Mondstaub (**Regolith**) bedeckt, der aus bei unzähligen Meteoriteneinschlägen zu Sand pulverisiertem Mondgestein besteht.

Das Wissen über den inneren Aufbau des Mondes beruht im Wesentlichen auf der Vermessung künstlich erzeugter Mondbeben mithilfe der vier bei **Apollomissionen** (1969 bis 1972) auf dem Mond installierten **Seismometer** und Messergebnissen von Sonden wie **Clementine** (1994) und **Lunar-Prospector** (1998 bis 1999). Diese Sonden erforschten das Gravitationsfeld des Mondes und suchten nach Hinweisen auf Vorkommen von Wassereis.

Fehlende Atmosphäre auf dem Mond:

Der für die Lebensbedingungen auf dem Mond entscheidende Unterschied zwischen Mond und Erde ist aber das Fehlen einer Atmosphäre. Weil der Mond keine Atmosphäre besitzt, gibt es dort **keinen Wind**, **keinen Regen** und, was ein Überleben auf dem Mond verhindern würde, **keine Luft** und damit auch **keinen Luftdruck**.

Die fehlende Atmosphäre führt insbesondere zu **extremen Temperaturen und Temperaturschwankungen** auf dem Mond: Auf der sonnenzugewandten Seite heizt sich der Mond auf bis zu $\mathbf{100°}\boldsymbol{C}$ auf. Während der Mondnacht sinkt die Temperatur auf bis zu $-\mathbf{150°}\boldsymbol{C}$.

Weitere lebensfeindliche Auswirkungen der fehlenden Atmosphäre sind, dass die Mondoberfläche der **radioaktiven Strahlung** aus dem Weltall ungeschützt ausgesetzt ist.

Personen auf dem Mond würden zudem ständig Gefahr laufen, von **Mikrometeoriten** aber auch von größeren Gesteinsbrocken getroffen zu werden.

Der Mond besitzt **kein Magnetfeld** und somit **keinen Schutz gegen den Sonnenwind**, einem von der Sonne ausgehenden Strom energiereicher elektrisch geladener Teilchen (vgl. Kap. IV, S. 173).

Die Bewegung von Erde und Mond um den gemeinsamen Schwerpunkt:

Zwei durch die Gravitationskraft aneinander gebundene Himmelskörper bewegen sich grundsätzlich auf **zwei Ellipsenbahnen, bei denen jeweils der gemeinsame Schwerpunkt in einem gemeinsamen Brennpunkt steht**.

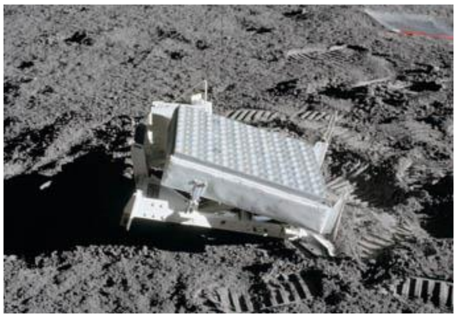
Man sagt: Die beiden Körper bilden ein **Zweikörpersystem**. Die Aufgabe, die Bewegung zweier Himmelskörper um den gemeinsamen Schwerpunkt zu berechnen, wird häufig als **Zweikörperproblem** bezeichnet.

Je größer der Massenunterschied der beiden Körper ist, desto näher rückt der gemeinsame Schwerpunkt zum Schwerpunkt des schwereren Körpers. Bei der Bewegung eines Planeten um die viel schwerere Sonne kann also in guter Näherung der Sonnenmittelpunkt als gemeinsamer Schwerpunkt betrachtet und die Bewegung der Sonne vernachlässigt werden.

Wenn die beiden Körper aber vergleichbare Massen haben (z.B.: Erde und Mond, Pluto und Charon), tritt auch der Umlauf des schwereren „Zentralkörpers" um den gemeinsamen Schwerpunkt deutlich in Erscheinung.

Die Bahn des Mondes:

Die große Halbachse der Ellipsenbahn des Mondes ist $384\,392\ km$ lang. Die numerische Exzentrizität der Mondbahn hat den Wert $\varepsilon = 0{,}055$.
Die Entfernung des Mondes (gemessen vom Erd- zum Mondmittelpunkt) schwankt zwischen $356\,410\ km$ (**Perigäum**) und $406\,740\ km$ (**Apogäum**).



Seit 1969 im Rahmen der Apollo 11-Mission auf dem Mond ein Reflektor (Abbildung links) aufgestellt wurde, der einen von der Erde ausgesandten Laserstrahl reflektiert, lässt sich die Mondentfernung durch Laufzeitmessungen auf $10\ cm$ genau messen.

Für Berechnungen mit Kreisbahnnäherung verwenden wir als **mittleren Bahnradius des Mondes** $\boldsymbol{r_{EM} = 384\,400\ km}$.

Das Zweikörperproblem mit Anwendung auf das System Erde - Mond:

Experiment:

Lässt man eine Stativstange, an deren Enden Tonnenfüße in veränderlicher Anzahl befestigt sind, am Boden rotieren, so erkennt man, dass der Mittelpunkt der Rotationsbewegung stets mit dem Schwerpunkt der Anordnung zusammenfällt.

Insbesondere erkennt man, dass der Abstand r eines Körpers im Zweikörpersystem umgekehrt proportional zu seiner Masse m ist; also: $\frac{r_1}{r_2} = \frac{m_2}{m_1}$.

Es folgt die **Schwerpunktgleichung:** $\boxed{\boldsymbol{m_1 \cdot r_1 = m_2 \cdot r_2}}$

Weil der Aufbau der Formel dem Hebelgesetz $m_1 \cdot g \cdot r_1 = m_2 \cdot g \cdot r_2$ entspricht, heißt die Schwerpunktgleichung auch „**Kosmisches Hebelgesetz**".

Das 3. Keplersche Gesetz, angewendet auf das Zweikörperproblem:

Für die Bewegung eines Körpers der Masse m um einen viel schwereren Körper der Masse M haben wir mithilfe des Gravitationsgesetzes bereits auf S. 83 hergeleitet:

$$\boldsymbol{\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M} = konst.}$$

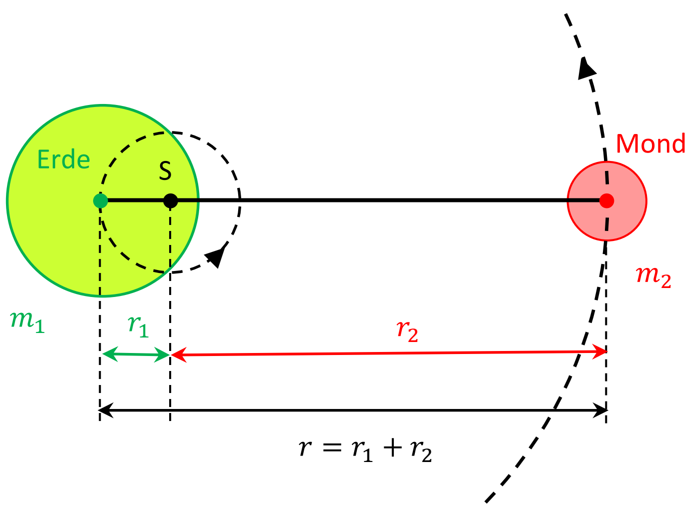
Wenn die beiden Körper vergleichbare Massen m_1 und m_2 haben, gehen beide Massen in die Konstante ein.

- Wir leiten das 3. Keplersche Gesetz für die Bewegung des Körpers 1 eines Zweikörpersystems um den gemeinsamen Schwerpunkt S her. Dabei verwenden wir die Kreisbahnnäherung.

Zentripetalkraft = Gravitationskraft

$$\frac{m_1 \cdot {v_1}^2}{r_1} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$$m_1 \cdot \left(\frac{2 \cdot r_1 \cdot \pi}{T_1}\right)^2 \cdot \frac{1}{r_1} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$



Mit der Schwerpunktgleichung folgt:

$$r_2 = \frac{m_1}{m_2} \cdot r_1$$

$$\Longrightarrow \quad r = r_1 + r_2 = r_1 + \frac{m_1}{m_2} \cdot r_1 = r_1 \cdot \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) = r_1 \cdot \left(\frac{m_1 + m_2}{m_2}\right) \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{r_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot r}$$

Damit finden wir die **Lage des gemeinsamen Schwerpunkts des Systems Erde – Mond**:

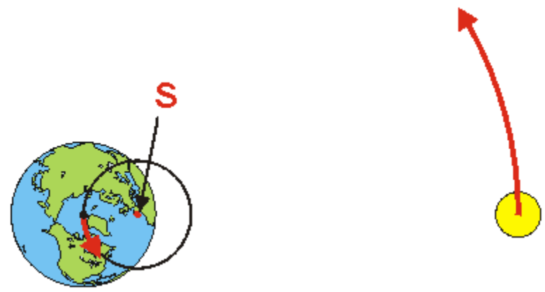
$$r_E = \frac{m_M}{m_E + m_M} \cdot r_{EM} \approx \frac{m_M}{81 \cdot m_M + m_M} \cdot r_{EM} \approx \frac{1}{82} \cdot r_{EM} \approx \frac{1}{82} \cdot 384\,400\ km \approx 4688\ km$$

Der mittlere Erdradius R_E beträgt $6371\ km$ *(FS 43)*.

Es folgt:

$$\frac{r_E}{R_E} \approx \frac{4688\ km}{6371\ km} \approx 0{,}74 \approx \frac{3}{4}$$

Der gemeinsame Schwerpunkt S von Erde und Mond liegt demnach im Inneren der Erde. Er ist etwa $\frac{3}{4}$ des Erdradius R_E vom Erdmittelpunkt entfernt.



Beide Körper rotieren in der gleichen Zeit $\boldsymbol{T_1 = T_2 = T}$ jeweils einmal um den gemeinsamen Schwerpunkt.

Damit gilt:

$$m_1 \cdot \left(\frac{2 \cdot r_1 \cdot \pi}{T_1}\right)^2 \cdot \frac{1}{r_1} = m_1 \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot r_1 = m_1 \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot r = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Es folgt die **Formulierung des 3. Keplerschen Gesetzes für Zweikörperprobleme:**

$$\boxed{\boldsymbol{\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot (m_1 + m_2)} = konst.}} \qquad (FS\ 13)$$

Für den gemeinsamen Umlauf von Monde und Erde um den gemeinsamen Schwerpunkt erhalten wir:

$$\boldsymbol{\frac{T^2}{r^3}} = \frac{4\pi^2}{G \cdot (m_E + m_M)} = \frac{4\pi^2}{6{,}673 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot (5{,}974 \cdot 10^{24}\ kg + 7{,}349 \cdot 10^{22}\ kg)} \approx \boldsymbol{9{,}8 \cdot 10^{-14}\ \frac{s^2}{m^3}}$$

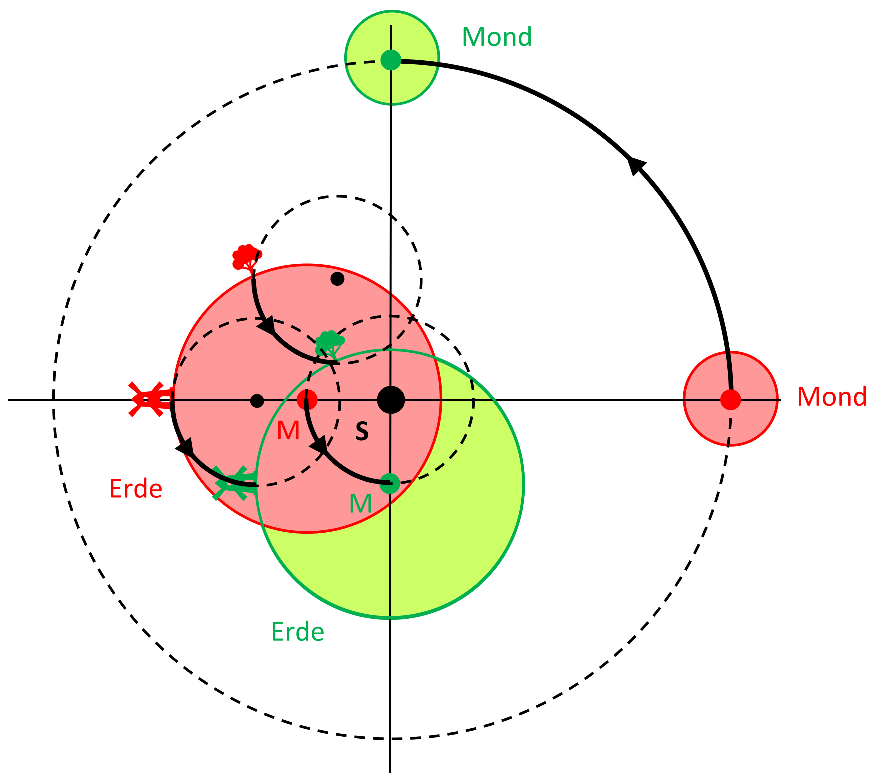
(Vgl. mit dem auf S. 83 berechneten Wert $\frac{T^2}{a^3} \approx 3{,}0 \cdot 10^{-19}\ \frac{s^2}{m^3}$ für die Umlaufbahnen der Planeten um die Sonne!)

Die Entstehung der Gezeiten auf der Erde:

Wer schon einmal im Urlaub auf einer Nordseeinsel war, kennt das Phänomen der Gezeiten. Zweimal pro Tag wechseln Ebbe und Flut (Niedrigwasser und Hochwasser). Der Grund für die Gezeiten ist der gemeinsame Umlauf von Mond und Erde um den gemeinsamen Schwerpunkt.

Wir machen uns im Folgenden klar, wie Ebbe und Flut entstehen. Dabei verwenden wir folgende **Näherungen**:

- Kreisbahnnäherung für die Umlaufbahnen von Erde und Mond um den gemeinsamen Schwerpunkt
- Faktoren wie unterschiedliche Meerestiefen, unterschiedliche Küstenformationen, zusätzliche Schwingungen der Wassermassen u.a., die die Gezeiten an einem bestimmten Ort stark beeinflussen, werden vernachlässigt.



Schritt 1:

- *Vorerst soll von der Eigenrotation der Erde abgesehen werden*, das heißt, die Richtungen auf der Erde relativ zum Fixsternhimmel sollen sich nicht ändern.

Erde und Mond beschreiben jeweils Kreisbewegungen um den gemeinsamen Schwerpunkt **S**, der ca. einen $\frac{3}{4}$ Erdradius vom Erdmittelpunkt entfernt im Erdinneren liegt.

Obenstehende Zeichnung zeigt, dass **alle Punkte der Erde** sich dabei auf **Kreisbahnen mit gleichen Radien aber verschiedenen Mittelpunkten** bewegen.

Nur der **Erdmittelpunkt M** bewegt sich auf einer **Kreisbahn mit dem Schwerpunkt S als Mittelpunkt**.

Schritt 2:

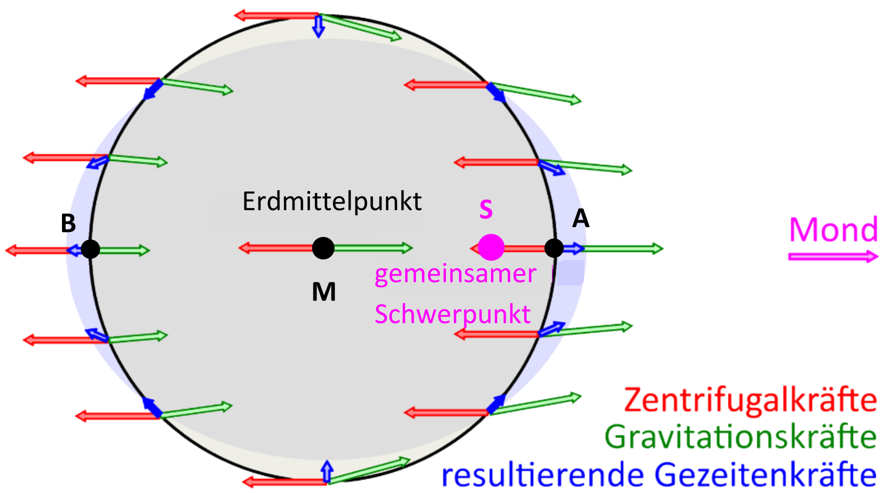
Kräfte auf die Masseteilchen der Erde (insbesondere auf die Wasserteilchen der Meere!):

Auf alle Masseteilchen der Erde wirken wegen der gleich großen Kreisbahnradien **gleich große Zentrifugalkräfte (= Fliehkräfte)**. Diese sind immer parallel zur Verbindungsgeraden der Mittelpunkte von Erde und Mond und vom Mond weggerichtet.

Auf alle Massenteilchen der Erde wirkt in Richtung zum Mond hin die **Gravitationskraft des Mondes**. Weil die Masseteilchen an verschiedenen Stellen der Erde verschiedene Entfernungen vom Mond haben, sind die Gravitationskräfte auf diese Masseteilchen **unterschiedlich groß**.

Während sich im Erdmittelpunkt M die Zentrifugalkraft und die Gravitationskraft gegenseitig aufheben, überwiegt auf der dem Mond zugewandten Seite die Gravitationskraft, auf der mondabgewandten Seite hingegen die Zentrifugalkraft.

Für die Gezeitenwirkung sind die **resultierenden Kräfte von Zentrifugalkraft und Gravitationskraft** des Mondes auf die Wassermassen verantwortlich. Die resultierenden Kräfte erhält man im Allgemeinen wegen der unterschiedlichen Richtungen von Zentrifugalkraft und Gravitationskraft als **Vektorsummen** der beiden Kräfte.



In den Punkten A und B (obige Abbildung) sind die Beträge der resultierenden Kräfte besonders groß. Allerdings können die resultierenden Kräfte auf die Wasserteilchen gerade in diesen beiden Punkten nichts bewirken, weil sie gegen die um ein Vielfaches größere Schwerkraft der Wasserteilchen wirken.

- Wenn die in A und B wirkenden resultierenden Kräfte die Wassermassen der Weltmeere zu Flutbergen anheben könnten, dann würden sie uns auch den Kaffee aus der Tasse ziehen!

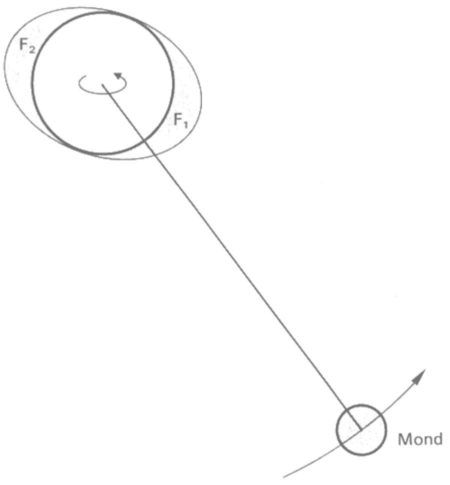
Für alle anderen Punkte auf der Erdoberfläche muss man die resultierende Kraft vektoriell in eine **Vertikalkomponete $\vec{F}_V$ senkrecht von der Erdoberfläche weg** und eine **Horizontalkomponete $\vec{F}_H$ parallel zur Erdoberfläche** zerlegen.

Die Vertikalkomponete $\vec{F}_V$ ist immer viel kleiner als die Schwerkraft, die die Erde auf die Wasserteilchen ausübt. Sie verursacht damit keine beobachtbare Wirkung.

Die **Horizontalkomponenten $\vec{F}_H$** verschieben die Wassermassen parallel zur Erdoberfläche. Sie drängen das Wasser im Bild von Ober- und Unterseite der Erde weg in Richtung der Punkte A und B und **erzeugen zwei Flutberge** bei den Punkten A und B.

Schritt 3:

Nun berücksichtigen wir auch die Erdrotation:



Die Erde dreht sich aufgrund ihrer Eigenrotation unter den beiden Flutbergen hinweg, so dass die Flutberge wandern. Durch die Reibung werden die Flutberge etwas mitgezogen.

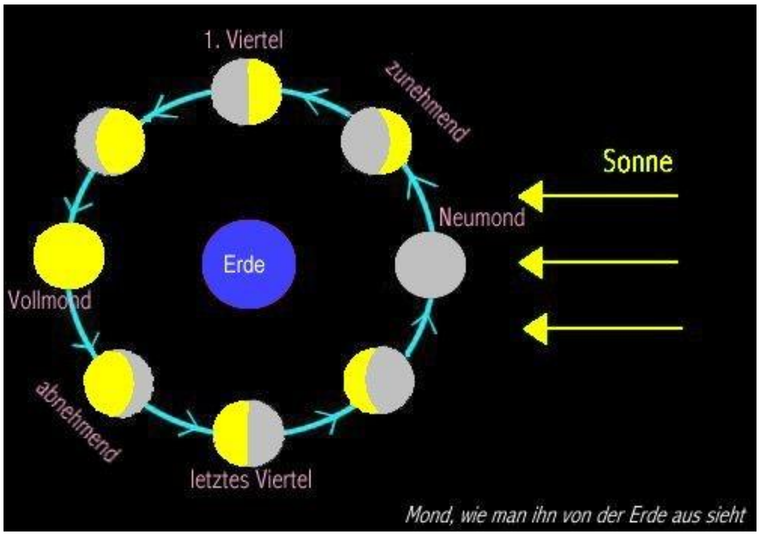
Die Gezeitenreibung bewirkt eine langsame Abbremsung der Erdrotation.

Zusätzlich übt auch die Sonne eine Gezeitenwirkung aus, die aber nur rund 40% von der Gezeitenwirkung des Mondes beträgt. Bei Voll- und Neumond, das heißt, wenn Sonne, Erde und Mond ungefähr auf einer Geraden liegen, addieren sich die Gezeitenwirkungen von Mond und Sonne; es entsteht die sogenannte **Springflut**.

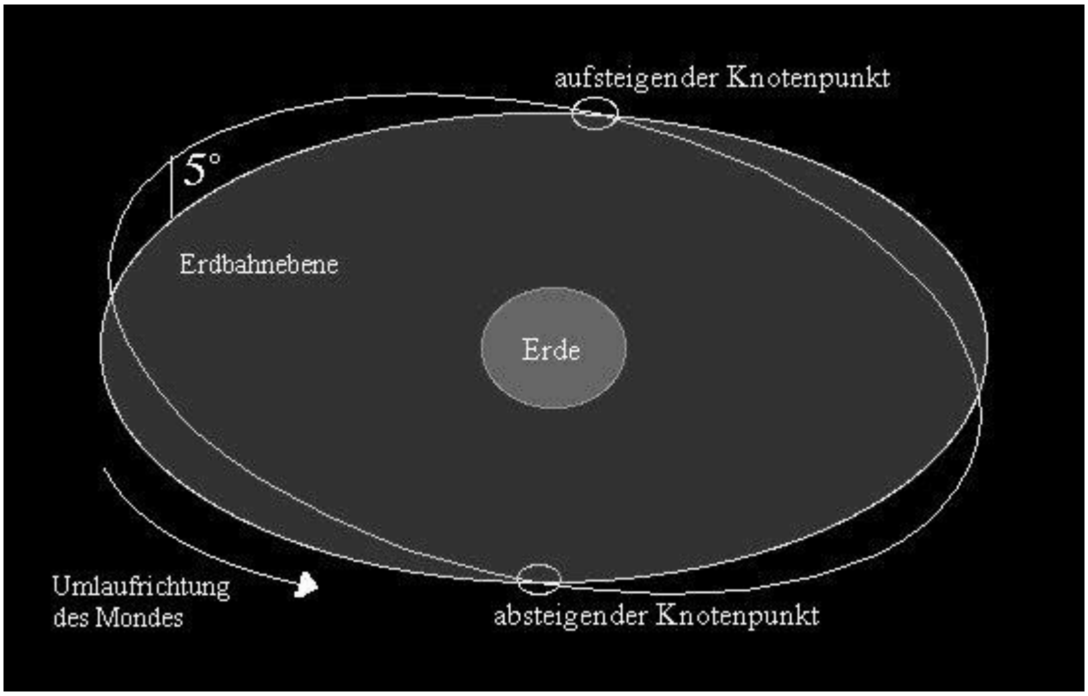
Beim ersten und letzten Viertel des Mondes wirken die Einflüsse in zueinander senkrechten Richtungen. Es entsteht die wenig hohe **Nippflut**.

Mondphasen und Mondfinsternis:

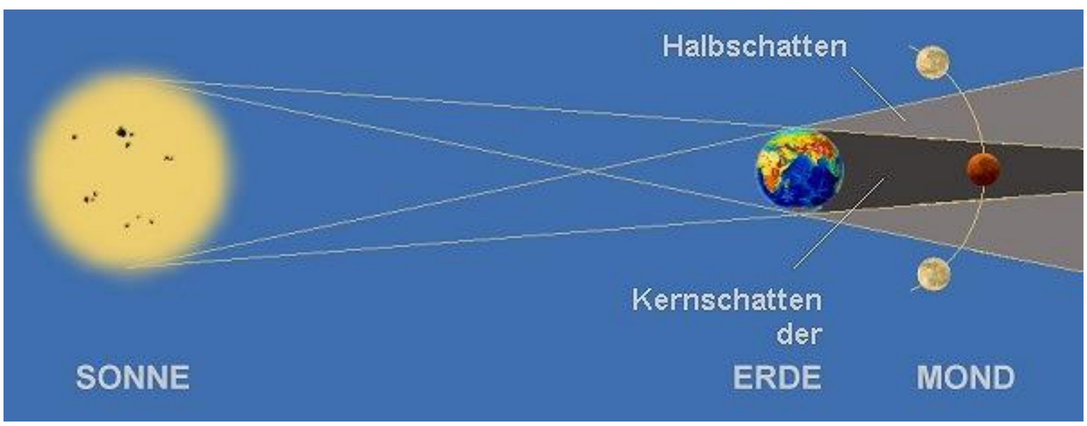
Die Mondphasen kommen zustande, weil die Sonne den Mond während seines Laufs um die Erde aus unterschiedlichen Richtungen anstrahlt: Bei Vollmond steht die Erde zwischen Sonne und Mond, so dass der Mond voll angestrahlt wird. Bei Neumond steht der Mond zwischen Sonne und Erde, so dass der Mond „von hinten“ bestrahlt wird, von der Erde aus also unsichtbar bleibt. Bei Halbmond fällt das Sonnenlicht von der Erde aus gesehen streifend auf den Mond.



Die Mondbahn ist gegenüber der Erdbahn bzw. gegenüber der Ekliptik um einen Winkel von 5°9' geneigt. Die beiden Punkte, in denen sich die Mondbahn und die Umlaufbahn der Erde um die Sonnen schneiden, heißen **Knotenpunkte**.



Eine **Mondfinsternis** tritt auf, wenn Sonne, Erde und Mond auf einer Linie liegen. Dazu muss sich der Mond gerade auf einer Knotenlinie von Mond- und Erdbahn befinden.
Mondfinsternisse sind auf der ganzen von der Sonne abgewandten Erdhalbkugel beobachtbar.



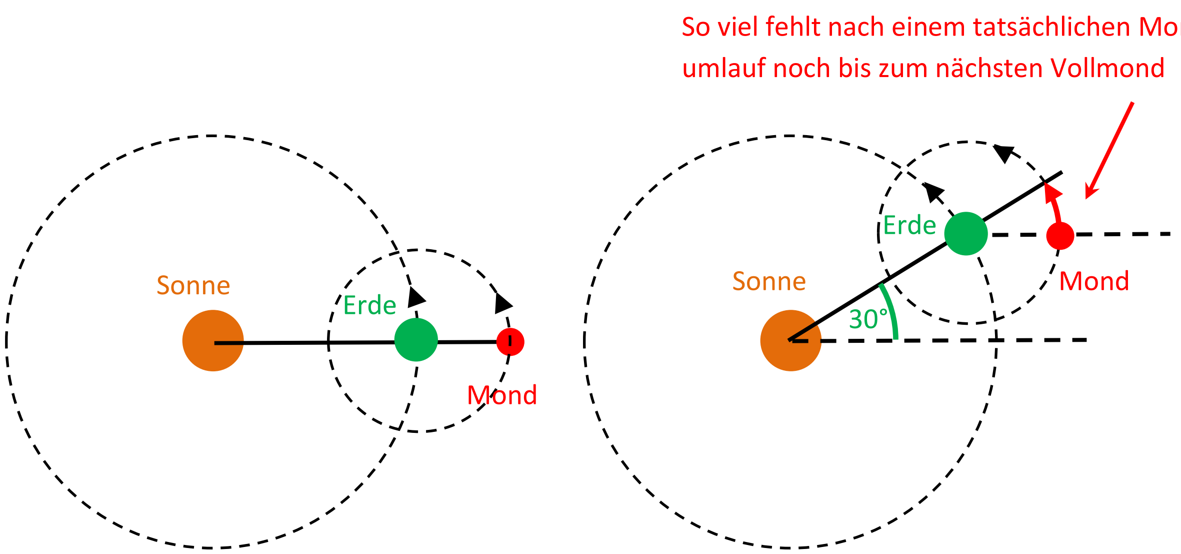
Die nächste von Memmingen aus beobachtbare totale Mondfinsternis findet am 27. Juli 2018 statt.

Siderische und synodische Umlaufdauer des Mondes:

Die Zeitangabe „Monat“ kommt von „Mond“. Ein Umlauf des Mondes um die Erde dauert ungefähr einen Monat. Weil sich die Erde während eines Mondumlaufs auf ihrer Bahn um die Sonne um einen Winkel von etwa 30° weiterbewegt, muss man allerdings zwischen der tatsächlichen Umlaufdauer des Mondes um die Erde und dem zeitlichen Abstand zweier aufeinanderfolgender gleicher Mondphasen (z.B. Vollmondphasen) unterscheiden.

Die tatsächliche Umlaufdauer des Mondes heißt **siderischer Monat** und ist etwa zwei Tage kürzer als die scheinbare Umlaufdauer (zeitlicher Abstand zwischen zwei Vollmondphasen). Die scheinbare Umlaufdauer des Mondes um die Erde heißt **synodischer Monat**.

tatsächliche Umlaufdauer:	$\boldsymbol{T_{sid} = 27,32166\ d}$	**(siderischer Monat)**
scheinbare Umlaufdauer:	$\boldsymbol{T_{syn} = 29,53\ d}$	**(synodischer Monat)**



Von der Erde aus gesehen wandert der Mond während eines synodischen Monats T_{syn} einmal um die Erde. Dass ein synodischer Monat T_{syn} länger dauert, als der siderische Monat T_{sid}, hat zur Folge, dass der Mond von Tag zu Tag um etwa 50 Minuten später aufgeht.

Begründung:

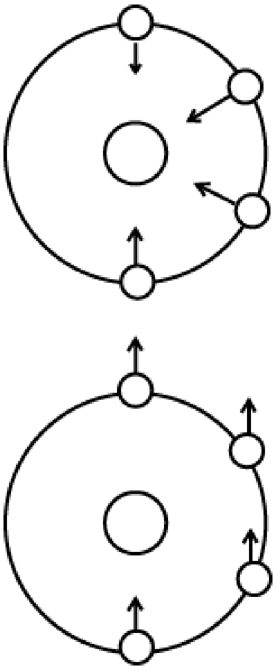
T_{syn} ist gerade die Zeit zwischen zwei Vollmonden. Der Mondaufgang „verspätet“ sich also so lange jeden Tag etwas mehr, bis Sonne, Erde und Mond wieder auf einer Linie stehen. Während eines synodischen Monats T_{syn} verspätet sich der Mond somit um 24 h.

24 h auf $T_{syn} = 29{,}53\ d$ verteilt ergibt eine Aufgangsverzögerung von

$$\frac{24 \cdot 60\ min}{29{,}53\ d} \approx 48{,}8\ \frac{min}{d} \approx 50 \text{ Minuten pro Tag.}$$

Gebundene Rotation des Mondes:

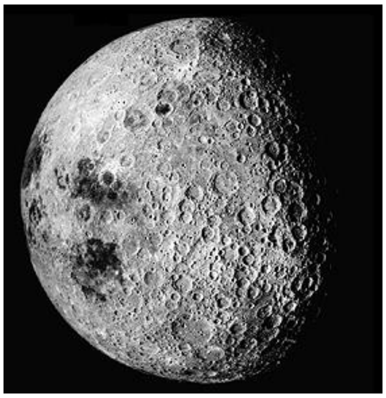
Weil Mond- und Erdachse parallel sind und der Mond sich während einer synodischen Umlaufzeit genau einmal um seine Achse dreht, ist von der Erde aus immer nur dieselbe Seite des Mondes sichtbar.



Die Bewegung eines Mondes um einen Planeten, bei der immer dieselbe Seite des Mondes zum Planeten gerichtet ist, nennt man **einfach gebundene Rotation**.

Die Skizze rechts zeigt oben eine einfach gebundene Rotation und unten die Situation, die wir beobachten würden, wenn der Mond seine Ausrichtung im Raum während seines Umlaufs um die Erde nicht ändern würde.

Das Foto zeigt die von der Erde aus nicht sichtbare **Rückseite des Mondes**. Sie wurde während eines Apollo-Fluges fotografiert.



4) Raumfahrt zum Mond

Bereits 1865 beschrieb der französische Schriftsteller **Jules Verne** in seinem Roman **Von der Erde zum Mond** einen bemannten Flug zum Mond. Erstaunlicherweise erwähnt Jules Verne viele Details, die mehr als 100 Jahre später bei der Apollo 11-Mission umgesetzt wurden.

Jules Verne schreibt *„Um auf den Mond fliegen zu können, muss zuerst die Anziehung der Erde überwunden werden. Dazu ist eine sehr hohe Geschwindigkeit, 11 km in der Sekunde, nötig.“*

Er berücksichtigt weiter den Wechsel von der überwiegenden Anziehung durch die Erde in die überwiegende Anziehung durch den Mond und macht sich Gedanken über den Zustand der Schwerelosigkeit an dem Punkt der Flugbahn, wo sich die Anziehungskräfte von Erde und Mond gegenseitig aufheben: *„Die Fahrt verlief weiter sehr ruhig, bis sie den Punkt erreichten, an dem sich die Anziehungskräfte von Erde und Mond gerade aufheben: den neutralen Punkt. […] Gegenstände blieben an der Stelle, an der man sie losgelassen hatte, und fielen nicht zu Boden. Doch der Zustand dauerte nur kurz. Bald drehte sich die Kapsel und der Sturz auf den Mond begann.“*

Im Roman von Jules Verne wird die Raumkapsel mit einer Kanone zum Mond geschossen. 1969 verwendete man eine Rakete als Transportmittel zum Mond.

Interessanterweise wählt Jules Verne den Startplatz für seinen Mondflug in Florida, von wo 100 Jahre später tatsächlich die erste bemannte Raumkapsel mit einer Saturn 5-Rakete startete.

Die Fluchtgeschwindigkeit

Jules Verne schreibt, dass, wenn ein Raumfahrzeug wie eine Kanonenkugel ins Weltall katapultiert würde, eine Startgeschwindigkeit von $11\ \frac{km}{s}$ nötig sei, um den Anziehungsbereich der Erde zu verlassen.

Diese Geschwindigkeit heißt **Fluchtgeschwindigkeit**.

Wir berechnen im folgenden Abschnitt diese Fluchtgeschwindigkeit und überlegen dann, ob Jules Verne mit seinem Wert von $11\ \frac{km}{s}$ richtig lag.

In diesem Abschnitt verwenden wir noch die grobe **Näherung**, dass der Rakete die **gesamte benötigte Energie im Augenblick des Starts mitgegeben** wird. Sie soll also sofort nach dem Start ihre Endgeschwindigkeit erreichen. Tatsächlich dauert der Beschleunigungsvorgang bis zur Endgeschwindigkeit bei Großraketen mehrere Minuten und erfolgt in mehreren Stufen.

Zuerst betrachten wir die **Gewichtskraft einer Rakete in Abhängigkeit von der Flughöhe**:

- Bei einem Körper der Masse m in geringer Höhe h über der Erdoberfläche kann man von einer höhenunabhängigen Gewichtskraft F_G ausgehen:

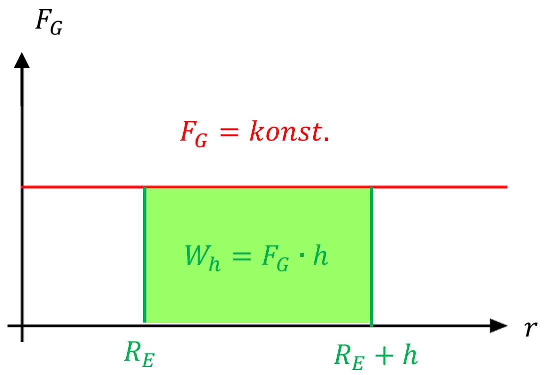
$$F_G = m \cdot g$$

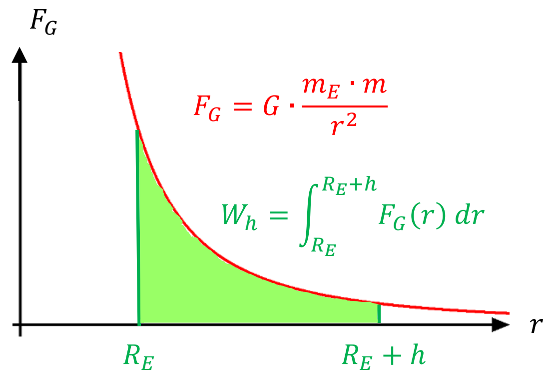
- Bei einer Rakete mit großer Flughöhe h über der Erdoberfläche muss man die **Höhenabhängigkeit der Gravitationskraft** berücksichtigen:

$$F_G = G \cdot \frac{m_E \cdot m}{r^2} = G \cdot \frac{m_E \cdot m}{(R_E + h)^2}$$

  Dabei sind r der Abstand vom Erdmittelpunkt und R_E der Erdradius.

Geometrisch kann man die **Hubarbeit W_h als Fläche unter dem r-F-Diagramm** betrachten.





- Bei konstanter Gewichtskraft F_G ist diese Fläche eine Rechtecksfläche:

$$W_h = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot h$$

- Die Fläche unter dem gekrümmtem r-F_G-Diagramm im Gravitationsfeld der Erde berechnen wir, indem wir die Gravitationskraft F_G integrieren:

$$W_h = \int_{R_E}^{R_E+h} F_G(r)\, dr = \int_{R_E}^{R_E+h} G \cdot \frac{m_E \cdot m}{r^2}\, dr = G \cdot m_E \cdot m \cdot \left[-\frac{1}{r}\right]_{R_E}^{R_E+h} = -G \cdot m_E \cdot m \cdot \left(\frac{1}{R_E + h} - \frac{1}{R_E}\right)$$

$$\Rightarrow \boxed{\boldsymbol{W_h = G \cdot m_E \cdot m \cdot \left(\frac{1}{R_E} - \frac{1}{R_E + h}\right)}}$$

Dabei sind $G = 6{,}674 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$ die Gravitationskonstante, $m_E = 5{,}974 \cdot 10^{24}\ kg$ die Masse der Erde, m die Masse des Körpers, für den die Hubarbeit berechnet wird, $R_E = 6371\ km$ der mittlere Erdradius und h die Höhe über der Erdoberfläche.

Startgeschwindigkeit v_0 einer Rakete:

Nach dem Energieerhaltungssatz stammt die Hubarbeit, die nötig ist, um eine Rakete in die Höhe h zu bringen, aus der Bewegungsenergie der Rakete beim Start:

$$E_{kin} = W_h \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2} m {v_0}^2 = G \cdot m_E \cdot m \cdot \left(\frac{1}{R_E} - \frac{1}{R_E + h}\right)$$

Damit folgt für die **Startgeschwindigkeit**:

$$\boxed{v_0 = \sqrt{2 \cdot G \cdot m_E \cdot \left(\frac{1}{R_E} - \frac{1}{R_E + h}\right)}}$$

Die Fluchtgeschwindigkeit:

Die Gravitationskraft der Erde auf die Rakete verschwindet theoretisch erst in unendlich großer Entfernung. Somit ist die **Fluchtgeschwindigkeit v_F die Grenzgeschwindigkeit, bei der die Flughöhe h unendlich groß wird**.

In diesem Fall verschwindet aber der Bruch $\frac{1}{R_E+h}$ in der Klammer unter der Wurzel.

Für die **Fluchtgeschwindigkeit v_F** folgt:

$$\boxed{\boldsymbol{v_F = \sqrt{2 \cdot G \cdot m_E \cdot \frac{1}{R_E}} = 11{,}2\ \frac{km}{s}}}$$

Beachte:

Die Fluchtgeschwindigkeit ist unabhängig von der Masse der Rakete immer gleich groß.

Dies liegt an der Herleitung über die Energieerhaltung: Eine schwerere Rakete hat bei gleicher Geschwindigkeit eine größere Bewegungsenergie als eine leichte Rakete!

Um den Anziehungsbereich der Erde verlassen zu können, müsste die Raumkapsel von Jules Verne mit einer Geschwindigkeit von 11,2 $\frac{km}{s}$ abgeschossen werden. Eine Raumkapsel, die zum Mond fliegen soll, muss lediglich den Abstand von der Erde erreichen, in dem sich die Anziehungskräfte von Erde und Mond gegenseitig aufheben, einen sogenannten **Lagrange-Punkt** (vgl. Kap. IV, S. 175). Außerdem wird sie ständig auch vom Mond angezogen. Je näher sie dem Mond kommt, desto stärker. Deshalb ist die nötige Startgeschwindigkeit etwas geringer als 11,2 $\frac{km}{s}$. Die Masse des Mondes und damit auch die Anziehungskraft, die er auf die Raumkapsel ausübt, ist allerdings nur etwa $\frac{1}{81}$ der Anziehungskraft, die die Erde im gleichen Abstand auf die Raumkapsel ausübt (vgl. S. 79). Mit 11 $\frac{km}{s}$ liegt Jules Verne richtig.

Die Entwicklung einer Rakete für den Flug zum Mond:

Um ein Raumschiff aus dem Anziehungsbereich der Erde heraus und in eine Umlaufbahn des 384 400 km entfernten Mondes zu bringen, benötigt man eine **äußerst leistungsstarke Rakete**. Eine solche Rakete zu entwickeln, war eine der größten technischen Herausforderungen, die vor einem Flug zum Mond bewältigt werden mussten.

Der ersten bemannten Mondlandung am 20. Juli 1969 ging eine Entwicklungsphase voraus, die genau genommen bereits während des zweiten Weltkrieges begann:
Der Deutsche Raketenforscher **Wernher von Braun** (1912 bis 1977) entwickelte Ende der 1930er und am Anfang der 1940er Jahre im Auftrag des Naziregimes die **A4-Rakete** als Kriegswaffe.

Nach Ende des Krieges nutzten sowohl die USA als auch die Sowjetunion erbeutete A4-Raketen als Vorlagen für ihre eigenen Raketenentwicklungen.

Die USA erkannten die genialen Fähigkeiten Wernher von Brauns und machten ihn nach dem Krieg zum Leiter des amerikanischen Raumfahrtprogramms.

Die Zeit nach dem Ende des zweiten Weltkrieges bis zum Fall des „Eisernen Vorhangs“ 1989 war geprägt von einem schwelenden Konflikt zwischen den Supermächten USA und Sowjetunion. In dieser Zeit des „**Kalten Krieges**“ produzierten beide Seiten in ungeheurem Ausmaß Waffensysteme, insbesondere Kernwaffen, um den Gegner abzuschrecken.

Die Raketenentwicklung spielte dabei eine bedeutende Rolle, weil Interkontinentalraketen zum potenziellen Transport von Atomsprengköpfen benötigt wurden und mithilfe von Raketen militärische Beobachtungssatelliten in Erdumlaufbahnen transportiert werden konnten.

Zwischen den USA und der Sowjetunion entbrannte vor dem Hintergrund des Kalten Krieges ein Wettstreit um die Vormachtstellung im Weltraum. Dafür wurden ungeheure finanzielle Mittel eingesetzt. Erfolge im Raumflug wurden von beiden Seiten intensiv für Propagandazwecke genutzt.

Unter diesem Aspekt ist auch das ehrgeizige Ziel einer **bemannten Mondlandung** zu sehen, das von beiden Seiten verfolgt wurde.

Sowohl in den USA als auch in der Sowjetunion stand jeweils eine Person an der Spitze des Raumfahrtprogramms: Wernher von Braun in den USA und **Sergej Koroljow** (1907 bis 1966) in der Sowjetunion.

Die beiden Supermächte gingen allerdings grundsätzlich unterschiedliche Wege bei der Entwicklung von Raumfahrt und Raketentechnik:

In der Sowjetunion war die Raumfahrt ausschließlich Aufgabe des Militärs und unterlag strengster Geheimhaltung. Misserfolge wurden konsequent verschwiegen. Erfolge wurden propagandistisch ausgeschlachtet.

In den USA wurde **1958** mit der Gründung der **NASA** als ziviler Raumfahrtbehörde militärische und zivile Raumfahrtentwicklung voneinander getrennt. Die zivile Raumfahrt-Forschung sollte der Öffentlichkeit zugänglich sein.

In Abständen weniger Monate oder gar Wochen fanden Raketentests und Flüge von unbemannten und bemannten Raumfahrzeugen statt. Abwechselnd auf russischer und amerikanischer Seite. Neben einzelnen Erfolgen waren dabei viele Misserfolge und auch tödliche Unfälle zu verzeichnen. **Bis 1965 hinkten die USA in der Entwicklung der Raumfahrt hinter der Sowjetunion her.**

Am **4. Oktober 1957** gelang es der Sowjetunion mit **Sputnik 1**, den **ersten Satelliten** in eine Erdumlaufbahn zu bringen. Dieses Ereignis wird vielfach als Beginn der Raumfahrt gesehen. Russland erzielte mit Sputnik 1 einen ungeheuren Propagandaerfolg. Man spricht vom „**Sputnik-Schock**“.

Bereits einen Monat später schoss Russland den größeren Satelliten **Sputnik 2** mit der **Hündin Laika** an Board in eine Erdumlaufbahn.

Im **Januar 1961** umrundete der Schimpanse „Ham“ in einer amerikanischen Mercury-Kapsel die Erde.

Dieser Erfolg wurde jedoch bereits im **April 1961** von der Sowjetunion übertroffen: **Jury Gagarin** flog als erster Mensch auf einer Erdumlaufbahn.

Die NASA tat sich schwer, nach immer neuen Meldungen über russische Erfolge jeweils auch eigene Erfolge vorzuweisen, um die Zustimmung der Öffentlichkeit für das amerikanische Mondfahrtprojekt aufrecht zu erhalten.

Angesichts der russischen Erfolge und des damit verbundenen Imageverlusts auf amerikanischer Seite erklärte der amerikanische Präsident **John F. Kennedy** die Raumfahrt zum Mond zum politischen Ziel höchster Dringlichkeit.

Am **25. Mai 1961** kündigte John F. Kennedy in seiner berühmten **Rede zur Lage der Nation** an, noch vor Ende des Jahrzehnts einen Amerikaner zum Mond und wieder zurück bringen zu wollen. Damit setzte er den Startschuss für den Wettlauf zum Mond.

Der russische Vorsprung in der Raumfahrt lag vor allem in stärkeren Raketen begründet. Amerika brauchte eine Mondrakete. Unter der Leitung von Wernher von Braun entwickelte die NASA den **Raketentyp Saturn**. Bei der ersten Mondlandung sollte die **Saturn 5** eingesetzt werden.

Die **Wende in der Vormachtstellung in der Raumfahrt** zeichnete sich jedoch **1966** ab: Während die russische Raumfahrt von Misserfolgen gebeutelt wurde, verlief das amerikanische **Gemini-Projekt** sehr erfolgreich. Bis Ende 1966 führte Amerika zehn bemannte Erdumrundungen durch. Die Kopplung von Raumkapseln funktionierte zuverlässig und bei mehreren Ausstiegen in den Weltraum sammelten die Amerikaner wertvolle Erfahrungen.

Dass die russische Raumfahrt keine wesentlichen Erfolge mehr verbuchen konnte, wurde häufig auf den Tod des Chefkonstrukteurs Koroljow im Jahre 1966 zurückgeführt.

Der eigentliche Grund liegt vermutlich in **Missständen im sowjetischen politischen System**: Die Rivalität zwischen ziviler Raumfahrt und Militär führte zu Auseinandersetzungen, die die Entwicklung der Raumfahrt zunehmend behinderte. Innenpolitische Machtkämpfe verhinderten eine klare Linie in der Raumfahrtentwicklung. Es wurden häufig wechselnde Ziele in Angriff genommen. Anstelle einer systematischen Weiterentwicklung standen kurzfristige Propagandaerfolge im Vordergrund.

Letztlich verhalf eine langfristigere und kostspieligere Planung den USA zum Sieg im Wettlauf zum Mond.

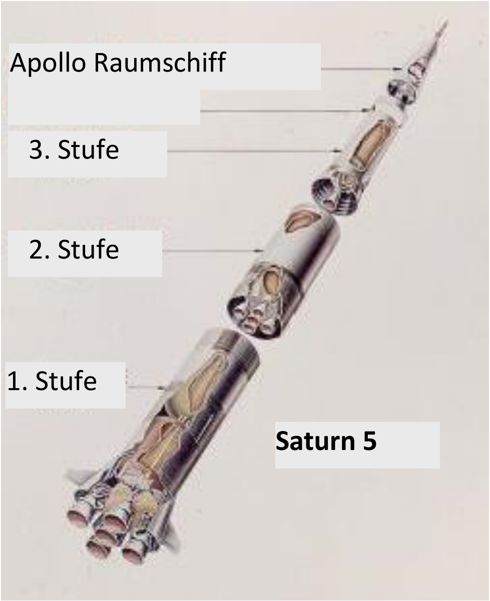
Die Saturn 5-Rakete

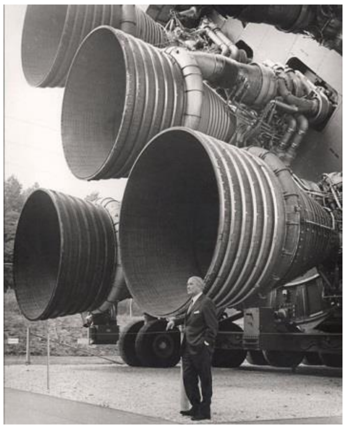
Die Saturn 5-Rakete ist die größte und leistungsfähigste Rakete, die jemals gebaut wurde. Sie ist dreistufig und insgesamt $110{,}6\ m$ lang.

- Zum Vergleich: Die Münchner Frauenkirche ist $98\ m$ hoch!

Der Aufbau der Saturn 5-Rakete:

Die drei Antriebsstufen der Saturn 5-Rakete bestehen im Wesentlichen aus Triebwerken und Treibstofftanks. Besonders eindrucksvoll sind die fünf gewaltigen Triebwerke der ersten Stufe, die für den Start der fast 3000 Tonnen schweren Rakete benötigt wurden. Jedes dieser Triebwerke hat eine Leistung von 15 Millionen PS.



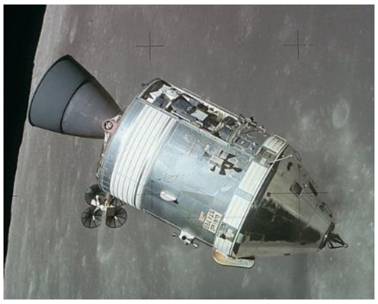


Die Saturn 5-Rakete startete von einem eigens für diese Rakete gebauten Startkomplex des **Kennedy Space Center**, dem „Weltraumbahnhof" der NASA in Florida.

Oberhalb der 3. Raketenstufe befanden sich die **Mondlandefähre** und die **Raumkapsel**, in der die Astronauten saßen.

Saturn 5-Raketen kamen bei 12 Apollo-Missionen zum Einsatz, darunter auch die erste bemannte Mondlandemission Apollo 11 im Jahr 1969.

Apollo-Raumschiff und Mondlandefähre



Das **Apollo-Raumschiff** besteht aus zwei Komponenten: dem Kommandomodul und dem Servicemodul. Die Plätze der Astronauten befanden sich im Kommandomodul. Die beiden Teile wurden erst kurz vor dem Wiedereintritt in die Erdatmosphäre getrennt. Nur das Kommandomodul kehrte zur Erde zurück. Im Servicemodul befanden sich die wissenschaftlichen Instrumente, die auf dem Mond aufgebaut wurden, die Stromversorgung des Raumschiffs (Brennstoffzellen) und Tanks für Treibstoff, Sauerstoff und Wasserstoff für die Brennstoffzellen.

Das Apollo-Raumschiff saß an der Spitze der Saturn 5-Rakete.

Unterhalb des Apollo-Raumschiffs befand sich die **Mondlandefähre**. Die Mondlandefähre konnte über eine Luke an das Apollo-Raumschiff angekoppelt werden. Zwei Astronauten stiegen in die Landefähre um und trennten sie in der Mondumlaufbahn wieder vom Apollo-Raumschiff. Die Landefähre enthielt Triebwerke für den Bremsvorgang bei der Landung und für den Start zum Rückflug in Richtung des Apollo-Raumschiffs.

Raumanzug und Lebenserhaltungssystem:

In Raumschiffen und Raumstationen werden die Astronauten durch **Lebenserhaltungssysteme** mit Atemluft versorgt. Temperatur und Luftdruck werden reguliert. Auch Wasser wird mitgeführt.

Außerhalb des Raumschiffs können Menschen nur in einem **Raumanzug** überleben.

Der Raumanzug selbst reflektiert mit seiner weißen Oberfläche die Sonnenstrahlung. Das Material des Anzugs besteht aus mehreren speziellen Kunststoffschichten, in denen unter anderem Mikrometeoriten verdampfen. Der Raumanzug erzeugt einen Druck auf den Körper des Astronauten, der verhindert, dass dieser sich aufbläht. Die Siedetemperatur von Flüssigkeiten nimmt mit abnehmendem Druck ebenfalls ab. Ohne Raumanzug würde deshalb das Blut in den Adern sieden.

Experimente zu den Auswirkungen verminderten Luftdrucks:

- Ein Mohrenkopf bläht sich im Vakuum auf.
- Lauwarmes Wasser siedet im Vakuum.

Der Helm eines Astronauten hat ein vergoldetes Visier, das die für die Augen schädliche starke UV-Strahlung von der Sonne abschirmt. Im Helm sind außerdem Mikrofone und Kopfhörer angebracht, damit die Astronauten über Funk miteinander kommunizieren können. Im Weltraum kann man nicht normal miteinander sprechen, weil sich Schallwellen im luftleeren Raum nicht ausbreiten können.

Unter dem Raumanzug tragen Astronauten eine spezielle Unterwäsche, in die wassergefüllte Röhrchen eingearbeitet sind, über die die Temperatur im Raumanzug reguliert wird.

Im großen Rucksack des Raumanzugs der Apollo 11-Mission war ein Lebenserhaltungssystem untergebracht, das den Astronauten für eine Zeit von bis zu sechs Stunden mit Sauerstoff und Wasser versorgte und das ausgeatmete Kohlendioxid abführte. Es enthielt außerdem eine Stromversorgung und die Steuerung für die Temperaturregelung im Raumanzug.

Apollo 11 – Die erste bemannte Mondlandung:

Die Jahre **1964 bis 1968** standen im Zeichen der intensiven Vorbereitung auf die erste bemannte Mondlandung: Mithilfe von Sonden wurden Fotos von der Mondoberfläche gemacht, die es ermöglichten, einen geeigneten Landeplatz für die erste bemannte Mondlandung auszuwählen. Die Missionen Apollo 8, Apollo 9 und Apollo 10 testeten im Weltraum und bei Flügen um den Mond die Technik der Raumfahrzeuge. Flugmanöver wurden eingeübt.

Am **16. Juli 1969** startete schließlich vom Kennedy Space Center aus um 13.32 Uhr die Saturn 5-Rakete mit dem **Apollo-Raumschiff Columbia**, der **Mondlandefähre Eagle** und den drei Astronauten **Edwin Aldrin, Neil Armstrong und Michael Collins** zum Mond.

Flug und Kopplungsmanöver verliefen plangemäß.

Nach mehr als vier Tagen Flugzeit stiegen Aldrin und Armstrong in die Mondlandefähre um und trennten diese vom Apollo-Raumschiff, in dem Collins blieb, um den Mond bis zur Rückkehr der Mondlandefähre zu umkreisen.

Die Mondlandefähre schwenkte durch Zünden eines Bremstriebwerks in eine Abstiegsbahn zur Mondoberfläche ein.

Am 20. Juli um 20.17 Uhr setzte schließlich die Mondlandefähre im **Mare Tranquilitatis** auf der Mondoberfläche auf.

Nach einer Vorbereitungszeit von knapp vier Stunden kletterte **Neil Armstrong** aus der Mondlandefähre und betrat als erster Mensch den Mond. Dabei sprach er für die schätzungsweise 600 Millionen Fernsehzuschauer den vorbereiteten Satz:

„That's one small step for 〈a〉 man, one giant leap for mankind!"

20 Minuten später verließ auch Edwin Aldrin die Mondlandefähre.

Der erste Aufenthalt von Menschen auf dem Mond dauerte insgesamt 2 Stunden und 31 Minuten.

Neben der amerikanischen Flagge, die allerdings beim Start des Landemoduls umfiel, deponierten die Astronauten mehrere wissenschaftliche Messgeräte auf dem Mond. Unter anderem wurden ein erster **Laserreflektor** auf dem Mond installiert, mit dem von der Erde aus die Entfernung des Mondes genau gemessen werden kann, ein **Sonnenwindsegel** aus Aluminiumfolie zur Untersuchung der Zusammensetzung des Sonnenwinds und ein **Seismometer** zur Messung der Ausbreitung von Mondbebenwellen. Außerdem sammelten die Astronauten $21{,}6\ kg$ Mondgestein ein.

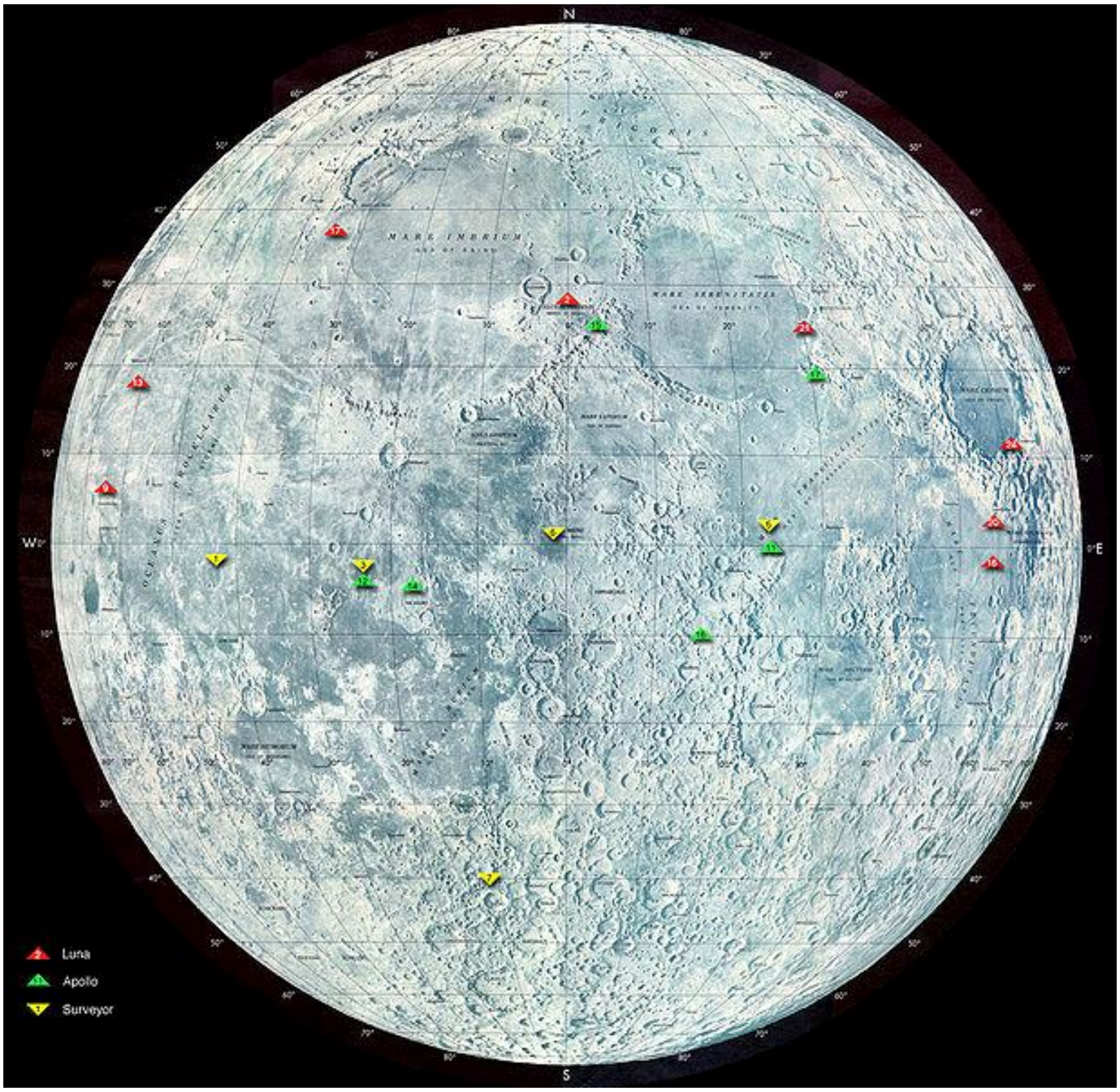
Der **Rückflug der Landefähre zum Raumschiff** gelang problemlos, die Fähre schwenkte in die Mondumlaufbahn des Mutterschiffs Columbia ein und koppelte wieder an die Raumkapsel an. Nachdem Armstrong und Aldrin zu Collins umgestiegen waren, wurde die Mondlandefähre abgestoßen und das Apollo-Raumschiff wieder auf **Erdkurs** gebracht. Am 24. Juli 1969 um 16.50 Uhr wasserte die Kapsel im Pazifik und wurde von einem **Bergungsschiff** an Bord genommen.

Weitere Mondlandemissionen nach Apollo 11:

Bis 1972 wurden noch **6 weitere Apollomissionen** durchgeführt; 5 davon mit Mondlandung.

Apollo 14 war die Mondmission, bei der **die meisten wissenschaftlichen Experimente** durchgeführt wurden: Auf dem Mond wurden weitere Messgeräte zur Erforschung von Mondbeben, zum Aufspüren von Gasen und zur Atmosphärendruckmessung sowie ein Magnetometer und ein Sonnenwindexperiment aufgestellt.

Landeplätze der Apollomissionen und der Mondlandesonden:



Was hat die Raumfahrt zum Mond gebracht?

Wissenschaftliche Erkenntnisse über den Mond:

Die Astronauten sammelten bei den bemannten Mondlandungen insgesamt $\mathbf{382\ kg}$ **Mondgestein**. Sorgfältige Untersuchungen dieser Gesteinsproben zeigten eine so große Ähnlichkeit mit dem Gestein auf der Erde, dass man vermutet, dass der Mond nicht als eigenständiger Himmelskörper unabhängig von der Erde entstand, sondern möglicherweise aus Erdmaterial, das bei der Kollision eines Planetoiden mit der Erde aus der Erde herausgeschleudert wurde.

Bei den Apollomissionen wurden zahlreiche **wissenschaftliche Experimente** auf dem Mond installiert.

Seismische Messungen nach Mondbeben, die künstlich ausgelöst wurden, indem man Raketenendstufen auf die Mondoberfläche schickte, lieferten Erkenntnisse über den **inneren Aufbau des Mondes**: Vermutlich enthält der Mond einen eisenhaltigen Kern, der von einem Basaltmantel und einer Gesteinskruste umgeben ist.

Insgesamt erkannte man aber, dass der wissenschaftliche Nutzen der bemannten Raumfahrt zum Mond den hohen finanziellen Aufwand, der mit ihr verbunden ist, nicht rechtfertigt. Deshalb wurden nach der letzten bemannten Mission Apollo 17 (1972) keine weiteren bemannten Mondlandemissionen mehr genehmigt.

Technologische Entwicklungen:

Zahlreiche Technologien, die ursprünglich für die Raumfahrt entwickelt wurden, konnten in der Folgezeit für die Entwicklung technischer Geräte genutzt werden, die heute aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken sind. Wichtige Beispiele sind **Computertechnik**, **Kameratechnologie**, Entwicklung von **Solarzellen**, **Sicherheitssysteme im Autobau** oder **Hochleistungswerkstoffe**. In der **Medizintechnik** gehen beispielsweise die Entwicklung des Herzschrittmachers, des Defibrillators oder von Implantat-Sensoren auf Raumfahrtentwicklungen zurück.

Neue Strategien in der Arbeitswelt:

Die Notwendigkeit, auf dem Weg zur Mondlandung in kürzester Zeit große technische Fortschritte zu erzielen, führte zu neuen, unkonventionellen Strategien, die sich in der Raumfahrt bewährten und später auch in der Industrie eingesetzt wurden. **Managementmethoden** und **Qualitätskontrollnormen** seien hier als zwei Beispiele genannt.

Politische Auswirkungen:

Möglicherweise verhinderte der Wettstreit der USA und der Sowjetunion auf dem Weg zur ersten bemannten Mondlandung eine noch stärkere Konzentration auf die Perfektionierung von Waffensystemen in der Phase des Kalten Krieges.

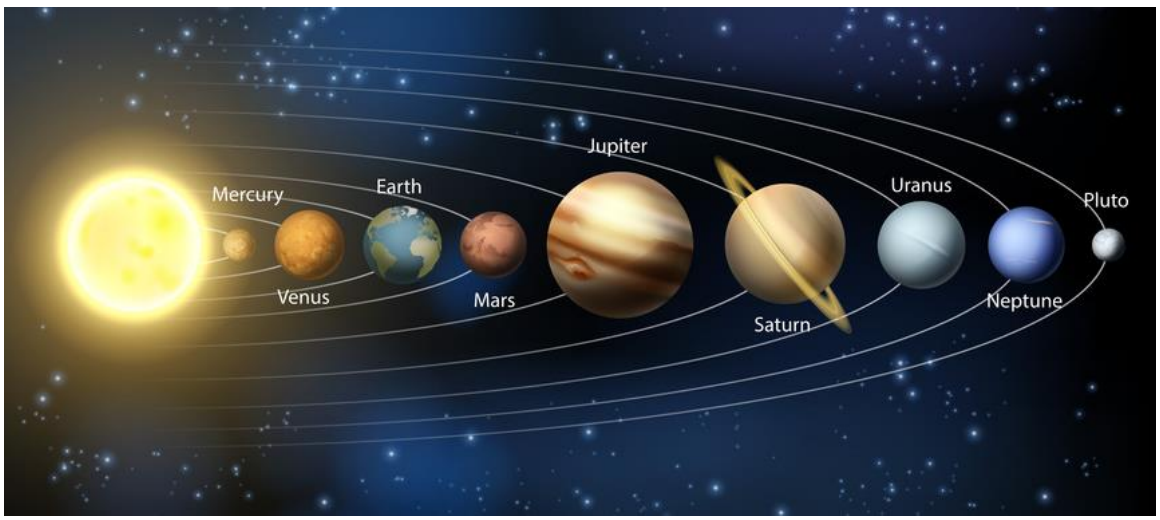
5) Die Planeten des Sonnensystems

Die acht Planeten

Das Sonnensystem enthält unzählige Himmelskörper aus Gestein, Metall, Eis und Gas. Dazu zählen Kometen, Asteroiden, Zwergplaneten und Meteoriden. Die wichtigsten Objekte auf Umlaufbahnen um die Sonne sind aber acht Planeten mit ihren Monden. Gemäß der **Internationalen Astronomischen Union (IAU)** ist ein **Planet** ein Himmelskörper, der

- sich auf einer **Umlaufbahn um die Sonne** bewegt,
- eine annähernd **kugelförmige Gestalt** besitzt und
- die Umgebung seiner **Umlaufbahn von anderen Himmelskörpern freigeräumt** hat.

Bis zum Jahr 2006 bestand das Planetensystem der Sonne aus 9 Planeten. Am 24. August 2006 wurde jedoch **Pluto** von der IAU vom Planeten zum Zwergplaneten „degradiert". Neben der von den übrigen Planetenbahnen deutlich abweichenden Form und Neigung der Pluto-Bahn war ein Hauptgrund für die geänderte Zuordnung des Pluto die Tatsache, dass man im Lauf der Jahre in der Nähe seiner Umlaufbahn zahlreiche weitere Himmelskörper von ähnlicher Größe entdeckt hatte (vgl. S. 137). Zwergplaneten unterscheiden sich von Planeten definitionsgemäß dadurch, dass ihre Gravitationswirkung nicht ausreicht, um ihre Bahn von anderen Himmelskörpern zu bereinigen.



Merkspruch zur Reihenfolge der Planeten:

Mein	**Vater**	**erklärt**	**mir**	**jeden**	**Samstag**	**unseren**	**Nachthimmel**
Merkur	**Venus**	**Erde**	**Mars**	**Jupiter**	**Saturn**	**Uranus**	**Neptun**

Nach ihrer Position in Bezug auf Sonne und Erde unterscheidet man

untere Planeten: Merkur und Venus
obere Planeten: Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun.

Man unterscheidet auch:

feste Planeten: Merkur, Venus, Erde Mars
Gasplaneten: Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun

Die wichtigsten Daten der Planeten:

Planet	Radius R_P	Bahnradius r_P	Masse in Erdmassen	Umlaufdauer T_{sid}	Bahnexzent-rizität ϵ	bekannte Monde
Merkur	2440 km	0,387 AE	0,0553	0,2408 a	0,21	0
Venus	6050 km	0,723 AE	0,815	0,6152 a	0,0067	0
Erde	6371 km	1AE	1	1a	0,017	1
Mars	3390 km	1,52 AE	0,107	1,881 a	0,094	2
Jupiter	69900 km	5,20 AE	318	11,86 a	0,049	69
Saturn	58200 km	9,58 AE	95,2	29,46 a	0,057	62
Uranus	25400 km	19,2 AE	14,5	84,01 a	0,046	27
Neptun	24600 km	30,1 AE	17,1	164,8 a	0,011	14

Die in der Tabelle angegebenen Daten sind zum Teil Mittelwerte.
Weitere Daten wie Bahnneigung, Dichte, Fallbeschleunigung, Neigung der Rotationsachse und Dauer der Eigenrotation finden sich in der Formelsammlung *(FS 44)*.

Besondere Eigenschaften der Planeten:

Merkur:

Merkur erscheint als innerster Planet des Sonnensystems von der Erde aus um einem Winkel von maximal 28° von der Sonne entfernt und ist schwierig zu beobachten, weil er häufig von der Sonne überstrahlt wird. Der Planet kann in der Abend- oder Morgendämmerung in der Nähe des Horizonts mit bloßem Auge beobachtet werden. Ein besonderes Ereignis ist ein **Merkurtransit**: Merkur wandert vor der Sonnenscheibe vorbei und kann als schwarzer Punkt beobachtet werden. Der letzte von Memmingen aus beobachtbare Merkurdurchgang fand am 9. Mai 2016 statt.

Die Merkurbahn fällt durch eine vergleichsweise **starke Bahnkrümmung** und eine im Vergleich zu den anderen Planetenbahnen **starke Neigung gegen die Umlaufbahn der Erde** auf. Der sonnennächste Planet umrundet die Sonne schneller als alle anderen Planeten. Ein **Umlauf des Planeten um die Sonne** dauert nur 88 Tage, das ist etwa 1,5-mal so lang wie die Dauer einer Eigenrotation des Merkur. Wegen seines schnellen Sonnenumlaufs wurde der Planet nach dem Götterboten Merkur benannt, der mit Flügelschuhen den Götterhimmel durcheilt. Merkur dreht sich während 2 Sonnenumläufen genau 3-mal um die eigene Achse (**gebrochen gebundene Rotation**). Infolge dessen dauert auf Merkur ein Tag zwei Merkurjahre, nämlich 176 Erdtage. Die langen Sonneneinstrahlungs- und Abkühlungszeiten verursachen auf Merkur **extreme Temperaturschwankungen**: zwischen $467°C$ und $-183°C$.

Merkur besitzt nur eine **sehr dünne Atmosphäre**, die zum Großteil aus Helium besteht. Im **Kern** enthält Merkur ein teilweise flüssiges Eisen-Nickel-Gemisch. Die ca. 500 bis 600 km dicke äußere Hülle besteht aus Silikatgestein. Die **Oberfläche** des Planeten ist durch gewaltige Steilhänge und zahlreiche Krater gekennzeichnet. Besonders auffällig ist das Caloris-Becken mit einem Durchmesser von 1300 km.

Erforscht wurde Merkur von der amerikanischen Raumsonde **Mariner 10**. Eine weitere Raumsonde der NASA, **Messenger**, näherte sich Merkur von 2013 bis 2015 auf einer Umlaufbahn auf bis zu 200 km. Im Rahmen dieser Mission wurde Merkur vollständig kartiert. Mit mehreren Spektrografen und Magnetometern wurden der Aufbau des Planeten, die Zusammensetzung seiner Atmosphäre und das Magnetfeld des Merkur untersucht.

Venus:

Der als **Morgen- und Abendstern** bekannte Planet Venus erscheint besonders hell und zeigt **deutliche Phasen**. Auch Venus kann als schwarzer Punkt vor der Sonne beobachtet werden, wenn sie bei einem **Venustransit** vor der Sonne vorbeiwandert. Der letzte Venustransit konnte von Memmingen aus 2012 beobachtet werden.

Bahnneigung und Bahnkrümmung der Venus sind **sehr gering**. Wegen der geringen Achsenneigung gibt es auf der Venus **keine Jahreszeiten**. Die Venus **dreht sich** im Vergleich zu den anderen Planeten außer Uranus und dem Zwergplaneten Pluto **in entgegengesetzter Richtung**. Auf der Venus würde man deshalb die Sonne im Westen aufgehen sehen.

Die **Venusoberfläche** besteht aus leichten Hebungen und Senkungen. Auch höhere Gebirgszüge und Vulkane kommen vor. Fast alle Gesteine auf der Venus sind vulkanischen Ursprungs. Der **innere Aufbau der Venus** ähnelt dem der Erde. Ein Eisenkern mit etwa $6000\ km$ Durchmesser wird von einem Mantel aus teilweise geschmolzenem Fels umgeben.

Die **Atmosphäre der Venus** unterscheidet sich hingegen stark von der Erdatmosphäre: Die etwa 90-mal größere Masse der Venusatmosphäre bewirkt an der Oberfläche des Planeten einen Druck von $92\ bar$. Dies kommt dem Druck in gut $910\ m$ Meerestiefe gleich. Die Venusatmosphäre besteht hauptsächlich aus Kohlendioxid. Kilometerdicke Schichten aus Schwefelsäure, die den Blick auf die Venusoberfläche vollständig verschleiern, verursachen einen starken Treibhauseffekt, der die Oberflächentemperatur gleichmäßig auf $480°C$ erhitzt. Die aggressive Schwefelsäure und der extrem hohe Luftdruck erschweren die Erforschung der Venus mit Landegeräten.

Erforscht wurde die Venus von den amerikanischen **Mariner-Sonden** und den russischen **Venera-Sonden**. Der amerikanischen **Magellan-Sonde** gelang es, die Venusoberfläche mithilfe von Radarwellen abzutasten. Von 2006 bis 2014 befand sich die europäische Raumsonde „**Venus Express**“ in einer Venusumlaufbahn und untersuchte vor allem die Venus-Atmosphäre.

Erde:

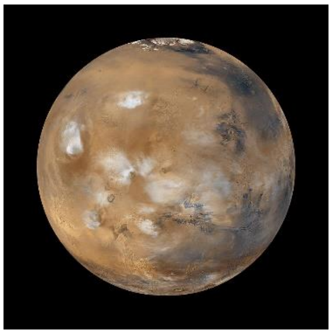
Die Erde ist der **einzige belebte Planet im Sonnensystem**.

Durch die relativ schnelle Eigenrotation ist die Erdkugel an den Polen abgeplattet. Der **innere Aufbau** der Erde gliedert sich in den innen flüssigen Erdkern aus einem Eisen-Nickel-Gemisch, dem Erdmantel und der in Platten gegliederten Erdkruste. Über 70% der Erdoberfläche sind mit Wasser bedeckt. Das **Magnetfeld** der Erde hat seine Pole etwa an den geographischen Polen der Erde; allerdings befindet sich der magnetische Nordpol am geographischen Südpol und umgekehrt. Das Erdmagnetfeld wird im Erdkern durch die schnelle Eigenrotation erzeugt (Geodynamo). Das Magnetfeld schützt die Erde vor dem Eindringen geladener Teilchen des Sonnenwindes in tiefe Schichten der Erdatmosphäre.

Die **Erdatmosphäre** besteht hauptsächlich aus Stickstoff und Sauerstoff. Sie streut den blauen Anteil des Lichts etwa 5-mal stärker als den roten, was den Himmel blau erscheinen lässt. Dass auf der Erde flüssiges Wasser vorkommt, die Temperaturen im gemäßigten Bereich liegen und der Luftdruck den Wert von etwa $1\ bar$ an der Erdoberfläche hat, sind Voraussetzungen für die **Entwicklung von Leben** auf der Erde. Die Erdatmosphäre absorbiert alle von der Sonne kommenden Strahlungsarten bis auf die Wellenlängenbereiche des sichtbaren Lichts und der Radiowellen und stellt damit eine weitere Voraussetzung für die Entwicklung von Lebewesen dar.

Zahlreiche **Fernerkundungssatelliten** beobachten die Erdatmosphäre (zum Beispiel Wettersatelliten) und die Erdoberfläche. **Satellitenteleskope** spielen eine bedeutende Rolle für die Erforschung des Weltalls, denn sie befinden sich außerhalb der Erdatmosphäre wo auch Strahlung wahrgenommen werden kann, die von der Erdatmosphäre absorbiert würde (z.B. UV-, Infrarot-, Röntgen- oder Gammastrahlung).

Mars:



Der Mars erscheint bereits im Fernglas rötlich, weshalb man ihn auch als **Roten Planeten** bezeichnet. Die Ursache für die Rotfärbung liegt im Eisenoxidstaub (Rost) der die Marsoberfläche bedeckt. Im Fernrohr erscheint der Mars normalerweise als rotorangene Scheibe ohne Strukturen. Bei besonders günstigen Bedingungen, wie der Marsnähe im Jahr 2003 erkennt man die beiden weißen **Polkappen**. Sie bestehen aus einer Schicht Wassereis und einer darüberliegenden Schicht Trockeneis (festes Kohlendioxid). Ende Juli 2018 wird Mars mit einer Entfernung von $57\ 600\ 000\ km$ wieder eine extreme Erdnähe erreichen.

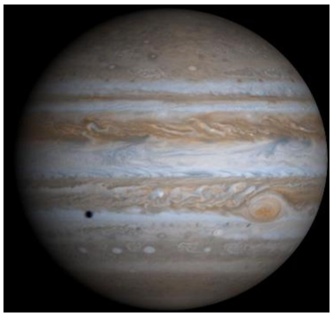
Mars besitzt **2 Monde: Deimos und Phobos**.

Bereits 1877 glaubte man auf der Marsoberfläche sogenannte **„Marskanäle“** entdeckt zu haben, die aufgrund ihrer regelmäßigen Anordnung an die Existenz von Außerirdischen glauben ließen. Tatsächlich handelt es sich bei den Marskanälen aber um optische Täuschungen, die auf Störungen in der Atmosphäre zurückzuführen sind (vgl. S. 127).
Die Oberfläche des Mars wird auf der nördlichen Halbkugel von ebenen Wüstenregionen bedeckt. Die südliche Halbkugel zeigt eine von zahlreichen Kratern zerklüftete Landschaft. In der Äquatorgegend befinden sich riesige Vulkane. Der höchste ist **Olympus Mons** mit $26\ km$ Höhe. Der Mars ist, wie die Erde, schalenartig aufgebaut. Der Kern des Planeten besteht aus Eisen.

Mars hat eine sehr dünne **Atmosphäre**, die hauptsächlich Kohlendioxid enthält.

Mars ist der am besten erforschte Planet. In den 60-er Jahren fotografierten die amerikanischen Mariner- und Viking-Sonden den Planeten im Vorbeiflug. 1997 gelang es im Rahmen der Mission **„Mars Pathfinder“** erstmals, ein Roboterfahrzeug auf dem Mars abzusetzen. In den folgenden Jahren wurden weitere Roboter zur Erforschung des Mars auf den Planeten gebracht. Wissenschaftlich am erfolgreichsten sind dabei **„Opportunity“** (seit 2004 auf dem Mars, vgl. S. 132ff) und **„Curiosity“** (seit 2012). Die Rover analysieren mit modernster Technik Bodenproben von der Marsoberfläche. Ein vorrangiges Ziel der Marsforschung ist die Suche nach flüssigem Oberflächenwasser und damit nach einer der Grundlagen für Leben. Die europäische Marssonde **„Mars Express“** entdeckte 2004 Hinweise auf größere Mengen unterirdischer Vorkommen von Wassereis in der Südpolarregion des Mars (vgl. S. 129f). Ob auf dem Mars auch flüssiges Wasser, die Grundlage einfachen Lebens, vorkommt, gilt mittlerweile als eher unwahrscheinlich.
Für die Zukunft gibt es Planungen zu bemannten Marsflügen.

Jupiter:



Jupiter ist der **größte Planet des Sonnensystems**. Die Erdkugel würde 1400-mal in das Volumen von Jupiter passen.

Jupiter ist mit bloßem Auge sehr gut sichtbar. Im Fernrohr erkennt man, dass Jupiter infolge der schnellen Eigenrotation an den Polen stark abgeplattet ist. Im Schulteleskop beobachtet man mehrere horizontal angeordnete, abwechselnd dunkle und helle Wolkenbänder. Besonders auffällig ist der „**Große Rote Fleck**“ (GRF), ein Wirbelsturm in der Jupiteratmosphäre, der seit mindestens drei Jahrhunderten seine Position nicht verändert hat. Im Inneren des GRF wurden Windgeschwindigkeiten von bis zu $600\ km/h$ gemessen.

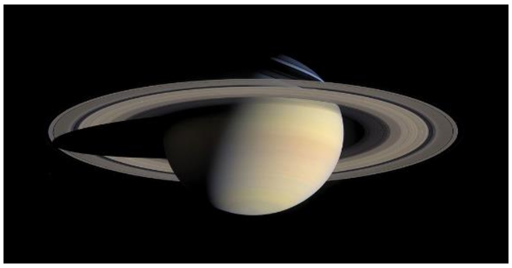
Würde man die Masse aller Planeten zusammennehmen, so wäre Jupiter trotzdem noch mehr als doppelt so schwer. Aufgrund seiner großen Masse wirkt Jupiter als „Meteoritenstaubsauger“. Er hält Gesteinsbrocken aus dem Weltall unter anderem von der Erde fern. Der Einschlag eines großen Meteoriten auf der Erde könnte diese für Lebewesen unbewohnbar machen. Ein spektakuläres Ereignis war 1994 der Einschlag des Kometen **Shoemaker Levy 9** auf Jupiter.

Jupiter hat keine feste Oberfläche. Er ist ein **Gasplanet** und besteht zu 90% aus Wasserstoff und zu 10% aus Helium. Der Kern des Planeten besteht vermutlich aus Gestein und Eis. Jupiter hat genau den maximalen Durchmesser, den ein Gasplanet haben kann. Würde Jupiter mehr Materie an sich ziehen, so würde diese von der Schwerkraft zusammengedrückt werden und nur eine geringe Radiusvergrößerung nach sich ziehen. Jupiter besitzt einen (mit dem Teleskop jedoch nicht sichtbaren) **Ring**. Der Planet besitzt ein **Magnetfeld**, das etwa 20-mal so stark ist, wie das der Erde.

Bisher wurden **69 Monde** entdeckt. Die vier größten, **Io, Europa, Ganymed und Kallisto**, sind ebenfalls mit dem Schulteleskop gut beobachtbar. Sie wurden bereits 1610 von **Galileo Galilei** im Fernrohr beobachtet und heißen deshalb auch „Galileische Monde“. **Io** besitzt einen Eisenkern und eine dünne Atmosphäre. Auf dem Mond wurden Vulkanausbrüche beobachtet. **Europa** besteht aus einem Eisenkern und einem Steinmantel, über dem ein wahrscheinlich $100\ km$ tiefer Ozean aus Wasser liegt, dessen Oberfläche 10 bis 20 km tief zu einer Eiskruste gefroren ist. Der dänische Astronom Ole Römer bestimmte 1676 durch Beobachtungen von Io die **Lichtgeschwindigkeit**. **Ganymed** ist mit einem Durchmesser von $5268\ km$ der größte Mond im Sonnensystem. Er besteht aus einem Eisenkern, einem Felsmantel und einem Eismantel. Außerdem besitzt er ein eigenes Magnetfeld. **Kallisto** besteht aus einem Eisen-Stein-Gemisch und einer Eiskruste.

Erforscht wurde Jupiter mithilfe der **Voyagersonden** (1979) und der **Galileo-Sonde** (1995). Von der Galileo-Sonde aus wurde an einem Fallschirm eine Atmosphären-Eintrittskapsel in die Jupiteratmosphäre fallen gelassen, die knapp eine Stunde lang Daten sammelte. Wegen seiner großen Masse wird Jupiter immer wieder als Gravitationszentrum für Swing-by-Manöver von Raumsonden, die zu den weiter entfernten Planeten fliegen, genutzt. Ende 2000 lieferte die Raumsonde **„Cassini“** im Vorbeiflug aus 10 Millionen km Entfernung zahlreiche Aufnahmen und Messergebnisse. Die Sonde **„New Horizons“** kam Jupiter während eines Swing-by-Manövers auf ihrem Weg zu Pluto sogar noch wesentlich näher. Seit 2016 befindet sich die NASA-Sonde **„Juno“** auf einer Umlaufbahn um Jupiter.

Saturn:



Der **Gasriese** Saturn ist der zweitgrößte Planet im Sonnensystem. Er ist mit bloßem Auge sehr gut erkennbar. Sein auffälligstes Merkmal ist der ausgeprägte Ring. In guten Teleskopen erkennt man, dass es sich beim Saturnring nicht um einen einzelnen Ring, sondern um ein **Ringsystem** handelt. Die bekanntesten Teilungen sind die Cassin-Teilung und die Enckesche Teilung. Nahaufnahmen der Voyager-Sonden zeigten, dass dieses Ringsystem aus vielen tausend zart erscheinenden, konzentrischen Bereichen besteht, die jeweils nur etwa einen Kilometer dick sind. Sie bestehen aus Gesteins- und Eisbrocken von Hochhausgröße bis zur Größe eines Staubkorns. Würde man den Saturn auf Erdgröße verkleinern, hätte der Ring nur die Dicke eines Blattes Papier.

Der Gasplanet Saturn besteht vorwiegend aus Wasserstoff (97%) und Helium. Seine **Dichte** beträgt nur das 0,7-fache von Wasser. Würde man den Planeten in eine gigantische mit Wasser gefüllte Badewanne werfen, so würde er schwimmen. In größerer Tiefe verflüssigen sich wegen des hohen Drucks die Gase, aus denen Saturn besteht. Der Planetenkern besteht aus Gestein. Saturn rotiert nicht wie ein starrer Körper, sondern zeigt, wie die Sonne, eine **differentielle Rotation**: Die Äquatorregion rotiert schneller als die Polregionen.

Der Saturn wird von **mindestens 62 Monden** umkreist; der größte heißt **Titan**.

Erforscht wurde Saturn in den Jahren 1980 und 1981 mithilfe der **Voyager-Sonden**. Neue Erkenntnisse über Saturn und seine Monde, insbesondere über den erdähnlichen **Saturnmond Titan**, lieferte die **Cassini-Sonde**, die im Juli 2004 den Saturn erreichte. 2005 landete die mit Cassini mitgeflogene Sonde **Huygens** auf dem Saturnmond Titan.

Uranus:

Der **Gasplanet** Uranus ist der drittgrößte Planet des Sonnensystems. Mit dem Schulteleskop ist Uranus deutlich von einem Stern unterscheidbar. **William Herschel** entdeckte ihn 1781 im Fernrohr.

Uranus wirkt auch auf Nahaufnahmen strukturlos und bläulich. Die bläulich-grüne Farbe dürfte vom Methan in der Uranusatmosphäre herrühren. Ansonsten besteht Uranus fast ausschließlich aus Wasserstoff und Helium. Vermutlich ist der Planet großenteils flüssig und besitzt einen festen Kern. Nur die oberste Schicht ist gasförmig. Die Raumsonde Voyager 2 sichtete 1986 das mit wenigen 100 Metern sehr dünne, aus winzigen Eisbrocken bestehende **Ringsystem** des Uranus.

27 Monde des Uranus sind bisher bekannt.

Uranus hat mit Venus (und Pluto) seine **rückläufige Rotationsrichtung** gemeinsam.
Das **Magnetfeld** von Uranus ist ungewöhnlich und hat die Form eines Quadrupols mit 2 Nord- und 2 Südpolen.

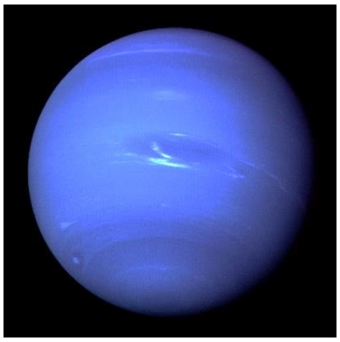
Aufnahmen des **Hubble-Weltraumteleskops** aus dem Jahr 2006 zeigen viel stärker ausgebildete Bänder und erhöhte Wetteraktivität in der nördlichen Hemisphäre. Demnach herrschen in der Atmosphäre des Gasplaneten, trotz seiner großen Entfernung von der Sonne, ausgeprägte **Jahreszeiten**.

Uranus empfängt im Vergleich zur nur Erde ein Vierhundertstel der Sonnenstrahlung. Die Sonne erscheint von ihm aus nur als eine winzige Scheibe. Dennoch strahlt sie immer noch 1100-mal heller als der Vollmond von der Erde aus erscheint.

Auch die **extrem langen Tageszeiten** bilden eine Besonderheit des Uranus. Der Gasriese benötigt für seine Bahn um die Sonne 84 Jahre. Weil die Rotationsachse des Uranus fast in Sonnenrichtung zeigt, wird der Planet über einen Zeitraum von mehr als 40 Jahren auf einer Seite von der Sonne bestrahlt, während die andere Seite praktisch in völliger Dunkelheit liegt. Ein Uranus-Tag dauert also etwa 40 Jahre!

Die bislang einzige Raumsonde, die Bilder von Uranus lieferte, ist **Voyager 2**. Die Sonde erreichte Uranus 1986.

Neptun:



Auch Neptun ist ein Gasplanet. Er ist der der **viertgrößte Planet** im Sonnensystem. Neptun ist mit bloßem Auge nicht sichtbar. In einem Teleskop erscheint er, ähnlich wie Uranus, als bläuliches Scheibchen.

Der französische Mathematiker **Urbain Leverrier** berechnete **1846** aus Unregelmäßigkeiten der Bahn des Uranus die Position des damals noch nicht entdeckten Planeten Neptun. Im gleichen Jahr beobachtete schließlich der deutsche Astronom **Johann Galle** den Planeten mit dem Teleskop. Neptun **ähnelt** in Aussehen, Größe, Masse, innerem Aufbau und chemischer Zusammensetzung dem **Uranus**.

Infolge der sehr großen Sonnenferne mit einer tausendmal schwächeren Sonnenstrahlung als auf der Erde liegt die **Temperatur unter etwa $-210°C$**.

Die Temperatur seiner Hochatmosphäre ist um etwa $10°C$ höher als zu erwarten wäre. Die **Wärmequelle im Inneren des Planeten** könnte ein radioaktiver Prozess sein, der den Planetenkern aufheizt (vgl. S. 191). Es wird angenommen, dass sich im Zentrum ein fester Kern von etwa 1- bis 1,5-facher Erdmasse befindet. Dieser besteht aus Gestein und Metall und ist nicht größer als die Erde. Die Temperatur in seinem Zentrum liegt bei etwa $7000°C$ und der Druck beträgt einige Millionen bar.

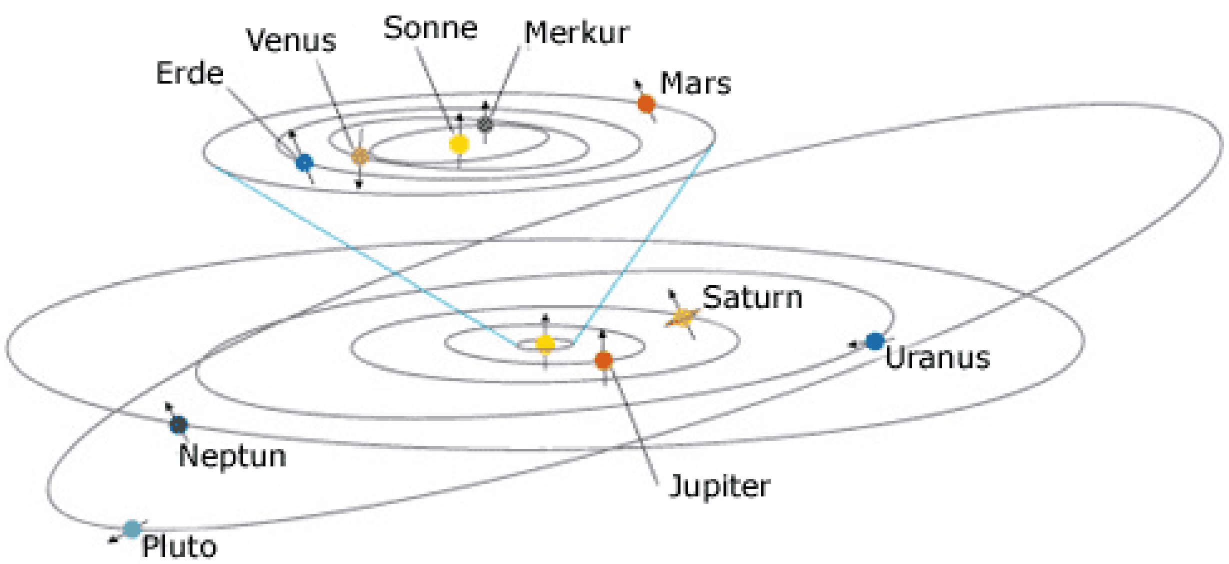
Wie Uranus besitzt Neptun ein **Quadrupol-Magnetfeld** und ein schwer beobachtbares **Ringsystem**, das aber von Voyager 2 im Jahr 1989 fotografiert wurde. Der erste Hinweis auf Ringe um Neptun waren Beobachtungen von Sternbedeckungen.

14 Neptunmonde wurden bisher registriert. Der größte ist **Triton**.

Voyager 2 war die erste und bislang einzige Raumsonde, die Neptun besucht hat. Sie flog über den Nordpol von Neptun und passierte den Planeten am 25. August 1989 in nur $4950\ km$ Abstand. Seit die Sonde die Erde verlassen hatte, war dies die größte Annäherung an einen Himmelskörper des Sonnensystems.

Die Bahnen der Planeten:

Die **Planetenbahnen** sind **näherungsweise parallel zur Erdbahn**. In die folgende Abbildung sind neben den Planetenbahnen auch die Rotationsachsen der Planeten eingetragen. Zusätzlich wurde die Umlaufbahn des Pluto eingezeichnet. Man erkennt deutlich, dass die Pluto-Bahn nicht nur relativ stark gekrümmt sondern auch auffällig stark gegen die Erdbahn und die Bahnen der Planeten geneigt ist.



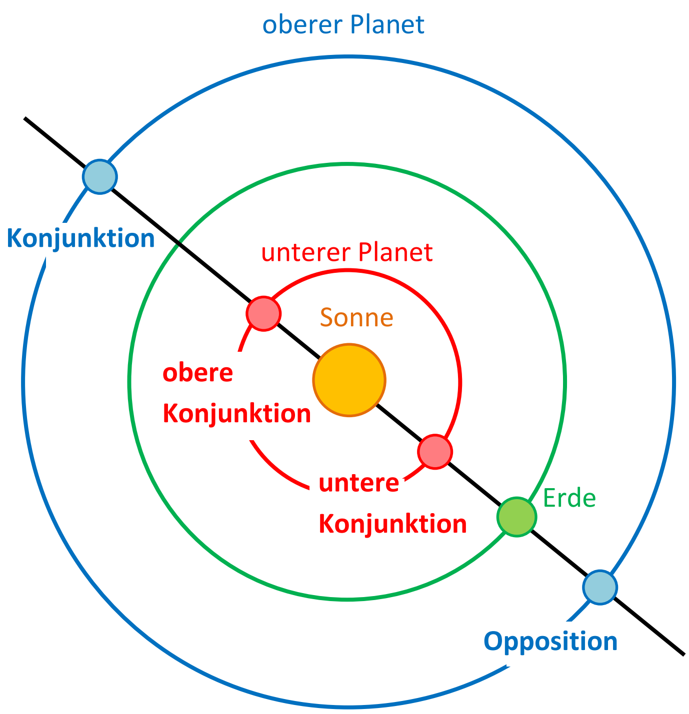
Zum Aufsuchen der Planeten am Nachthimmel verwendet man sogenannte **Ephemeriden**. Das sind Tabellen, in denen für jeden Tag die Koordinaten (Deklination und Rektaszension, vgl. Kap. I, S. 18) der Planeten angegeben sind. Ephemeriden sind beispielsweise im „Kosmos Himmelsjahr“ abgedruckt.

Weil alle Planetenbahnen näherungsweise in der Ekliptikebene (vgl. Kap I, S. 25) liegen, sind **Planeten generell in der Nähe der Ekliptik, beobachtbar**.

Beim **Aufsuchen von Planeten auf der Sternkarte** genügt es deshalb, den Zeiger auf die in den Ephemeriden angegebene Rektaszension des Planeten zu stellen. Der Planet befindet sich dann in der Nähe des Schnittpunkts des Zeigers mit der Ekliptik.

Besondere Konstellationen von Planeten:

Wenn Erde, Sonne und Planet auf einer gemeinsamen geraden Linie liegen, befinden sie sich in **Konjunktion** oder in **Opposition**.



- Für **untere Planeten** (Merkur, Venus) sind **untere Konjunktion** oder **obere Konjunktion** möglich.
- **Obere Planeten** (Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun) können in **Konjunktion** oder in **Opposition** stehen.

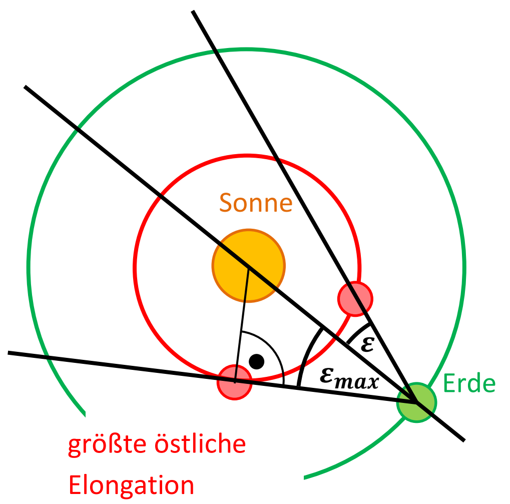
In **Konjunktion** ist ein Planet mit bloßem Auge nicht sichtbar. Er verschwindet entweder hinter der Sonne oder befindet sich vor der Sonne und wird überstrahlt.

Durch einen Sonnenfilter kann man untere Planeten beobachten, wenn sie vor der Sonne vorbeiwandern (untere Konjunktion). Der Planet erscheint dann als kleine schwarze Kreisscheibe vor der Sonne. Man spricht von einem „**Venustransit**“ bzw „**Merkurtransit**“.

Obere Planeten sind in **Opposition** bei minimalem Erdabstand und bester Beleuchtung durch die Sonne optimal beobachtbar.

- ➢ Gleichzeitigen Oppositionen zweier Planeten wird in der **Astrologie** besondere Bedeutung zugemessen.
  Der „Stern von Betlehem“ war vermutlich kein Komet, sondern eine Opposition von Jupiter („Königsstern“) und Saturn („Stern der Juden“) im Sternbild Fische (steht für Palästina).

Als **Elongation** $\boldsymbol{\varepsilon}$ bezeichnet man den Winkelabstand eines Planeten von der Sonne. Die **maximale Elongation** $\boldsymbol{\varepsilon_{max}}$ ist der größte Winkel zwischen den Blickrichtungen zur Sonne und zum Planeten, unter dem der Planet gesehen werden kann.



Achtung: Verwechsle die Elongation ε nicht mit der numerischen Exzentrizität ε!

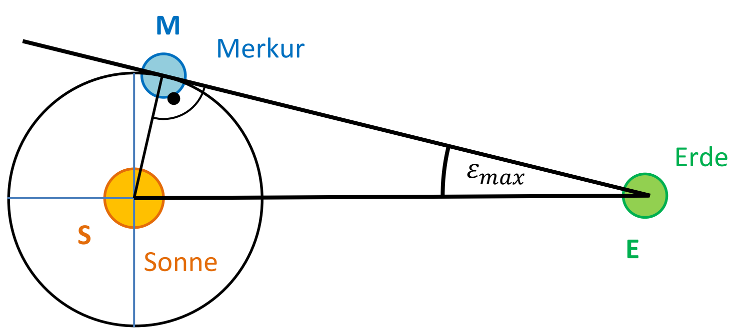
Die Elongation wird westlich bzw. östlich der Sonne jeweils von 0° bis 180° gemessen. Bei unteren Planeten sind nur Elongationen $\varepsilon < 90°$ möglich. **Westliche Elongation** bedeutet, dass der Planet vor der Sonne aufgeht und kann am Morgenhimmel gesehen werden. Bei **östlicher Elongation** geht der Planet nach der Sonne unter und kann am Abendhimmel beobachtet werden.

Die unteren Planeten Merkur und Venus haben eine besonders kleine maximale Elongation ε_{max}. Deshalb sind Merkur und Venus nur kurz vor Sonnenaufgang oder kurz nach Sonnenuntergang beobachtbar. Sonst werden die beiden Planeten von der Sonne überstrahlt oder sind infolge ihrer kurzen Umlaufzeit hinter der Sonne verschwunden.

Die Berechnung der größten Elongation ε_{max} ist nur für untere Planeten sinnvoll. Für obere Planeten beträgt der größtmögliche Winkelabstand zur Sonne immer 180°!

Rechenbeispiel:

Gesucht ist die maximale Elongation für Merkur. Merkur umläuft die Sonne auf einer Ellipse mit der Bahnexzentrizität $\varepsilon = 0{,}206$ und der großen Halbachse $a = 0{,}387\ AE$. Die Erdbahn wird näherungsweise als Kreisbahn betrachtet.



Die Merkurbahn hat die Form einer relativ stark gekrümmten Ellipse.

Die maximal mögliche Elongation erreicht Merkur daher, wenn er sich gerade im Aphel befindet und der Aphel der Merkurbahn mit dem Berührpunkt der Tangente EM (Blickrichtung zum Merkur) zusammenfällt.

Dann gilt:

$$\overline{SM} = r_A = a + e = a + \varepsilon \cdot a = a \cdot (1 + \varepsilon) = 0{,}378\ AE \cdot (1 + 0{,}206) \approx 0{,}467\ AE$$

$$\overline{SE} = 1\ AE$$

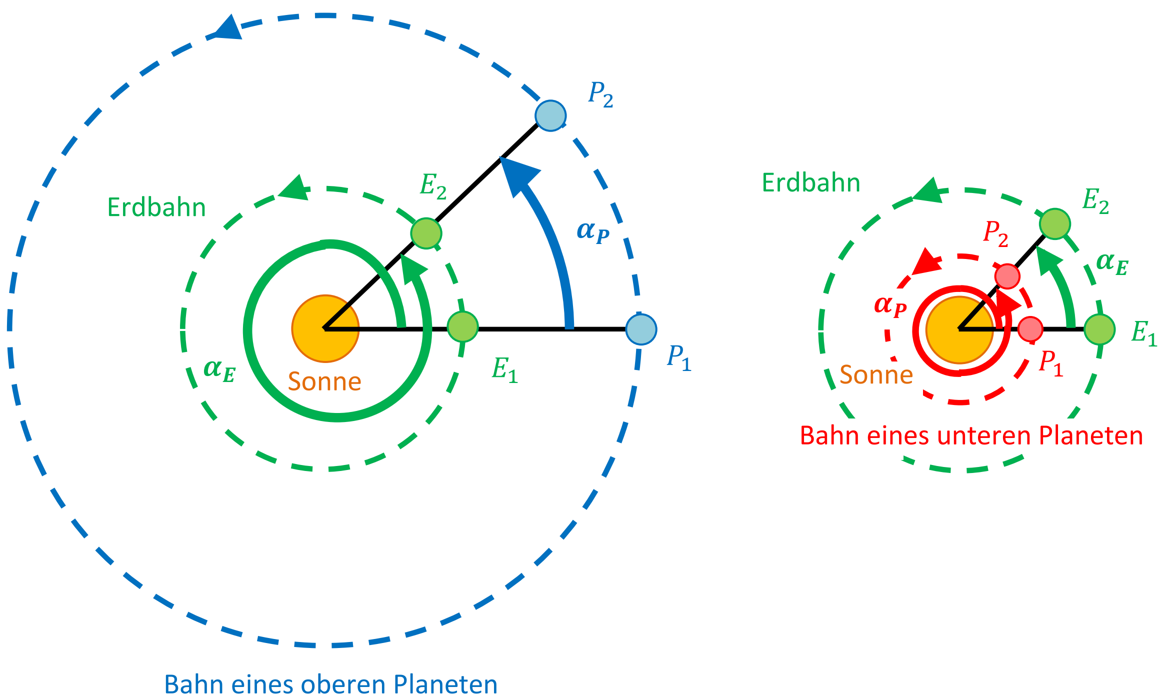
$$\Longrightarrow \quad \sin \varepsilon_{max} = \frac{0{,}467\ AE}{1\ AE} = 0{,}467 \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{\varepsilon_{max} \approx 27{,}8°}$$

Siderische und synodische Umlaufzeiten der Planeten:

Wie bei den Umlaufzeit des Mondes (vgl. S. 93) muss man auch bei den Planeten zwischen der tatsächlichen oder **siderischen Umlaufzeit T_{sid}** und der **synodischen Umlaufzeit T_{syn}**, die die Zeitdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden gleichen Konstellationen von Sonne, Erde und Planet angibt, unterscheiden. Bei den Planeten unterscheiden sich siderische und synodische Umlaufzeit allerdings viel stärker als beim Mond.
Wie beim Mond liegt auch hier die Ursache für den Unterschied zwischen tatsächlicher und vom irdischen Beobachter wahrgenommener Umlaufzeit in der Weiterbewegung der Erde um die Sonne während eines Planetenumlaufs.

In der Abbildung unten links sind die Bahnen der Erde und eines oberen Planeten während der Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Oppositionen, also während einer siderischen Umlaufzeit T_{sid} des oberen Planeten dargestellt.

In der Abbildung unten rechts sind die Bahnen der Erde und eines unteren Planeten während der Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden unteren Konjunktionen, also während einer siderischen Umlaufzeit T_{sid}.des unteren Planeten dargestellt.



Grundsätzlich haben untere Planeten kürzere siderische Umlaufzeiten und damit auf ihrer Bahn eine höhere Winkelgeschwindigkeit als obere Planeten. (Vgl. auch *FS 44*!)

Rechnerischer Zusammenhang zwischen $\boldsymbol{T_{sid}}$ und $\boldsymbol{T_{syn}}$:

Wir betrachten die Umlaufbahnen der Erde und der Planeten näherungsweise als Kreisbahnen.

Dann gilt für die **Winkelgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}$** der Erde bzw. eines Planeten:

$$\omega = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T_{sid}} = konst.$$

(Tatsächlich ist ω wegen des 2. Keplerschen Gesetzes nicht konstant!)

Für den während einer synodischen Umlaufzeit T_{syn} überstrichenen Winkel folgt:

$$\alpha = \Delta\alpha = \frac{2\pi}{T_{sid}} \cdot \Delta t = \frac{2\pi}{T_{sid}} \cdot T_{syn}$$

Wir vergleichen die **während einer synodischen Umlaufzeit $\boldsymbol{T_{syn}}$ überstrichenen Winkel $\boldsymbol{\alpha}$**.
(T_{syn} ist für Erde und Planet gleich groß!)

obere Planeten:

$$\alpha_E = \alpha_P + 2\pi$$

$$\Rightarrow \frac{2\pi}{T_{sid,E}} \cdot T_{syn} = \frac{2\pi}{T_{sid,P}} \cdot T_{syn} + 2\pi \qquad \Big| : (2\pi \cdot T_{syn})$$

$$\Rightarrow \frac{1}{T_{sid,E}} = \frac{1}{T_{sid,P}} + \frac{1}{T_{syn}}$$

Für die **siderische Umlaufzeit eines oberen Planeten** folgt:

$$\boxed{\frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T_{sid,P}}} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T_{sid,E}}} - \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T_{syn}}} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{1\,a}} - \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T_{syn}}}} \qquad (FS\ 15)$$

untere Planeten:

$$\alpha_P = \alpha_E + 2\pi$$

$$\Rightarrow \frac{2\pi}{T_{sid,P}} \cdot T_{syn} = \frac{2\pi}{T_{sid,E}} \cdot T_{syn} + 2\pi \qquad \Big| : (2\pi \cdot T_{syn})$$

$$\Rightarrow \frac{1}{T_{sid,P}} = \frac{1}{T_{sid,E}} + \frac{1}{T_{syn}}$$

Für die **siderische Umlaufzeit eines unteren Planeten** folgt:

$$\boxed{\frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T_{sid,P}}} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T_{sid,E}}} + \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T_{syn}}} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{1\,a}} + \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T_{syn}}}} \qquad (FS\ 15)$$

Massenbestimmung bei Planeten:

Die **Masse eines Planeten** kann man mithilfe eines Mondes des Planeten bestimmen.

- Wir verwenden die Kreisbahnnäherung (Der Mond umläuft den Planeten auf einer Kreisbahn.) Die Kreisbahnnäherung sollte nicht verwendet werden, wenn Planet und Mond vergleichbare Massen haben!

Ansatz: **Zentripetalkraft = Gravitationskraft**

$$m_M \cdot \frac{{v_M}^2}{r_M} = G \cdot \frac{m_P \cdot m_M}{{r_M}^2}$$

$$\Rightarrow \quad v_M = \sqrt{G \cdot \frac{m_P}{r_M}} = \frac{2\pi \cdot r_M}{T_M}$$

$$\Rightarrow \quad m_P = \frac{4\pi^2 \cdot {r_M}^3}{G \cdot (T_M)^2}$$

Beispiel:

Wir berechnen die Masse m_E der Erde aus dem mittleren Bahnradius $r_M = 3{,}844 \cdot 10^5\ km$ und der siderischen Umlaufdauer $T_{sid} = 29{,}53\ d$ des Mondes:

$$m_E = \frac{4\pi^2 \cdot {r_M}^3}{G \cdot (T_M)^2} = \frac{4\pi^2 \cdot (3{,}844 \cdot 10^8\ m)^3}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot (29{,}53 \cdot 24 \cdot 3600\ s)^2} \approx 5{,}16 \cdot 10^{24}\ kg$$

Dieses Ergebnis stimmt relativ gut mit dem in der Formelsammlung *(FS 43)* angegebenen Wert für die Erdmasse überein: $m_E = 5{,}974 \cdot 10^{24}\ kg$

6) Flugbahnen von Satelliten und Raumsonden

Satelliten und Rausonden:

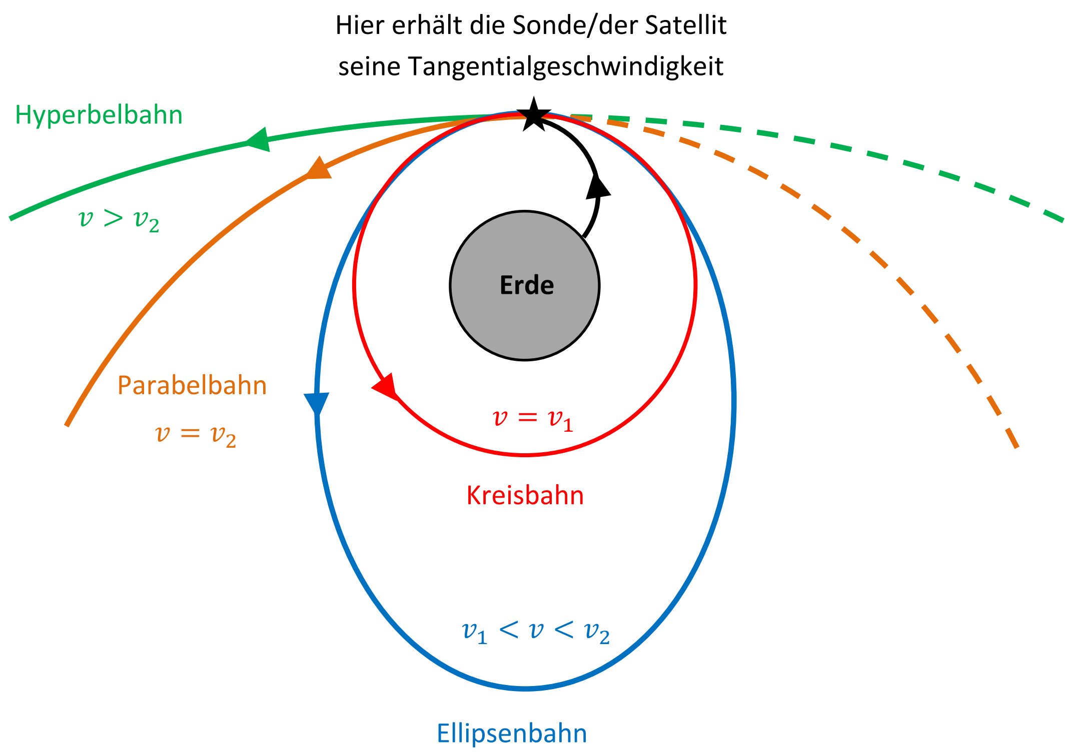
Während **Satelliten** sich auf Umlaufbahnen um die Erde bewegen, verlassen **Raumsonden** den Anziehungsbereich der Erde und fliegen zu Zielen im Sonnensystem.

Satelliten überwachen Phänomene auf der Erde (z.B. Wettersatelliten, Fernerkundungssatelliten) oder beobachten als Satellitenteleskope außerhalb der Erdatmosphäre aber von einer Erdumlaufbahn aus Objekte im Weltall (z.B. Hubble Space Teleskop). Satellitenteleskope werden in Kapitel II ausführlich behandelt.

Sonden dienen der Erforschung von Planeten, von Kometen oder der Sonne. Grundsätzlich unterscheidet man bei den Raumsonden sogenannte „**Orbiter**“, die einen Planeten auf einer kreisförmigen oder elliptischen Bahn umlaufen und „**Lander**“, die auf dem Planeten landen.

Flugbahnen von Satelliten und Raumsonden:

Satelliten und Raumsonden werden mithilfe von **Raketen** in den Weltraum transportiert. Leistungsstarke Trägerraketen wie die aktuelle Ariane 5 der Europäischen Weltraumorganisation ESA erreichen Flughöhen von bis zu $36\,000\ km$. Das ist die Höhe, in der sogenannte geostationäre Satelliten die Erde umlaufen (vgl., S. 119). Sonden, die zu anderen Planeten fliegen, können allerdings nicht mit Raketen bis in ihre endgültige Umlaufbahn geflogen werden.
Satelliten und Sonden werden mit der Raketenendstufe in eine nahe Umlaufbahn um die Erde geflogen und vor dem Aussetzen auf die passende Bahngeschwindigkeit $\vec{v}$ tangential zur Erdoberfläche beschleunigt. Die Form der Bahn, auf der der Satellit oder die Raumsonde nun selbst weiterfliegt, hängt vom Betrag v dieser Tangentialgeschwindigkeit ab.



Besondere Tangentialgeschwindigkeiten:

1. kosmische Geschwindigkeit $v_1 = 7{,}9\ \frac{km}{s}$:

Erdnahe Satelliten mit der Tangentialgeschwindigkeit v_1 umlaufen die Erde auf einer Kreisbahn

(Zur Berechnung des Werts der 1. kosmischen Geschwindigkeit: vgl. S. 120).

2. kosmische Geschwindigkeit $v_2 = 11{,}2\ \frac{km}{s}$ = Fluchtgeschwindigkeit:

Sonden müssen in Erdnähe auf die Tangentialgeschwindigkeit v_2 beschleunigt werden, damit sie den Anziehungsbereich der Erde auf einer Parabelbahn verlassen. v_2 ist die niedrigste Geschwindigkeit, bei der eine Sonde sich von der Erde entfernt, ohne zurückzukehren.

(Zur Berechnung des Werts der 2. kosmischen Geschwindigkeit: vgl. S. 123).

Bahngeschwindigkeit auf einer Kreisbahn um die Erde:

$$\text{Zentripetalkraft} = \text{Gravitationskraft}$$

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = G \cdot \frac{m_E \cdot m}{r^2}$$

$$\Longrightarrow \quad \boxed{v = \sqrt{\frac{G \cdot m_E}{r}} = \sqrt{\frac{G \cdot m_E}{R_E + h}}}$$

Dabei sind m_E die Masse der Erde, r der Abstand vom Erdmittelpunkt, R_E der mittlere Erdradius und h die Flughöhe.

Beachte:

- Die Kreisbahngeschwindigkeit ist unabhängig von der Masse m des Satelliten.
- Die für eine Kreisbahn passende Bahngeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Flughöhe h ab.

<u>Anwendungsbeispiele</u>:

Flughöhe eines geostationären Satelliten:
Geostationäre Satelliten umlaufen die Erde so auf einer Kreisbahn, dass sie immer über demselben Punkt auf der Erdoberfläche stehen. Charakteristisch für geostationäre Satelliten ist demnach ihre **Umlaufzeit** $\boldsymbol{T = 24\ h}$.

<u>Beispiel</u>: Fernsehsatelliten.

Bahngeschwindigkeit auf einer Kreisbahn um die Erde mit dem Radius r:

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot m_E}{r}} = \frac{2\pi \cdot r}{T}$$

$$\Longrightarrow \quad r = \sqrt[3]{\frac{T^2}{4\pi^2} \cdot G \cdot m_E} = \sqrt[3]{\frac{(24 \cdot 3600)^2}{4\pi^2} \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot 5{,}974 \cdot 10^{24}\ kg} \approx 4{,}22 \cdot 10^7\ m$$

Flughöhe $\boldsymbol{h}$: $\quad \boldsymbol{h} = r - R_E = 4{,}22 \cdot 10^7\ m - 6371 \cdot 10^3\ m \approx \boldsymbol{36\,000\ km}$

1. kosmische Geschwindigkeit v_1:

Die 1. kosmische Geschwindigkeit v_1 ist die Tangentialgeschwindigkeit, bei der erdnahe Satelliten die Erde auf einer Kreisbahn umlaufen. Von „erdnahen“ Satelliten spricht man, wenn die Flughöhe in einem Bereich von 800 km bis 2000 km liegt.

Für unsere Berechnungen verwenden wir die Näherung: $r \approx R_E$ (bzw. $h = 0$).

Mit dieser Näherung folgt für die Gravitationskraft in der Nähe der Erdoberfläche:

$$F_G = G \cdot \frac{m_E \cdot m}{{R_E}^2} \approx m \cdot g \quad \Longrightarrow \quad \frac{G \cdot m_E}{R_E} = g \cdot R_E$$

$$\boldsymbol{v_1} = v(R_E) = \sqrt{\frac{G \cdot m_E}{R_E}} \approx \sqrt{g \cdot R_E} = \sqrt{9{,}81\,\frac{m}{s^2} \cdot 6371 \cdot 10^3\,m} \approx \mathbf{7{,}9}\,\frac{\boldsymbol{km}}{\boldsymbol{s}}$$

Allgemein gilt für die **1. kosmische Geschwindigkeit um einen Himmelskörper mit dem Radius $\boldsymbol{R}$, auf dem die Fallbeschleunigung den Wert $\boldsymbol{g}$ hat**:

$$\boxed{\boldsymbol{v_1} = \sqrt{\boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{R_E}}} \qquad (FS\ 13)$$

Energetische Betrachtung von Ellipsenbahnen:

Ellipsenbahnen spielen als Satellitenbahnen eine wichtige Rolle. Alle Umlaufbahnen um die Erde sind Ellipsenbahn. Eine Kreisbahn ist der Spezialfall einer Ellipsenbahn für $\varepsilon = 0$.

Die potentielle Energie im Gravitationsfeld der Erde:

Die potentielle Energie E_{pot} eines Körpers der Masse m im Gravitationsfeld der Erde wird über zwei grundlegende Eigenschaften definiert:

- E_{pot} nimmt mit der Höhe zu.
- $E_{pot} = 0$ wenn der Körper sich aus dem Anziehungsbereich der Erde entfernt hat.

  $\Longrightarrow \quad \boldsymbol{E_{pot} \leq 0}$

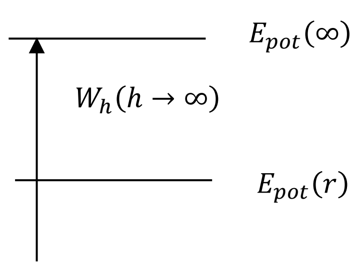
Um einen Körper aus einer Höhe h auf die Höhe zu transportieren, in der die Gravitationskraft der Erde praktisch nicht mehr auf ihn wirkt, muss man ihm folgende Hubarbeit zuführen:

$$W_h(h \to \infty) = G \cdot m_E \cdot m \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\infty}\right) = G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{r}$$

$$E_{pot}(\infty) = 0$$

$$E_{pot}(r) + W_h(h \to \infty) = E_{pot}(\infty) = 0$$

$$\Longrightarrow \quad E_{pot}(r) = -W_h(h \to \infty)$$



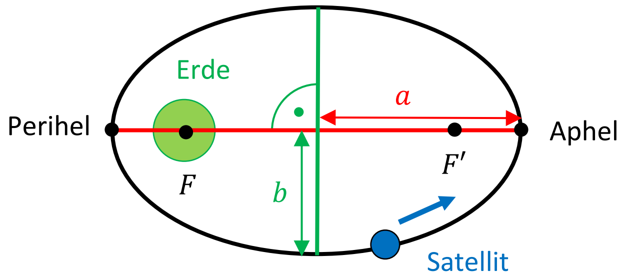
$$\Longrightarrow \quad \boxed{E_{pot}(r) = -G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{r}}$$

Insbesondere folgt:

Potentielle Energie in der Höhe h:

$$\boxed{\boldsymbol{E_{pot}(h) = -G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{R_E + h}}}$$

Gesamtenergie eines auf einer Ellipsenbahn um die Erde laufenden Satelliten:



Im **Aphel** gilt: $E_{ges,A} = E_{pot,A} + E_{kin,A} = -G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{r_A} + \frac{1}{2} m {v_A}^2$

Im **Perihel** gilt: $E_{ges,P} = E_{pot,P} + E_{kin,P} = -G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{r_P} + \frac{1}{2} m {v_P}^2$

Energieerhaltung: Die Gesamtenergie ist überall auf der Ellipsenbahn gleich groß!

$$E_{ges,A} = E_{ges,P} = E_{ges}$$

Die gesuchte Formel für die Gesamtenergie des Satelliten soll nicht von Bahngeschwindigkeiten v_A oder v_P des Satelliten in speziellen Punkten der Bahnellipse sondern nur von der Masse m des Satelliten und der Masse m_E sowie von der großen Halbachse a der Ellipse abhängen.

Deshalb drücken wir in der Formel für $E_{ges,A}$ mithilfe des 2. Keplerschen Gesetzes v_A durch v_P aus, lösen die Formel für $E_{ges,A}$ nach v_P auf und setzen in die Formel $E_{ges,P}$ ein:

Mit **Kepler II** folgt: $r_A \cdot v_A = r_P \cdot v_P \quad \Longrightarrow \quad v_A = v_P \cdot \frac{r_P}{r_A}$

$$\Longrightarrow \quad E_{ges} = E_{ges,A} = E_{pot,A} + E_{kin,A} = -G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{r_A} + \frac{1}{2} m {v_A}^2 = -G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{r_A} + \frac{1}{2} m {v_P}^2 \cdot \frac{{r_P}^2}{{r_A}^2} =$$

$$= -G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{r_A} + E_{kin,P} \cdot \frac{{r_P}^2}{{r_A}^2} = -G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{r_A} + \left(E_{ges,P} + G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{r_P} \right) \cdot \frac{{r_P}^2}{{r_A}^2} \quad \Big| \cdot {r_A}^2$$

$$\Longrightarrow \quad E_{ges} \cdot {r_A}^2 = -G \cdot m_E \cdot m \cdot r_A + E_{ges} \cdot {r_P}^2 + G \cdot m_E \cdot m \cdot r_P \quad \Big| - E_{ges} \cdot {r_P}^2$$

$$\Longrightarrow \quad E_{ges} \cdot ({r_A}^2 - {r_P}^2) = E_{ges} \cdot (r_A - r_P) \cdot (r_A + r_P) = -G \cdot m_E \cdot m \cdot (r_A - r_P)$$

$$\Longrightarrow \quad E_{ges} \cdot (r_A + r_P) = -G \cdot m_E \cdot m$$

$$\Longrightarrow \quad E_{ges} \cdot (2 \cdot a) = -G \cdot m_E \cdot m$$

$\Longrightarrow$ **Gesamtenergie auf einer Ellipsenbahn:** $\boxed{\boldsymbol{E_{ges} = -\frac{1}{2} \cdot G \cdot \frac{m_E \cdot m}{a}}}$

Beachte:

Die Energie auf einer Ellipsenbahn hängt nur von der großen Halbachse a der Ellipse, nicht von ihrer Krümmung ab!

Bahngeschwindigkeit auf einer Ellipsenbahn:

Energiebilanz:

$E_{ges} = E_{pot} + E_{kin}$

$\Longrightarrow \quad E_{kin} = E_{ges} - E_{pot}$

$\Longrightarrow \quad \frac{1}{2} m v^2 = -\frac{1}{2} \cdot G \cdot \frac{m_E \cdot m}{a} - \left(-G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{r}\right) = \frac{1}{2} \cdot G \cdot m_E \cdot m \cdot \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)$

$\Longrightarrow$ Bahngeschwindigkeit auf der Ellipsenbahn: $\boxed{\boldsymbol{v = \sqrt{G \cdot m_E \cdot \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)}}}$ *(FS 12)*

Dabei sind a die große Halbachse der Ellipse und r der momentane Abstand vom Brennpunkt, in dem die Erde steht.

Beachte:

Nach dem 2. Keplerschen Gesetz ändert sich die Bahngeschwindigkeit während der Körper die Ellipse durchläuft. Dies kommt in der r-Abhängigkeit zum Ausdruck. Je nach Abstand r vom Brennpunkt der Ellipse, in dem die Erde steht, hat der auf der Ellipse laufende Satellit eine veränderliche Bahngeschwindigkeit v. An Bahnpunkten mit großem Abstand r vom Brennpunkt ist die Bahngeschwindigkeit v klein und umgekehrt.

Anwendungsbeispiel:

Die 2. kosmische Geschwindigkeit oder Fluchtgeschwindigkeit v_2:

Die 2. kosmische Geschwindigkeit v_2 ist die kleinste Tangentialgeschwindigkeit, auf die eine Sonde in Erdnähe $(r \approx R_E)$ beschleunigt werden muss, damit sie die Erde verlässt und nicht wieder zurückkehrt.
Die Sonde bewegt sich in diesem Fall auf einer Parabelbahn.

Mit der Näherung $(r \approx R_E)$ folgt für die Gravitationskraft in der Nähe der Erdoberfläche:

$$F_G = G \cdot \frac{m_E \cdot m}{{R_E}^2} \approx m \cdot g \quad \Longrightarrow \quad \frac{G \cdot m_E}{R_E} = g \cdot R_E$$

Wenn eine Ellipse zu einer Parabel „entartet“ wird die große Halbachse unendlich groß $(a \rightarrow \infty)$. Somit erhält man die **Fluchtgeschwindigkeit als Grenzwert der Bahngeschwindigkeit auf einer Ellipsenbahn für $\boldsymbol{a} \rightarrow \infty$:**

$$\boldsymbol{v_2} = \lim_{a\to\infty} v = \lim_{a\to\infty} \sqrt{G \cdot m_E \cdot \left(\frac{2}{R_E} - \frac{1}{a}\right)} = \sqrt{G \cdot m_E \cdot \frac{2}{R_E}} \approx \sqrt{2 \cdot g \cdot R_E}$$

$$= \sqrt{2 \cdot 9{,}81\ \frac{m}{s^2} \cdot 6371 \cdot 10^3\ m} \approx \boldsymbol{11{,}2\ \frac{km}{s}}$$

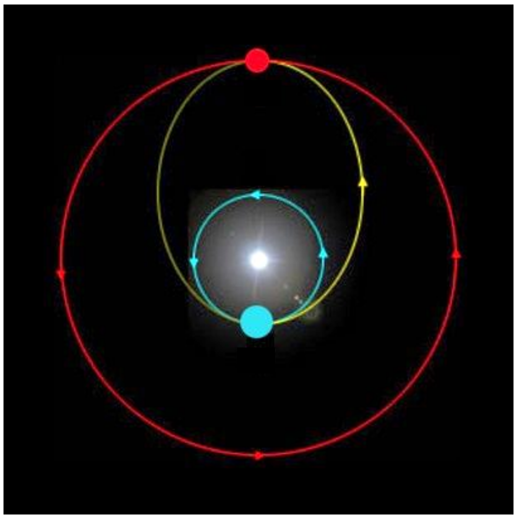
Allgemein gilt für die **2. kosmische Geschwindigkeit um einen Himmelskörper mit dem Radius $\boldsymbol{R}$, auf dem die Fallbeschleunigung den Wert $\boldsymbol{g}$ hat**:

$$\boxed{\boldsymbol{v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot R_E}}} \qquad (FS\ 13)$$

Die Hohmann-Transferbahn:

Als Bahnen von Raumsonden auf dem Weg zu ihrem Ziel kommen grundsätzlich Ellipsen-, Parabel- oder Hyperbelbahnen infrage. **Walter Hohmann** berechnete **1925**, dass Ellipsenbahnen die energetisch günstigsten Flugbahnen sind.

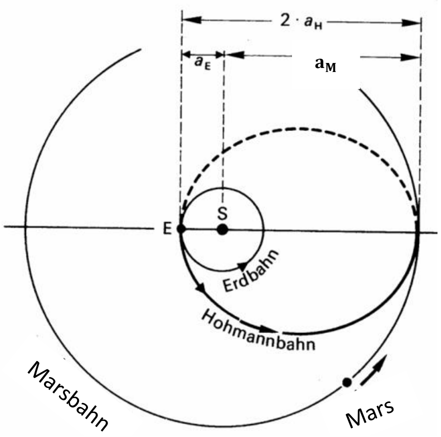
Die Sonde fliegt aus der Umlaufbahn der Erde um die Sonne (blau) auf einer elliptischen Bahn (gelb) in die Umlaufbahn des Zielplaneten um die Sonne (rot). Im Wesentlichen steht die Sonde dabei unter dem Einfluss der Gravitationskraft der zum Zeitpunkt des Fluges zwischen Erde und Zielplanet liegenden Sonne



Die Ellipsenbahn zwischen Erd- und Planetenbahn heißt **Hohmann-Transferbahn**.

Die Raumsonde wird mit einer Rakete tangential zur Erdbahn in die Hohmann-Bahn eingeschossen. Dabei wird die Bahngeschwindigkeit der Erde genutzt. Die Hohmann-Bahn mündet tangential in die Umlaufbahn des Planeten. Dadurch minimiert man die Arbeit zum Abbremsen der Sonde.

Rechenbeispiel: Hohmann-Bahn zum Mars:



große Halbachse der Hohmann-Bahn:

$$a_H = \frac{a_E + a_M}{2} = \frac{1\ AE + 1{,}52\ AE}{2} = 1{,}26\ AE$$

Flugdauer auf der Hohmann-Bahn:

Wir wenden das **3. Keplersches Gesetz** auf die Sonde und die Erde an:

$$\frac{{T_H}^2}{{a_H}^3} = \frac{{T_E}^2}{{a_E}^3} = 1\ \frac{a^2}{AE^3} \quad \Longrightarrow \quad T_H = \sqrt{\frac{{a_H}^3}{AE^3}} \cdot a$$

Flugdauer zum Zielplaneten:

$$T_F = \frac{T_H}{2} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{{a_H}^3}{AE^3}} \cdot a = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(1{,}26\ AE)^3}{AE^3}} \cdot a \approx 0{,}71\ a \approx 258 \text{ Tage}$$

Der Flug zum Mars dauert auf einer Hohmann-Bahn also etwa 8,5 Monate.

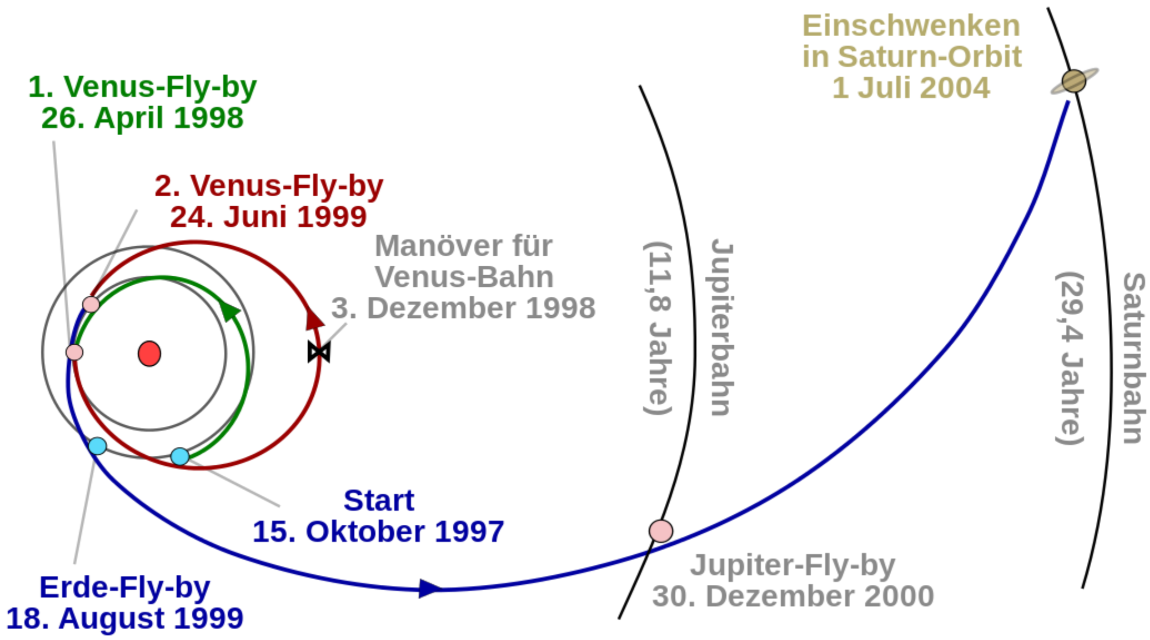
- Die tatsächlichen Flugbahnen der Raumsonden sind wesentlich komplizierter. Insbesondere müssen die Gravitationskräfte aller größeren Himmelskörper in die Berechnung mit eingezogen werden, denen sich die Sonde auf ihrem Flug nähert.

Swing-by-Manöver:

Die Gravitationskraft, die Planeten auf die Raumsonde ausüben, wird gezielt genutzt, um der Sonde während ihres Fluges Bewegungsenergie zuzuführen:

Bei einem sogenannten **Swing-by-Manöver** fliegt die Sonde an einen Planeten heran. Durch seine Gravitationskraft beschleunigt der Planet die Sonde und verliert dabei selbst (unmessbar wenig) Bewegungsenergie. Planet und Sonde haben bei diesem „Rendezvous“ unterschiedliche Bewegungsrichtungen. Deshalb prallt die Sonde nicht auf den Planeten sondern fliegt an ihm vorbei. Die Sonde wird beim Swing-by-Manöver in Richtung zum Planeten hin abgelenkt.

Die **Cassini-Sonde** war fast 7 Jahre lang zum Saturn unterwegs (von 1997 bis 2004). Ihre Flugbahn ist aus zahlreichen Teilstücken von Ellipsenbahnen zusammengesetzt und enthält insgesamt 4 Swing-by-Manöver (in der Skizze: „Fly-by“).



Beim ersten Swing-by an der Venus holte sich die Cassini-Sonde beispielsweise einen Geschwindigkeitsschub von fast 25 000 $\frac{km}{h}$.

Raketenstartplätze:

Aufgrund der Eigenrotation der Erde haben alle Punkte auf der Erdoberfläche, die sich nicht an den Polen befinden, eine Bahngeschwindigkeit v. Diese nimmt mit dem Abstand R von der Erdachse zu und ist am Äquator am größten:

$$v = \frac{2\pi \cdot R}{T_E}$$

Bei einem Erdradius von 6371 km und einer Rotationszeit von 24 Stunden ist die Bahngeschwindigkeit eines Ortes am Äquator immerhin

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{2\pi \cdot R_E}{T_E} = \frac{2\pi \cdot 6371\ km}{24\ h} \approx 1670\ \frac{km}{h}\ .$$

Die in der Eigenrotation der Erde gespeicherte Bewegungsenergie nutzt man bei Raketenstarts als zusätzliche Beschleunigungsarbeit.

Aus diesem Grund befinden sich die meisten **Raketenstartplätze in Äquatornähe** und **Raketen werden in Richtung der Eigenrotationsbewegung der Erde, also nach Osten gestartet**.

Weitere Bedingungen an einen geeigneten Raketenstartplatz sind, dass

- die Umgebung des Startplatzes unbewohnt ist, damit bei Unfällen keine Menschen zu Schaden kommen,
- Raketenstufen, Nutzlasten und Personen gut zum Startplatz transportiert werden können,
- das Klima am Startplatz häufige Starts ermöglicht. Vor allem Gewitter, Höhenwinde und Wirbelstürme können bei Raketenstarts gefährlich werden und
- in der Region stabile politische und wirtschaftliche Verhältnisse herrschen.

Weltweit gibt es **22 Raketenstartplätze**.

Die wichtigsten sind

- **Cape Canaveral** in Florida (Atlas, Titan und bis 2011 Space Shuttle),
- **Kourou in Französisch-Guyana** (Ariane, Sojus) und
- **Baikonur in Russland** (Sojus, Proton, Zenit)

Im Bild rechts ist der Start einer Ariane 5-Rakete in Kourou zu sehen.

7) Die Erforschung des Mars mit Raumsonden

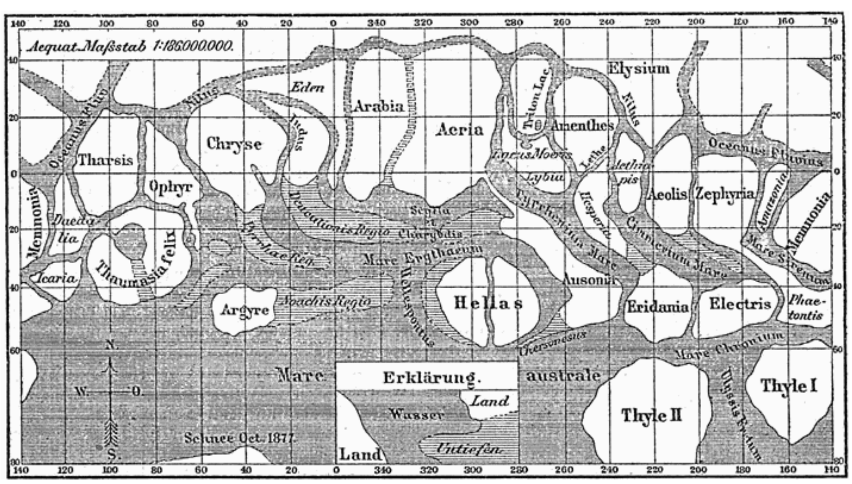
Seit den 1960-er Jahren wurde eine große Zahl von **Raumsonden** zum Mars geschickt. Sie lieferten eine Fülle von Informationen über den Planeten und veränderten unser Bild vom Mars grundlegend. Neben **Orbitern**, die den Planeten aus Umlaufbahnen heraus erforschen, kommen auch **Landesonden** und **Roboterfahrzeuge** zum Einsatz, mit denen die Marsoberfläche unmittelbar analysiert wird. Am Beispiel der Erforschung des Mars mithilfe von Sonden kann man besonders gut erkennen, welche immense Fortschritte die letzten Jahrzehnte im Bereich der unbemannten Raumfahrt brachten. Im Rahmen der Marsforschung wurden innovative Analysemethoden entwickelt und erprobt.

Die Suche nach flüssigem Wasser auf dem Mars:

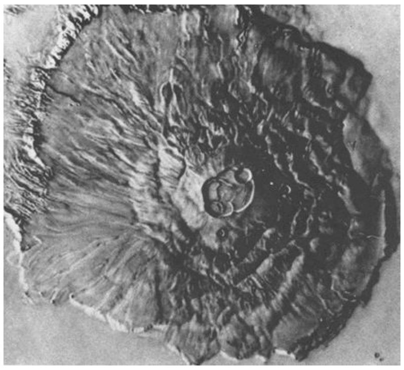
Flüssiges Wasser an der Oberfläche eines Planeten ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Entstehung von Leben. Deshalb war und ist die Suche nach flüssigem Wasser die vorrangige Forschungsaufgabe der Marssonden.

Wasser gibt es auf dem Planeten offenbar in großen Mengen in Form von Wassereis und als Wasserdampf in der Atmosphäre. Die Eisvorkommen befinden sich, vermischt mit Staub, ab etwa einem halben Meter unterhalb der Marsoberfläche und an den Polkappen. Unter anderem mit Radarmessungen ist es Marssonden gelungen, **unterirdische Schichten von Wassereis** nachzuweisen.
Die für den Mars typischen Landschaftsformen wie Überschwemmungsbecken und Flusstäler scheinen durch **flüssiges Wasser** gebildet worden zu sein. Sie lassen vermuten, dass es früher, vielleicht vor 3 bis 4 Milliarden Jahren, flüssiges Wasser an der Marsoberfläche gab. An Kraterrändern wurden von Sonden auch junge Flusstäler entdeckt, die möglicherweise durch abfließendes flüssiges Wasser entstanden sind, wenn Wassereis infolge eines Meteoriteneinschlags auftaute.
Man muss davon ausgehen, dass die physikalischen Rahmenbedingungen auf dem Mars heute so aussehen, dass kein flüssiges Wasser existiert. Zumindest nicht für einen so langen Zeitraum, dass sich Leben entwickeln könnte. Die dünne Atmosphäre des Mars führt im Lauf eines Marstages, der ungefähr so lang dauert, wie ein Tag auf der Erde, zu Temperaturschwankungen zwischen $-120°C$ und $25°C$. Wassereis an der Marsoberfläche hätte zu wenig Zeit, aufzutauen. Der Luftdruck auf der Marsoberfläche beträgt nur etwa 1 % des Luftdrucks auf der Erde. Der niedrige Luftdruck und die geringe Schwerkraft (ca. 40 % der Schwerkraft auf der Erde) bewirken, dass oberflächliches Wassereis sublimiert. Das heißt, Eis verdampft unmittelbar.

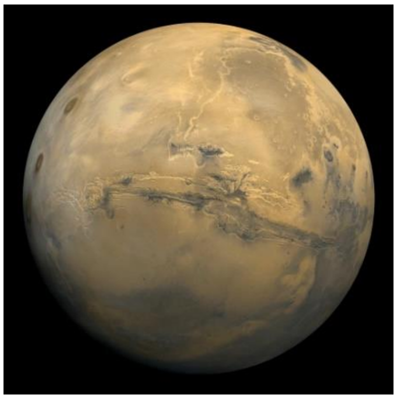
Der italienische Astronom **Giovanni Schiaparelli** (1835 bis 1910) sah auf dem Planeten Mars dunklere Gebiete und streifenartige Muster, die er als „**Marskanäle**“ in Landkarten vom Mars einzeichnete. Schiaparellis Marskanäle wurden als künstliche, von Marsbewohnern angelegte Bewässerungsgräben gedeutet. Das Interesse an der Suche nach flüssigem Wasser und Lebewesen auf unserem Nachbarplaneten nahm mit Schiaparellis Beobachtung seinen Anfang.



Der Marsobiter **Mariner 4** der NASA sendete **1965** erstmals Nahaufnahmen von der Marsoberfläche. Die Fotos waren noch unscharf. Trotzdem war deutlich zu erkennen, dass Schiaparellis Vorstellung von der Marsoberfläche nicht der Realität entspricht. Die „Marskanäle“ stellten sich als optische Täuschung heraus, die auf die Marsatmosphäre zurückzuführen ist.



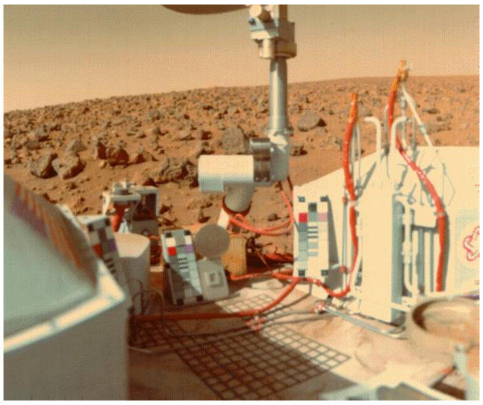
Der Sonde **Mariner 9** gelangen **1971** insgesamt 4500 scharfe Aufnahmen der Marsoberfläche. Mithilfe dieser Fotos wurde die Marsoberfläche kartiert und damit die Grundlage für spätere Missionen geschaffen. Mariner 9 entdeckte insbesondere den $27\ km$ hohen **Vulkan Olympus Mons** (Originalaufnahme rechts).



Einen Meilenstein in der Erforschung des Mars setzten **1976** die NASA-Sonden **Viking 1** und **Viking 2**.

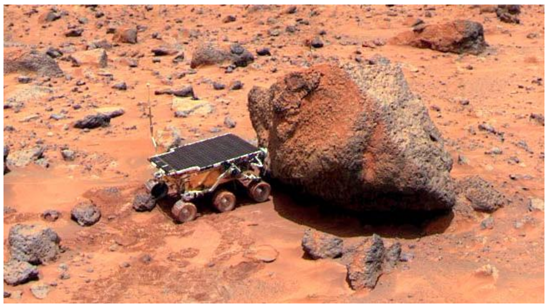
Die beiden Sonden bestanden jeweils aus einem **Orbiter** und einem **Lander**.

Die **Viking-Orbiter** lieferten eine Vielzahl detaillierter Fotos von der Marsoberfläche, aus denen Mosaikbilder vom Mars zusammengesetzt wurden (Bild links). Außerdem beobachteten die Viking-Orbiter Staubstürme auf dem Mars und wiesen spektroskopisch Wasserdampf in der Marsatmosphäre nach.



Die beiden **Landesonden** setzten an Fallschirmen und mithilfe von Bremsraketen weich auf der Marsoberfläche auf. Im Marsstaub konnten die Sonden Schwefel und Brom nachweisen, die als Indizien für frühere Vorkommen von flüssigem Wasser gewertet werden. Diese Elemente werden durch Wasser gelöst und kristallisieren dann aus.

Der Mars ist größtenteils von **Staub** bedeckt. Die Verfrachtung von Staub durch Stürme bestimmt mit Erosion und Ablagerungen das Landschaftsbild auf dem Mars. Zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Marsstaub kam in den Viking-Sonden unter anderem ein **Gas-Chromatograf** zum Einsatz: Staub wurde in einem Ofen auf über $500°C$ erhitzt. Die austretenden Gase analysierte man mithilfe eines Massenspektrografen. Die Viking-Sonden enthielten mehrere Experimente, die nach einfachen Lebensformen auf dem Mars suchen sollten. Diese **biologischen Experimente** verliefen allerdings negativ.

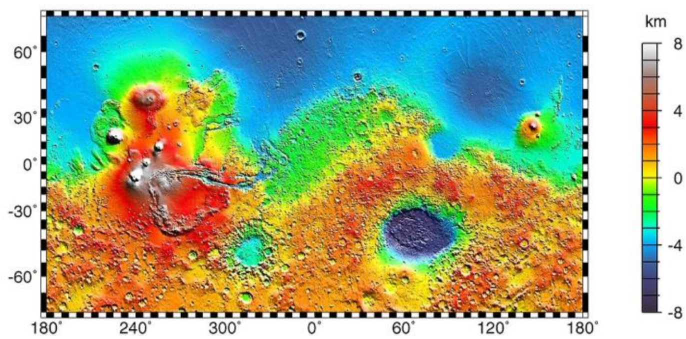


1997 landete die Sonde **Mars Pathfinder** auf der Marsoberfläche und setzte das ferngesteuerte Roboterfahrzeug **Sojourner** ab. Obwohl es sich bei der Pathfinder-Mission primär um eine ingenieurwissenschaftliche Mission handelte, mit der der Einsatz eines Marsfahrzeugs erprobt werden sollte, sorgte die Mars Pathfinder Mission für gewaltiges Aufsehen in den Medien.

Seit **2012** befindet sich der NASA-Roboter **Curiosity** auf dem Mars. Das mit einer Masse von $900\,kg$ bisher schwerste Marsfahrzeug untersucht mit zehn Messgeräten (Kameras, Spektrografen und meteorologische Instrumente) Gestein, Atmosphäre und Strahlung auf dem Mars. Die Abbildung rechts zeigt ein „Selfie“ von Curiosity auf Mars.

Viele wissenschaftliche Erkenntnisse über den Mars lieferte von **1997 bis 2006** der Marsorbiter **Global Surveyor**. Die Sonde umrundete den Mars auf einer Bahn, die über den Polen des Planeten verläuft. Der Mars dreht sich unter dieser polaren Bahn langsam weiter. Mithilfe einer hochauflösenden Kamera konnte die gesamte Marsoberfläche aus einer niedrigen Umlaufbahn mit einer Auflösung von bis zu 2 Metern fotografiert werden.

Mithilfe der Daten eines Laser-Höhenmessers wurde ein **Höhenrelief der Marsoberfläche** erstellt. Dieses Höhenprofil (rechts) zeigt einen auffälligen Unterschied zwischen der nördlichen und der südlichen Halbkugel des Mars: Während die Nordhälfte von Ebenen geprägt wird, ist die Südhälfte durch zahlreiche Krater und Rinnen zerklüftet. Dazwischen gibt es Vulkane.



Der Mars besitzt kein globales **Magnetfeld**. Mithilfe eines Magnetometers konnte Global Surveyor aber über die Marsoberfläche verteiltes magnetisiertes Material lokalisieren, das auf ein früheres Magnetfeld des Planeten hinweist.

Mars Express und die Lander Spirit und Opportunity:

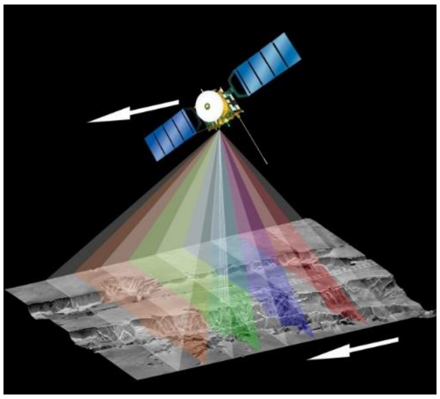
Mars Express:

Die erste Marssonde der Europäischen Weltraumorganisation **ESA** befindet sich seit **2003** in einer Marsumlaufbahn. Mit dem **Orbiter Mars Express** flog der **Marslander Beagle 2**, der aber nach dem Eintritt in die Marsatmosphäre verloren ging.

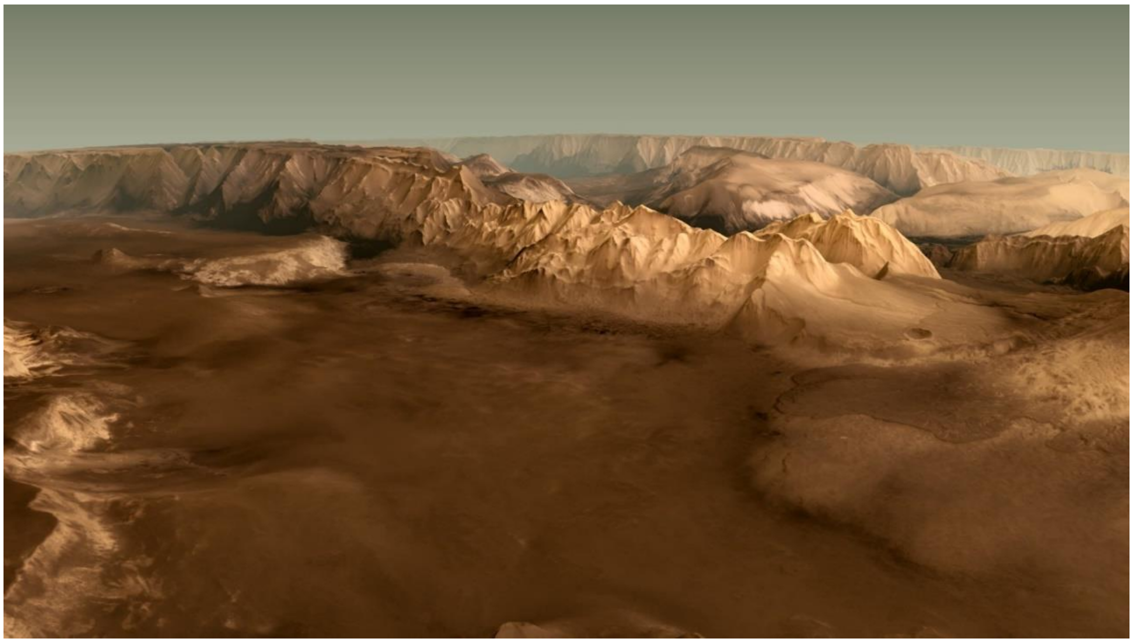
Forschungsziele:

- farbige und dreidimensionale Kartierung der Marsoberfläche in hoher Auflösung, die der einer Wanderkarte entspricht
- Untersuchung der mineralogischen Zusammensetzung der Marsoberfläche und der molekularen Zusammensetzung der Marsatmosphäre
- Erforschung unterirdischer Wassereisschichten in Tiefen bis $5\ km$
- Untersuchung des inneren Aufbaus des Mars durch Vermessung des Gravitationsfeldes des Mars

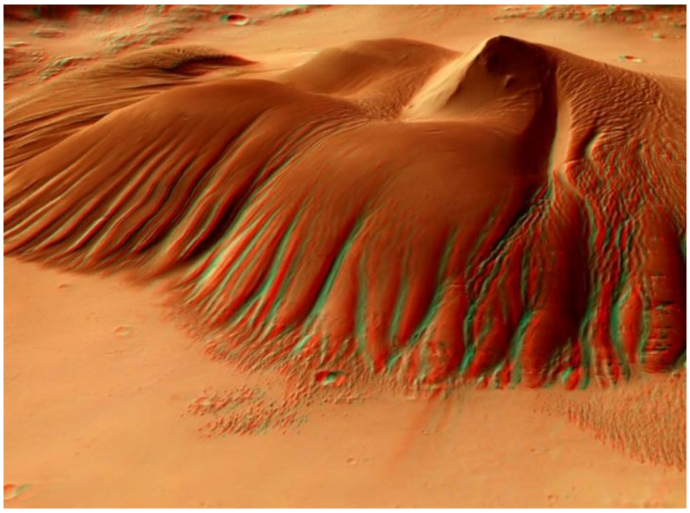
Wissenschaftliche Instrumente:



Die **hochauflösende Stereokamera (HRSC)** von Marsexpress erzeugt dreidimensionale Bilder von der Marsoberfläche, auf denen bis zu 10 Meter große Details erkennbar sind.
Die dreidimensionalen Bilder entstehen dabei ähnlich wie beim menschlichen Sehen: Wir sehen im Nahbereich räumlich, weil unsere Augen Gegenstände unter verschiedenen Blickwinkeln wahrnehmen. Der CCD-Chip der Stereokamera besteht aus 9 Zeilen, die aus unterschiedlichen Richtungen beleuchtet werden. Wenn die Raumsonde über die Marsoberfläche fliegt, „sieht“ jeder Streifen das gleiche Objekt unter einem anderen Winkel. 5 der 9 Steifen werden zur Erzeugung des dreidimensionalen Bildes genutzt.
Die Stereokamera wurde am DLR-Standort Berlin entwickelt.
Die Aufnahme unten zeigt die Landschaft Valles Marineris auf dem Mars.



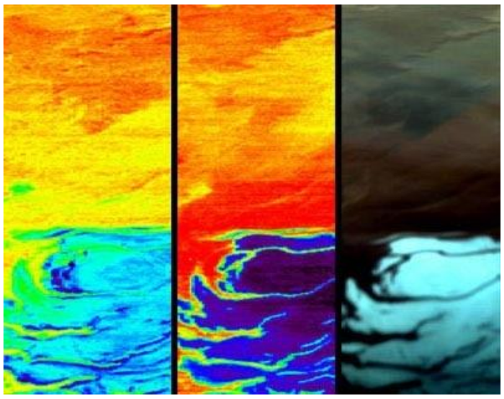
Räumliche Bilder von der Marsoberfläche sind nicht nur faszinierend anzusehen. Sie bieten auch für die Wissenschaft den Vorteil, dass mit der Tiefe zusätzliche Informationen über die Eigenschaften der sichtbaren Objekte enthalten sind.



Manche der HRSC-Aufnahmen wurden in einem Format veröffentlicht, bei dem der 3D-Effekt zutage tritt, wenn man die Bilder mit einer Rot-Grün-Brille betrachtet.

Ein Beispiel ist die Aufnahme eines Berges im Nicholson-Krater.

Mehrere **Spektrometer**, die im **sichtbaren Wellenlängenbereich**, im **Infrarotbereich** und im **UV-Bereich** arbeiten, liefern Informationen über die chemische Zusammensetzung der Marsoberfläche und der Marsatmosphäre. Bei der Reflexion des Sonnenlichts an der Marsoberfläche werden je nach Material und Beschaffenheit der Oberfläche bestimmte Wellenlängen absorbiert. Auch beim Durchgang des Lichts durch die Marsatmosphäre treten für die in der Atmosphäre enthaltene Atome oder Moleküle charakteristische Absorptionseffekte auf.



Die dreiteilige Abbildung zeigt rechts einen Ausschnitt aus der Südpolkappe im sichtbaren Licht, in der Mitte und links Bilder, die aus Infrarotspektren errechnet wurden. In der Mitte tritt Kohlendioxideis blau in Erscheinung, links Wassereis.

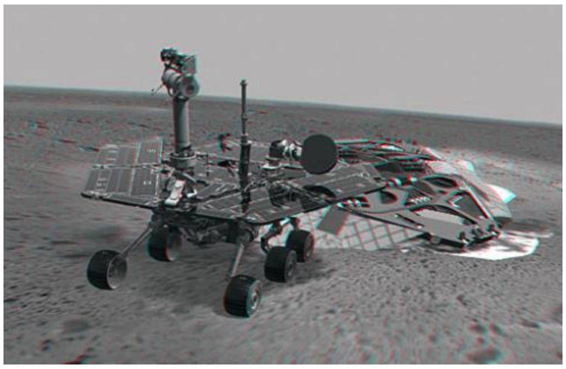
Das **Radarsystem MARSIS**, zu dem die beiden $20\ m$ langen Antennen von MARS Express gehören, dient vorrangig der **Erforschung oberflächennahen Schichten von Wassereis unter der Marsoberfläche**. Beim Übergang von einer Bodenschicht in eine andere werden sie teilweise reflektiert. Das System kann unterscheiden, ob die abgetasteten Schichten trocken, gefroren oder feucht sind.

Lageregelung und Steuerung:

Für die Kontrolle der Mission „Mars Express“ ist das **European Space Operation Centre (ESOC)** in Darmstadt zuständig.

Mars Express muss stets so ausgerichtet sein, dass seine Messgeräte zum Mars und seine Antenne zur Erde zeigen. Positionsbestimmung und Lageregelung erfolgen automatisch mithilfe eines **Sternsensors** und über **Gyroskope** (vgl. Kap. 2, S. 54).

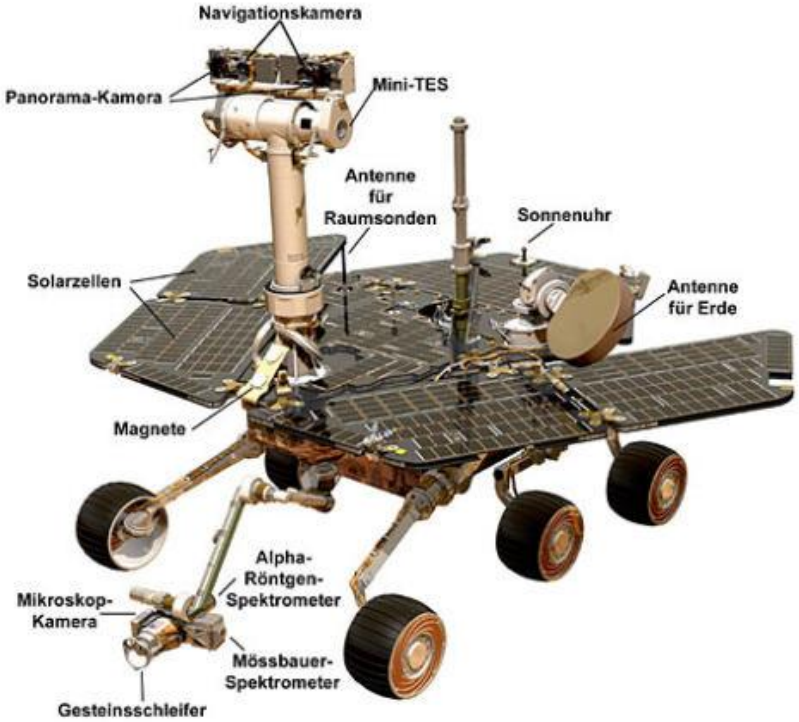
Spirit und Opportunity:



Die beiden **NASA-Marslandesonden Spirit und Opportunity** befinden sich seit **2004** auf dem Mars. Spirit und Oppurtunity landeten in zwei unterschiedlichen Regionen. Opportunity ist heut noch im Einsatz. Der Funkkontakt zu Spirit ging 2010 verloren. Im Folgenden wird Opportunity beschrieben. Der rechnische Aufbau von Spirit ist identsich.

Bei der Landung wurden die Sonden zuerst in der Marsatmosphäre durch Luftreibung abgebremst. Als Schutz gegen die beim Eintritt in die Marsatmosphäre auftretende Reibungshitze dienten ablative Hitzeschutzschilde, die teilweise verdampfen und dabei Wärme abführen. Für eine weiche Landung auf dem Mars sorgten ein Fallschirm, mehrere Luftkissen, die unmittelbar vor dem Aufprall um die Sonden herum aufgeblasen wurden, und Bremsraketen. Nach dem ersten Aufschlag hüpfte die Landesonde noch etliche Male und blieb schließlich auf dem Marsboden liegen.

Steuerung des Marsfahrzeugs:



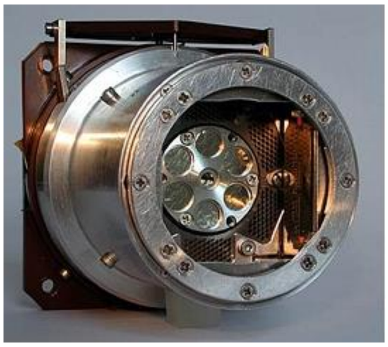
Opportunity verfügt über eine **Panoramakamera** zur Aufnahme seiner unmittelbaren Umgebung und über mehrere **Navigationskameras**. Opportunity muss, gesteuert über die Navigationskameras, automatisch fahren. Ein Funksignal benötigt von der Erde zum Mars 8 Minuten und 45 Sekunden. Die Reaktionszeit beträgt insgesamt also 17,5 Minuten. Der Rover kann deshalb bei seiner Fahrt mit maximal 3 Meter pro Sekunde nicht von der Erde aus ferngesteuert werden.

Wissenschaftliche Instrumente:

Mit einem **Gesteinsschleifer** können die Sonden Marssteine vom Staub reinigen und bis zu $5\ mm$ tiefe Löcher mit einem Radius von $4{,}5\ cm$ bohren. Die chemische Analyse von festem Gestein ist schwieriger als die Analyse von Staub, hat aber den Vorteil, dass festes Gestein tatsächlich aus der untersuchten Region stammt, während Staub auch aus anderen Gegenden des Mars angeblasen worden sein kann.

Zwei Geräte zur Gesteinsanalyse wurden eigens für die Spirit und Opportunity entwickelt: ein **Alpha-Röntgen Spektrometer** und ein **Mößbauer-Spektrometer**. Mit einer **Mikroskop-Kamera** werden Details der untersuchten Objekte fotografiert. Zur Untersuchung eines Marssteins hält der Rover seinen Greifarm mit den Messgeräten 10 Minuten bis mehrere Stunden in die Nähe des Steins. Dies hat der Sonde den Spitznamen „**Schnüffler**“ eingebracht.

Das Alpha-Röntgen-Spektrometer:



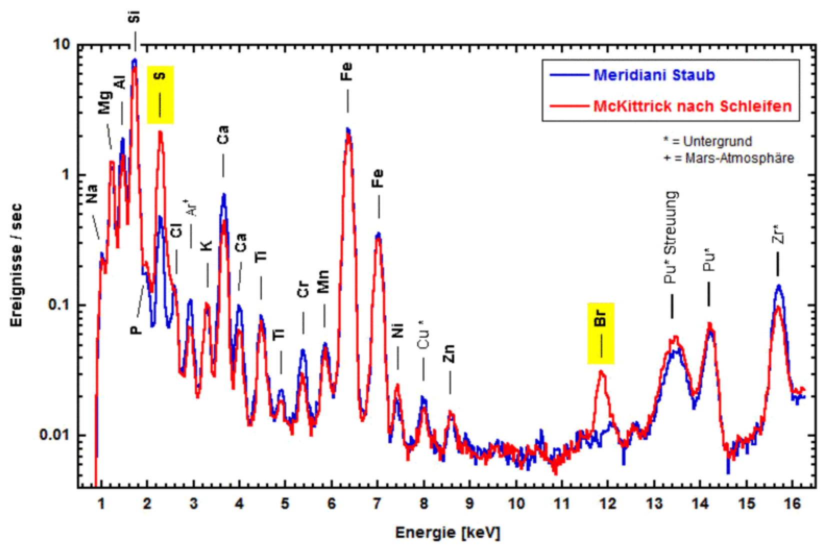
Mit diesem am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz entwickelten Gerät kann Opportunity mit Ausnahme von Wasserstoff alle wichtigen chemischen Elemente identifizieren, die im Marsgestein vorkommen.

Während der Messung wird die Probe mit Alphateilchen und Röntgenstrahlung einer radioaktiven Quelle beschossen. Als Quelle wird Curiumsilizid verwendet. Sie enthält das Isotop Curium 244, das die besondere Eigenschaft hat, sowohl Alphastrahlung als auch Röntgenstrahlung auszusenden.

Durch den Beschuss mit Alphateilchen und Röntgenstrahlung werden die Atome der Probe zur Aussendung von Röntgenstrahlung angeregt. **Alphateilchen** eignen sich zur Anregung leichter chemischer Elemente wie Natrium, Magnesium, Aluminium und Silizium. **Röntgenstrahlung** eignet sich hingegen zur Anregung schwerer Elemente wie Eisen, Nickel, Zink oder Brom.

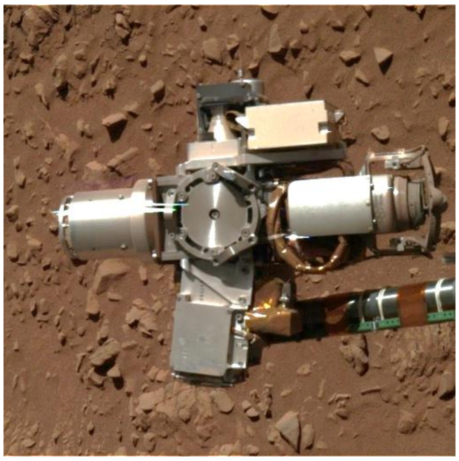
Bei der Anregung von Atomen des untersuchten Marsgesteins durch Röntgenstrahlung werden Elektronen aus inneren Schalen der Atome gerissen. Die von den Atomen emittierte Röntgenstrahlung entsteht, wenn äußere Hüllenelektronen der Atome in die Elektronenlücken auf den inneren Schalen des Atoms springen. Dabei werden Röntgen-Photonen ausgesandt, deren Energie bzw. Wellenlänge der Energiedifferenz beim Elektronensprung entspricht. Diese Energiedifferenzen sind charakteristisch für die chemischen Elemente. Deshalb kann aus den Wellenlängen und Häufigkeiten der gemessenen Röntgenphotonen auf die chemische Zusammensetzung des Gesteins geschlossen werden. Die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Photonen mit bestimmten Wellenlängen bzw. Energien bezeichnet man als Spektrum.

Das Bild rechts zeigt ein mit dem Alpha-Röntgen-Spektrometer gewonnenes **Röntgenspektrum**. Man kann daraus ablesen, welche chemischen Elemente das untersuchte Gestein enthält und wie groß die Häufigkeit dieser Elemente in der Probe war.



Ein wichtiges Ergebnis der Messungen von Opportunity ist, dass das untersuchte Marsgestein auffällig viel Schwefel und Brom enthält, was darauf hinweist, dass das Gestein in Kontakt mit flüssigem Wasser stand.

Das Mößbauer-Spektrometer:



Das Mößbauer-Spektrometer der Sonden Spirit und Opportunity wurde am Institut für Kernphysik der TU Darmstadt und am Institut für Anorganische Chemie und Analytische Chemie der Universität Mainz entwickelt.

Die Funktionsweise des Messgeräts beruht auf einem kernphysikalischen Effekt, dem **Mößbauer-Effekt**:

Durch Beschuss mit einem Gamma-Photon wird ein Atomkern in einen angeregten Zustand versetzt. Er springt unter Aussendung eines Gamma-Photons in den Grundzustand zurück.

Ein **Kern eines nicht in einem Kristallgitter gebundenen Atoms** erleidet beim Aussenden des Gamma-Photons einen Rückstoß. Das emittierte Gamma-Photon hat dann eine um die Rückstoßenergie kleinere Energie als das anregende Gamma-Photon. Weil nur Gamma-Photonen mit einer sehr genau festgelegten und für unterschiedliche Atomkerne charakteristischen Energie Atomkerne anregen können, kann das emittierte Gamma-Photon keine benachbarten Atomkerne anregen. Es wird nicht absorbiert. Anschließend wird das emittierte **Gamma-Photon mithilfe eines Detektors für Gamma-Photonen registriert**.

Ist das **Atom mit dem angeregten Kern jedoch in einem Kristallgitter gebunden**, so kann das unbewegliche Atom keine Rückstoßenergie aufnehmen. Das emittierte Gamma-Photon hat in diesem Fall die gleiche Energie wie das anregende Gamma-Photon und kann nun einen benachbarten Atomkern anregen. Das emittierte **Gamma-Photon wird** im Kristall absorbiert und **im Detektor nicht registriert**.

Um Gamma-Photonen mit der zur Anregung von Atomkernen geeigneten Energie zu erhalten, wird die Strahlungsquelle mit einer genau definierten Geschwindigkeit auf die Probe zu- oder von der Probe weggefahren. Durch den Dopplereffekt (vgl. Kap. V, S. 212ff) verschiebt sich so die Energie der von der Quelle ausgesandten Gamma-Photonen zu größeren bzw. kleineren Werten.
Mit diesem Verfahren lassen sich insbesondere Eisenverbindungen wie das Eisenoxid **Hämatit** identifizieren. Hämatit entsteht, wenn das Gestein Kontakt mit flüssigem Wasser hatte.

Spirit und Opportunity konnten Hämatit nachweisen und lieferte damit einen weiteren **Hinweis auf frühere Vorkommen flüssigen Wassers auf Mars**.

Mit einer Fahrstrecke von fast $43\ km$ stellte Opportunity einen Rekord für die weiteste mit einem Roboterfahrzeug auf einem Himmelskörper außerhalb der Erde zurückgelegte Entfernung auf.

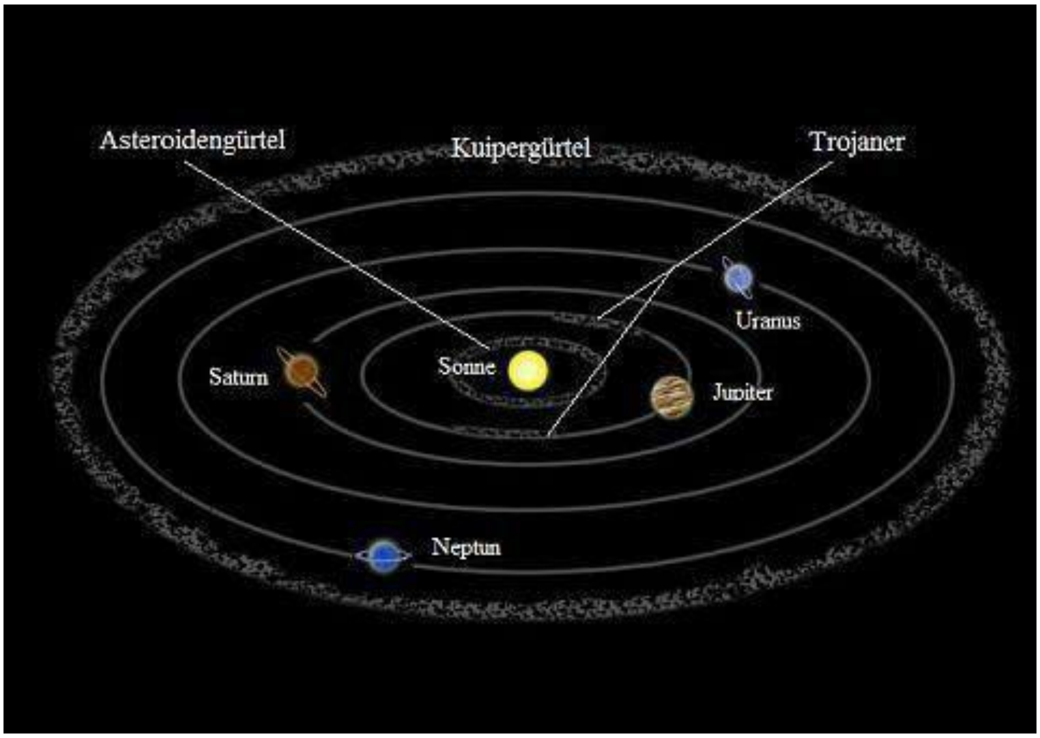
8) Asteroiden und Zwergplaneten

Asteroiden (auch **Kleinplaneten** oder **Planetoiden**) sind mehrere bis mehrere hundert Meter große Himmelskörper, die ähnlich wie Planeten auf Ellipsenbahnen die Sonne umlaufen. Im Gegensatz zu **Zwergplaneten** sind Asteroiden in der Regel nicht kugelförmig. Eine klare Trennung zwischen Asteroiden und **Meteoriden** gibt es nicht. Üblicherweise bezeichnet man aber Himmelskörper deren Durchmesser wenige Meter groß oder kleiner ist, als Meteoriden. Im Bild rechts ist der Asteroid Eros zu sehen, den die Sonde NEAR-Shoemaker im Jahr 2001 besuchte.

Die **Bahnen von Asteroiden** sind in der Regel stark gekrümmte Ellipsen, die im Vergleich zu Planetenbahnen stark gegen die Ekliptik geneigt sind.

Asteroiden und Zwergplaneten bestehen aus **Gestein oder Metall**. Teilweise ist die Dichte von Asteroiden so gering, dass sie vermutlich aus lockerem Schutt bestehen, der lediglich durch die eigene Gravitationskraft zusammengehalten wird. Entstanden sind sie vermutlich zusammen mit den Planeten in der Entstehungsphase des Sonnensystems. Möglicherweise sind Kleinkörper wie Asteroiden und Zwergplaneten die Überreste von Kollisionen größerer Objekte.

Bisher sind mehr als 725 000 Asteroiden bekannt. Die meisten von ihnen befinden sich im **Asteroidengürtel** zwischen den Planeten Mars und Jupiter oder im **Kuipergürtel**, der außerhalb der Neptunbahn in einer Entfernung von 30 AE bis 50 AE von der Sonne liegt.



Große **Asteroiden** im Asteroidengürtel sind **Pallas**, **Vesta**, **Juno** und **Astraea** mit Durchmessern von 560 km, 516 km, 257 km und 117 km.

Die kugelförmige **Ceres** mit einem Durchmesser von 963 km ist ein **Zwergplanet im Asteroidengürtel**.

Zwergplaneten im Kuipergürtel mit Durchmessern von etwa 1000 km bis mehr als 2000 km sind **Pluto**, **Eris**, **Makemake** und **Haumea**.

Himmelskörper, deren Umlaufbahn um die Sonne außerhalb der Neptunbahn liegen, bezeichnet man als **Transneptunische Objekte**. Die Zwergplaneten und Asteroiden des Kuipergürtels zählen zu den Transneptunischen Objekten.

Weitere Gruppen von Kleinkörpern im Sonnensystem sind

- die **Zentauren** (zwischen den Planeten Jupiter und Neptun),
- die **Damocloiden** mit stark exzentrischen, rückläufigen Bahnen, deren Aphel häufig außerhalb der Uranusbahn und deren Perihel im inneren Sonnensystem liegen. Die bisher bekannten Damocloiden haben Durchmesser von etwa $8\ km$ sind Kometenkernen sehr ähnlich.
- die **Trojaner**, die vor oder hinter den Planeten auf den Planetenbahnen um die Sonne laufen.

Entdeckung von Asteroiden und Suchmethoden:

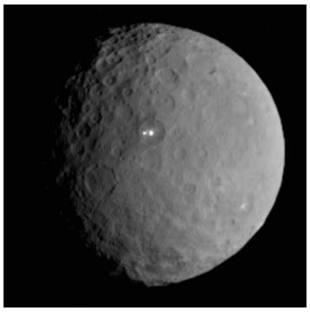
Mit **Ceres**, **Pallas**, **Juno** und **Vesta** wurden die ersten vier Asteroiden bzw. Zwergplaneten in den Jahren **1801 bis 1807** mit dem Teleskop entdeckt. **1845** folgte **Astraea**. Anfangs hatten alle diese Himmelskörper Planetenstatus. Neptun galt deshalb bei seiner Entdeckung 1846 als 13. Planet. Die **Unterscheidung in Planeten und Asteroiden** wurde erst **1890** notwendig. Bis dahin hatte man bereits 300 Asteroiden entdeckt.

Dass **1890** die **Fotografie** als nützliches Hilfsmittel für die Astronomie erkannt wurde, führte zur Entdeckung zahlreicher weiterer Asteroiden. Auf den Fotoplatten, die zudem wesentlich lichtempfindlicher waren als das Auge, waren Asteroiden leicht erkennbar, weil sie sich, wie die Planeten, relativ zu den Fixsternen am Nachthimmel bewegen. Die Häufigkeit, mit der Asteroiden und Zwergplaneten entdeckt wurden, nahm weiter zu, als **1990** in der Fotografie die **CCD-Technik** und entsprechende **Software** zur Suche von Asteroiden eingeführt wurden.

Eine sehr effektive Methode zur Suche von Kleinkörpern ermöglicht die **Radioastronomie**: Die Parabolantennen der Radarteleskope können Radiowellen nicht nur empfangen, sondern auch senden. Über die Messung der Laufzeit starker Radio-Pulse, die zu Asteroiden gesandt und nach ihrer Reflexion wieder empfangen werden, können die Entfernung, aber auch Form und Größe von Asteroiden bestimmt werden.

Auch **Raumsonden** wurden mehrfach zur Erforschung von Asteroiden und Zwergplaneten eingesetzt. Beispielsweise beobachtete **1991** die Sonde **Galileo** auf ihrem Weg zu Jupiter die Asteroiden **Gaspra** und **Ida** im Vorbeiflug. Die Sonde **NEAR-Shoemaker** landete **2001** auf dem Asteroiden **Eros**. Die japanische Sonde **Hayabusa** entnahm **2005** Gesteinsproben vom Asteroiden **Itokawa** und warf diese 2009 in einer Kapsel über Australien ab.

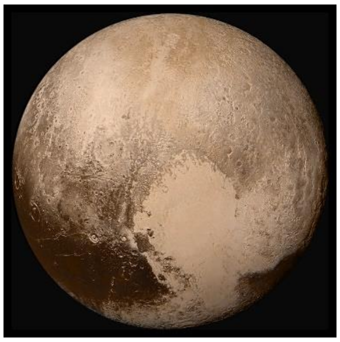
Seit **2015** umkreist die Raumsonde **Dawn** den Zwergplaneten **Ceres** (Bild rechts). Ceres befindet sich mit einer mittleren Entfernung von etwa $2{,}8\ AE$ von der Sonne an der sogenannten **Wassereisgrenze**. In noch größeren Entfernungen ist die Temperatur so niedrig, dass Wassereis nicht mehr in den Weltraum sublimiert. Aufnahmen aus nur $4400\ km$ Entfernung zeigen eine mit Einschlagskratern übersäte Oberfläche. In den Kratern sind bis zu $22\ km$ hohe Zentralberge erkennbar. Auffällig sind weiße Flecken mit einer Größe von mehreren Kilometern. Möglicherweise handelt es sich dabei um Salz oder frisches Wassereis aus tieferen Schichten.



Der Zwergplanet Pluto:

Pluto ist seit 2006 kein Planet mehr, aber das bekannteste Beispiel für einen **Zwergplaneten** (vg. S. 137).

Pluto wurde **1930** von dem Amerikaner **Clyde Tombaugh** mithilfe eines **Blinkkomparators** entdeckt, in dem durch abwechselnde Betrachtung zweier in einigem zeitlichen Abstand aufgenommener Fotographien Objekte sichtbar werden, die ihre Position relativ zu den Fixsternen verändern.



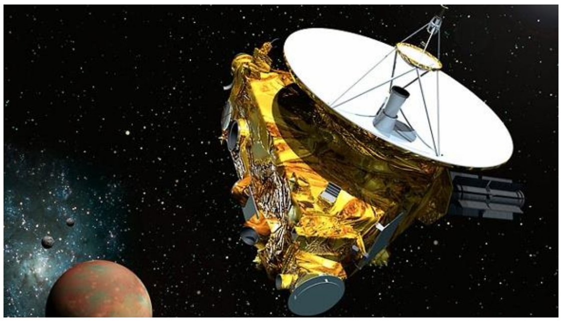
- Einen Blinkkomparator kann man bei einem Besuch der Astronomie-Ausstellung im Deutschen Museum in Münchens selbst ausprobieren.

Pluto ist deutlich kleiner als der Erdmond.
Der Zwergplanet besteht vermutlich aus einem Gesteinskern, der von Wasser- und Stickstoffeis umhüllt ist.
Von Pluto sind **5 Monde** bekannt. Eine Besonderheit des Zwergplaneten ist, dass er von einem Mond, **Charon**, begleitet wird, der von vergleichbarer Größe und Masse ist, wie Pluto selbst.

Ungewöhnlich ist auch die **starke Bahnneigung** Plutos von $17{,}2°$ gegenüber der Ekliptikebene und die **starke Exzentrizität** seiner Ellipsenbahn ($\varepsilon = 0{,}25$). Die starke Krümmung der Pluto-Bahn führt dazu, dass Pluto zeitweise der Sonne näher ist, als Neptun. Bei Plutos Oberfläche geht man von einer vereisten Landschaft aus, was auf Oberflächentemperaturen von $-235°C$ bis $-210°C$ zurückzuführen ist.

Am sonnenfernsten Punkt empfängt Pluto nur ein 2430stel der Sonneneinstrahlung wie die Erde. Die Sonne erscheint 50-mal kleiner als auf der Erde. Die Sonne sähe für einen Pluto-Bewohner wie ein sehr heller Stern aus. Pluto besitzt eine nur etwa $1600\ m$ dünne **Atmosphäre**, die hauptsächlich aus Stickstoff besteht.

Die Pluto-Mission „New Horizons“:



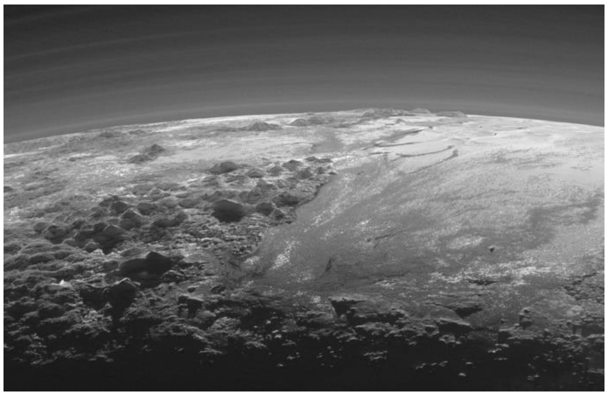
Nach ihrer neunjährigen Reise durch das Sonnensystem flog die am 19.1.2006 gestartete Sonde „**New Horizons**“ am **14 Juli 2015** in $12\,500\ km$ Entfernung an Pluto vorbei.

Forschungsziele der New Horizons Mission waren

- Kartographierung der Oberflächen und der Oberflächentemperaturen des Pluto und seines größten Mondes Charon
- Suche nach einer Atmosphäre bei Charon
- Suche nach chemischen Verbindungen wie Wasserstoff, Zyanwasserstoff und Kohlenwasserstoffen

Alle Missionsziele wurden hervorragend erfüllt. New Horizons lieferte detaillierte Informationen zum ehemals neunten Planeten des Sonnensystems, von dem bisher auf den besten Aufnahmen lediglich eine verschwommene Scheibe zu sehen war und über dessen Eigenschaften man nur spekulieren konnte.

Neue Aufnahmen der Pluto-Oberfläche zeigen eine auffällig große ebene Eisfläche ohne Meteoritenkrater, die sogenannte **Sputnik-Ebene**. Am Rand dieser Ebene ragen die $3000\ m$ bis $5000\ m$ hohen Gipfel des **Norgay Gebirge** aus Wassereis auf (Bild rechts).

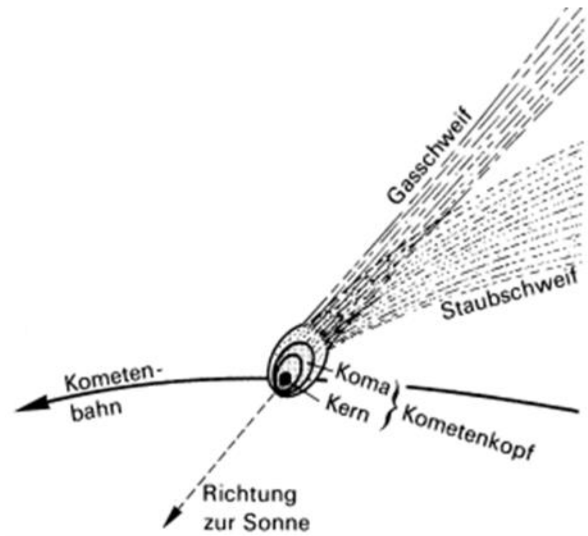


Auf den folgenden beiden von der New Horizons-Sonde aufgenommenen Fotos sind links **Pluto** und rechts **Charon** zu sehen.

Charon besitzt eine vereiste Oberfläche mit Grabenbrüchen, die auf tektonische Aktivität hinweisen. Es sind kaum Einschlagskrater von Meteoriten zu erkennen. Daraus kann man schließen, dass die Oberfläche des Charon noch jung ist.

9) Kometen:

Die Beobachtung eines Kometen war für astronomisch interessierte Menschen zu allen Zeiten ein besonderes Erlebnis. Das wohl berühmteste Beispiel für einen sogar mit bloßem Auge beobachtbaren Kometen ist der Ende 1996 und Anfang 1997 sichtbare Komet **Hale-Bopp**. Auf dem in Istrien aufgenommenen Foto von Hale-Bopp sind deutlich die beiden Schweife des Kometen zu erkennen. Die Bezeichnung „Komet" geht auf das lateinische Wort „coma", das auf deutsch „Haar" bedeutet, zurück. Kometen wurden in der Antike als „Haarsterne" und werden noch heute als „Schweifsterne" bezeichnet. In der mittelalterlichen Astrologie galten die Sichtbarkeiten von Kometen als Vorboten von Katastrophen wie Seuchen oder Kriegen.



Der Aufbau eines Kometen lässt sich unterteilen in den **Kometenkopf**, der wiederum aus dem Kometenkern und der Koma besteht, und die **Kometenschweife**.

Der **Kern** eines Kometen besteht aus Eis, Staub und Gesteinsbrocken („schmutziger Schneeball"). Die Durchmesser von Kometenkernen liegen zwischen $1\ km$ und $100\ km$.

Die **Sichtbarkeit eines Kometen** hängt von seinem Sonnenabstand ab: Kometenkerne sind in der Regel schwarz und reflektieren das Sonnenlicht etwa so stark, wie Holzkohle. Kometenkerne können in guten Teleskopen beobachtet werden, wenn sie sich der Sonne bis auf etwa $\mathbf{10\ AE}$ nähern. Diese Entfernung entspricht ungefähr dem Bahnradius des Saturn.

Wenn der Kometenkern der Sonne **näher als $\mathbf{10\ AE}$** kommt, verdampft Kernmaterie. Um den Kern bildet sich die **Koma**, eine Wolke aus Gas und Staub. Die Koma wird umso größer, je näher der Komet der Sonne kommt und kann einen Durchmesser von der Größenordnung $10\ 000\ km$ erreichen.

Kometen, die der Sonne **näher als $\mathbf{2\ AE}$** kommen (Marsbahnradius!), bilden einen, manchmal auch zwei **Schweife** mit einer Länge von $10^4\ km$ bis $10^8\ km$.

Der **Gasschweif** entsteht, wenn der Sonnenwind (elektrisch geladene Teilchen, hauptsächlich Elektronen und Protonen, die von der Sonne mit hohen Geschwindigkeiten ins Weltall geschleudert werden) Ionen der Koma mitreißen. Der Gasschweif besitzt eine sehr geringe Trägheit und ist deshalb immer radial von der Sonne weggerichtet.

Der **Staubschweif** entsteht, wenn Staubteilchen durch den Strahlungsdruck der Sonne aus der Koma „weggeblasen" werden. Wegen ihrer größeren Masse besitzen die Staubteilchen eine größere Trägheit. Der Staubschweif zeigt deshalb eine Krümmung von der Bewegungsrichtung des Kometen weg.

Bei den meisten Kometen werden Koma und Schweife erst im Teleskop sichtbar.

Ähnlich wie Planeten bewegen sich Kometen auf **Ellipsenbahnen** mit der Sonne in einem Brennpunkt. In der Regel sind die Bahnen von Kometen sehr stark gekrümmt. Aus dem 2. Keplerschen Gesetz folgt insbesondere, dass sich Kometen auf ihren Bahnen in Sonnennähe viel schneller bewegen, als in Sonnenferne (vgl. S. 81f). Die großen Halbachsen von Kometenbahnen gehen häufig weit über das Planetensystem der Sonne hinaus. Beobachten kann man einen Kometen nur, wenn er im Perihel seiner Bahn der Sonne nahe genug kommt.

Die beobachtbaren Kometen teilt man in **zwei Klassen** ein:

Langperiodische Kometen bewegen sich auf Ellipsenbahnen mit großen Halbachsen, die die halbe Entfernung zum nächsten Fixstern (Proxima Centauri, $4{,}3\ Lj$) erreichen können. Die Umlaufzeiten betragen dabei 10^5 bis 10^6 Jahre. Deshalb sind langperiodische Kometen (auf die Menschheit bezogen) höchstens einmal sichtbar und verschwinden dann wieder im All. Wegen ihrer riesigen Halbachse wird die Bahn von langperiodischen Kometen häufig als Parabelbahn bezeichnet. Tatsächlich handelt es sich aber auch hier um eine Ellipsenbahn, von der nur ein (parabelähnlicher) Teil betrachtet wird.

Kurzperiodische Kometen bewegen sich auf Ellipsenbahnen mit großen Halbachsen zwischen $2\ AE$ und $30\ AE$ (etwa die Bahnradien von Mars bzw. Neptun). Ihre Umlaufdauer beträgt 2 Jahre bis 200 Jahre. Die Masse eines solchen „wiederkehrenden“ Kometen nimmt bei jedem Periheldurchgang ab, was im Laufe der Zeit zu einer Helligkeitsabnahme führt.

<u>Beispiele</u>:

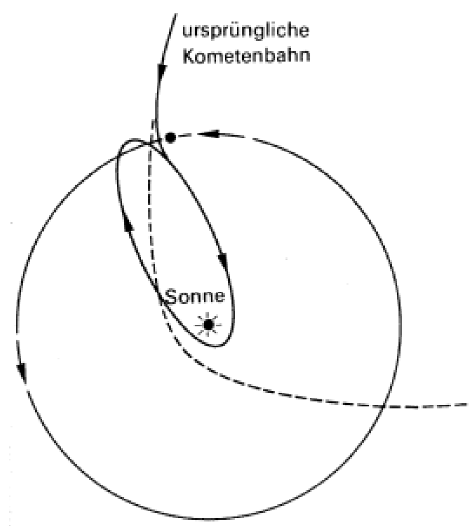
Der Komet **Hale-Bopp** ist ein langperiodischer Komet. Seine große Halbachse hat eine Ausdehnung von etwa $186\ AE$. Die Umlaufzeit beträgt etwa 2540 Jahre.

Ein wichtiges Beispiel für einen kurzperiodischen Kometen ist der **Halleysche Komet**. Die große Halbachse der Bahn dieses Kometen ist nur 17,8 AE lang. Seine Umlaufdauer variiert wegen der gravitativen Einwirkung der Planeten zwischen 74 und 79 Jahren. Der Komet wurde beispielsweise durch Johannes Kepler im Jahr 1607 beobachtet. Edmond Halley, nach dem der Komet benannt wurde, beobachtete ihn 1682 und berechnete seine Wiederkehr für das Jahr 1759 voraus.

Herkunft der Kometen:

Die Kometen sind in der Entstehungszeit des Sonnensystems vor etwa 4,6 Milliarden Jahren zusammen mit den Planeten entstanden und stammen aus der **Oortschen** Wolke, einem Ring aus Gesteins- und Eisbrocken mit einem mittleren Radius von bis zu $100\ 000\ AE$, der das Sonnensystem umgibt und schätzungsweise 100 Milliarden Kometen enthält.

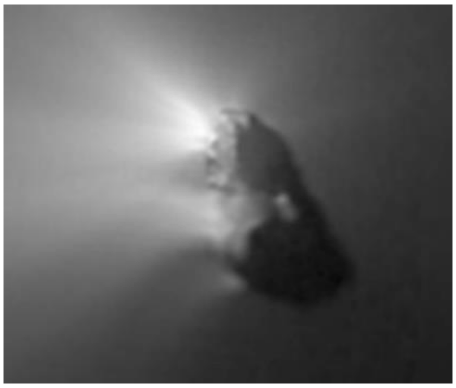
Ein aus der Oortschen Wolke kommender Komet wird zu einem kurzperiodischen Kometen, wenn er auf seiner Bahn der Sonne so nahe kommt, dass er von der Sonne „eingefangen“ wird (siehe Skizze rechts!).



Die Erforschung von Kometen mithilfe von Raumsonden:

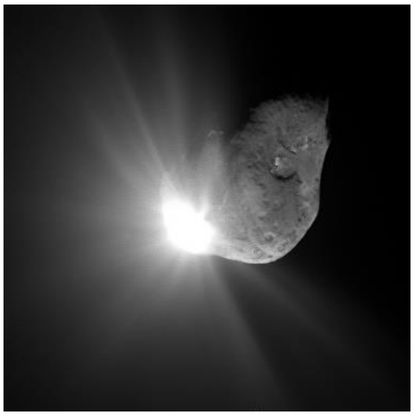
Weil Kometen Relikte aus der Entstehungszeit des Sonnensystems sind, besteht großes Interesse daran, genauere Erkenntnisse über die chemische Zusammensetzung der Kometen zu gewinnen. Es gibt insbesondere Theorien, dass bei früheren Einschlägen von Kometen auf der Erde ein Großteil des Wassers der Weltmeere und vielleicht auch Aminosäuren, die als Bausteine von Eiweiß eine wichtige biochemische Bedeutung haben, auf die Erde gekommen seien. Derartige Theorien versucht man zu überprüfen, indem man mithilfe von Raumsonden Material aus der Koma und von Kometenkernen untersucht.

Die europäische Raumsonde **Giotto** lieferte **1986** im Vorbeiflug aus nur $600\ km$ Entfernung Aufsehen erregende Bilder vom **Kern des Halleyschen Kometen**. Die Aufnahmen zeigten einen schwarzen, erdussförmigen Kometenkern, aus dem Gas- und Staubfontänen entweichen.



Ähnliche Bilder vom Kern des Kometen **Borrelly** lieferte **2001** die NASA-Sonde **Deep Space 1**, als sie in einem Abstand von $2000\ km$ am Kern des Kometen vorbeiflog.

Im Jahr **2004** sammelte die NASA-Sonde **Stardust** Staub aus der Koma des Kometen **Wild 2**. Die Staubpartikel landeten 2006 in einer Kapsel auf der Erde und wurden untersucht.



Die Sonde **Deep Impact** (NASA) beschoss im Jahr **2005** den Kern des Kometen **Tempel 1** mit einem $372\ kg$ schweren Kupferblock. Das Projektil traf mit einer Geschwindigkeit von $37\,000\ \frac{km}{h}$ auf dem Kometenkern auf und löste eine gewaltige Explosion aus, die insbesondere von der ESA-Sonde Rosetta im Vorbeiflug beobachtet wurde.

In Folge der Explosion trat aus dem Kometenkern eine Fontäne mit geschmolzenem Kernmaterial aus. Zusätzlich wurde eine große Staubwolke aus der offenbar staubförmigen Oberflächenschicht des Kometen aufgewirbelt. Aus den Wurfbahnen der Staubpartikel konnte die Dichte des Kometenkerns bestimmt werden. Sie beträgt etwa ein Drittel der Dichte von Wassereis. Der Kern von Tempel 1 scheint aus porösem Material zu bestehen. Die Analyse des ausgeworfenen Kernmaterials zeigte, dass der Kometenkern neben Wasser unter anderem auch Kohlendioxid und komplexe organische Verbindungen enthält.

Die Rosetta-Mission zum Kometen Tschurjumow-Gerassimenko:

Der von den russischen Astronomen Klym Tschurjumow und Swetlana Gerassimenko 1969 entdeckte Komet **Tschurjumow-Gerassimenko** zählt zu den kurzperiodischen Kometen. Seine größte Entfernung von der Sonne beträgt $5{,}7\ AE$ und entspricht damit etwa dem Radius der Jupiterbahn. Die Periheldistanz des Kometen liegt bei $1{,}2\ AE$, ist also etwas größer als der Radius der Erdbahn. Ein Umlauf des Kometen um die Sonne dauert 6,5 Jahre.

Die ESA-Mission **Rosetta** zu Tschurjumow-Gerassimenko war die bisher erfolgreichste Kometen-Mission. **2014** schwenkte die im Auftrag der Europäischen Weltraumorganisation ESA bei EADS in Friedrichshafen gebaute Sonde Rosetta in eine nahe Umlaufbahn um den Kern des Kometen ein und begleitete diesen während seines Periheldurchgangs mehrere Monate lang. Teil der Rosetta-Mission war außerdem die Landesonde Philae, der auf dem Kometenkern abgesetzt wurde. Das Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) war wesentlich am Bau des Landers beteiligt und leitete die Landemission.

Forschungsziele der Rosetta-Mission:

- Kartierung der Oberfläche des Kometenkerns
- Chemische Analyse der Gase in der Koma
- Untersuchung der Zusammensetzung und Größe der Staubpartikel in der Koma
- Untersuchung des Wasserstoff-Deuterium-Verhältnisses bei dem im Kometenkern enthaltenen Wassereis

Diese Aufgaben erfüllten Rosetta und Philae mit insgesamt 11 Messgeräten, darunter Kameras, Spektrografen und Massenspektrometern.

Der Ablauf der Mission:

Um Rosetta auf die stark gekrümmte Kometenbahn zu bringen, musste die Sonde stark beschleunigt werden. Die dafür nötige Energie holte sich Rosetta bei drei **Swing-by-Manövern** an der Erde und einem Swing-by am Mars. Die Sonde wurde dabei jeweils um $10\ 000\ \frac{km}{h}$ bis $25\ 000\ \frac{km}{h}$ beschleunigt. Während ihrer **10-jährigen Flugzeit von 2004 bis 2014** beobachtete Rosetta im Vorbeiflug die **Asteroiden Steins** (2008) und **Lutetia** (2010).

Die **Energieversorgung** von Rosetta wurde durch zwei riesige Solarpanels gesichert; die größten, die jemals bei Raumsonden zum Einsatz kamen. Auf einen Radioisotopengenerator wurde bei Rosetta verzichtet. Ab Mitte 2011 befand sich Rosetta auf ihrem Flug außerhalb der Mars-Bahn. Die Intensität der Sonnenstrahlung ist in dieser Entfernung bereits so gering, dass die Solarzellen von Rosetta nicht mehr genügend Energie für den Betrieb der Kameras und Messgeräte bereitstellen konnten. Um den Stromverbrauch zu senken wurde die Sonde für 957 Tage in einen „Winterschlafmodus“ versetzt. Während dieser Zeit waren alle Messgeräte, die Kameras und alle Systeme bis auf das Thermalsystem, den Funkempfänger und die Weckfunktion abgeschaltet.

2014 schwenkte Rosetta schließlich in die vorgesehene Umlaufbahn um den Kometenkern von Tschurjumow-Gerassimenko ein. Für nötigen Bahnkorrekturen benötigte die Sonde eigene Triebwerke. Die Masse des mitgeführten Treibstoffes machte mit 1,7 Tonnen mehr als die Hälfte des Startgewichts von fast drei Tonnen aus.

Auf ihrer Umlaufbahn näherte sich Rosetta dem Kometenkern auf bis zu $6\ km$. Dabei entstanden detaillierte Fotos, die einen **hantelförmigen Himmelskörper** zeigen. Zwischen zwei grob genähert kugelförmigen Körpern mit $2{,}5$ bzw. $4\ km$ Durchmesser befindet sich ein schmale und etwa $1800\ m$ lange Verbindungszone. Die Oberfläche der kugelförmigen Teile ist geprägt von mehrere Hundert Meter hohen Steilwänden, mit Staub bedeckten Ebenen, Furchen und Löchern, aus denen Gasfontänen entweichen. Der Massenverlust durch diese Jets wird auf etwa 4 Milliarden Kilogramm pro Sonnenumlauf geschätzt. Der Komet verliert pro Umlauf etwa ein Zehntausendstel seiner Masse oder mehrere Meter Oberflächenschicht.

In der **Koma** identifizierte Rosetta Wasserdampf, Methan, Ammoniak, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Natrium, Magnesium und Methanol. Aminosäuren wurden nicht nachgewiesen. Das Verhältnis von Wasserstoff zu Deuterium im Wasserdampf ist etwa dreimal so groß, wie bei Wasser auf der Erde. Dies spricht gegen die Theorie, dass das Wasser der Weltmeere überwiegend bei früheren Kometeneinschlägen auf die Erde gekommen sein könnte.

Wegen der im Vergleich zur Erdmasse viel geringeren Masse des Kometenkerns beträgt die Schwerkraft auf Tschurjumow-Gerassimenko lediglich $\frac{1}{100\,000}$ der Schwerkraft auf der Erde.

Die $100\ kg$ schwere **Landesonde Philae** erfährt deshalb auf dem Kometenkern eine Gewichtskraft, die auf der Erde ein 1 Gramm schwerer Körper erfahren würde. Beim Absetzten von Philae bestand also die Gefahr, dass Philae nach seiner Landung nicht auf dem Kometenkern bleibt, sondern abprallt. Um dies zu verhindern, war Philae mit **Kaltgastriebwerken**, die ihn bei der Landung an die Oberfläche drücken sollten, mit **Ankerharpunen** und mit **Eisschrauben** ausgestattet. Leider versagten alle diese technischen Hilfsmittel ihren Dienst.

Philae wurde in $22\ km$ Höhe ausgesetzt und sank auf seinen vorgesehenen Landeplatz. Dort vermochte er sich aber nicht zu halten, sondern blieb nach vier Hüpfern etwa einen Kilometer vom Auftreffpunkt entfernt an einer sehr schattigen Stelle in Schieflage liegen.

Die Energieversorgung der Landesonde war während der ersten 64 Stunden durch eine Primärbatterie sichergestellt. Dann sollte Philae über Sekundärbatterien versorgt werden, die über Solarzellen aufgeladen würden. Dafür reichte die Sonneneinstrahlung an der Stelle, wo Philae liegengeblieben war, jedoch nicht aus. Philae wurde deshalb bis zum Periheldurchgang im August 2015, bei dem sich der Komet am nächsten an der Sonne befindet, in einen Stand-by-Modus versetzt. Leider konnte aber auch zu diesem Zeitpunkt keine zuverlässige und dauerhafte Kommunikation mit der Landesonde aufgebaut werden. Trotz seiner misslungenen Landung lieferte Philae während der ersten 64 Stunden auf dem Kometenkern Daten: Über dem Eiskern befindet sich eine 10 bis 20 cm dicke Staubschicht, die die Oberfläche des Kometenkerns bildet und gleichzeitig als Isolationsschicht für das Innere des Kerns wirkt.

Am **30. September 2016** ging die Rosetta-Mission mit dem **geplanten Absturz der Rosetta-Sonde** auf dem Kometenkern zu Ende.

Aufgaben zu Kapitel III Das Sonnensystem:

<u>Aufgabe 1</u>: Gemeinsame Schwerpunktsbewegung von Erde und Mond

Der Mond ($m_M = 7{,}35 \cdot 10^{22}\ kg$) bewegt sich auf einer leicht exzentrischen Ellipse um die Erde ($m_E = 5{,}977 \cdot 10^{24}\ kg$), wobei sein mittlerer Abstand von der Erde (von Mittelpunkt zu Mittelpunkt) 384 403 km beträgt.

a) Zeige, dass der Schwerpunkt des Zweikörpersystems Erde – Mond etwa einen dreiviertel Erdradius vom Erdmittelpunkt entfernt ist!

b) Berechne die Dauer eines vollständigen Umlaufs des Mondes um die Erde. Verwende dazu die Verallgemeinerung des 3. Keplerschen Gesetzes auf Zweikörperprobleme *(FS 13)*.

c) Erkläre, warum die Zeitspanne von 29,53 Tagen zwischen zwei Neumondstellungen deutlich verschieden ist von der in Teilaufgabe **b)** errechneten Umlaufsdauer.

<u>Lösung</u>:

zu 1) Vgl. S. 88

zu 2)

$$\frac{{T_M}^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot (m_E + m_M)}$$

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{T_M} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{r^3}{G \cdot (m_E + m_M)}} =$$

$$= 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(384403 \cdot 10^3\ m)^3}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot (5{,}977 \cdot 10^{24}\ kg + 7{,}35 \cdot 10^{22}\ kg)}} \approx \boldsymbol{27{,}28\ d}$$

Zu 3) Vgl. S. 93

<u>Aufgabe 2</u>: **Eigenschaften des Mondes (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2005)**

Zwischen zwei Vollmondphasen liegt ein Zeitraum von 29,5 Tagen. Gehen Sie für die Teilaufgaben **a)** bis **d)** davon aus, dass sich Erde und Mond auf Kreisbahnen bewegen.

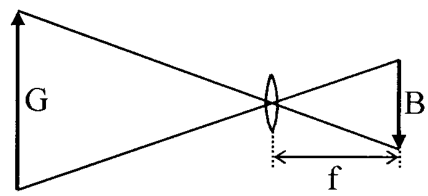
a) Erläutere die Begriffe „siderischer Monat“ und „synodischer Monat“.

b) Fertige eine Skizze zur Konstellation Sonne, Erde und Mond zu zwei aufeinanderfolgenden Vollmondphasen an.

c) Berechne den Winkel φ, um den sich die Verbindungslinie Erde-Sonne zwischen zwei Vollmondphasen bewegt hat.

d) Berechne mithilfe von Teilaufgabe **b)** die Länge eines siderischen Monats.

Vom Mond wird eine Serie von fotografischen Aufnahmen gemacht. Befindet sich der Mond im erdnächsten Punkt seiner Bahn, so ergibt sich ein Durchmesser des Mondbildes von $B_n = 17{,}2\ mm$, im erdfernsten Punkt von $B_f = 15{,}4\ mm$. Die Brennweite des abbildenden optischen Systems ist $f = 1800\ mm$. Entnimm die geometrischen Zusammenhänge bei der optischen Abbildung der nebenstehenden Skizze.



e) Berechne aus diesen Angaben und dem Mondradius 1738 km den minimalen und den maximalen Abstand des Mondes zum Beobachter.

f) Auf dem Mond erkennt man wesentlich mehr Krater als auf der Erde. Erläutere zwei Gründe für diese Tatsache.

<u>Lösung</u>:

zu 1) Vgl. S. 93

zu 2) Vgl. S. 91

zu 3)

$$\frac{\varphi}{360°} = \frac{29{,}5\ d}{365\ d} \quad \Rightarrow \quad \varphi = \frac{29{,}5}{365} \cdot 360° \approx 29{,}1°$$

zu 4)

$$\frac{T_{sid}}{T_{syn}} = \frac{360°}{360° + \varphi} \quad \Rightarrow \quad T_{sid} = T_{syn} \cdot \frac{360°}{360° + \varphi} = 29{,}5\ d \cdot \frac{360°}{360° + 29{,}1°} \approx 27{,}3\ d$$

zu 5) Weil der Mond viel weiter entfernt ist, als die Brennweite f, gilt in guter Näherung mit dem Strahlensatz:

$$\frac{B}{G} = \frac{f}{r}$$

Dabei ist r die Entfernung des Mondes und $G = 2 \cdot R_M$ der Durchmesser des Mondes.

$$\Rightarrow \quad r = \frac{2 \cdot R_M}{B} \cdot f = 2 \cdot 1737\ km \cdot 1800\ mm \cdot \frac{1}{B} \approx 6{,}25 \cdot 10^6\ km \cdot \frac{1\ mm}{B}$$

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{r_n} \approx 6{,}25 \cdot 10^6\ km \cdot \frac{1\ mm}{17{,}2\ mm} \approx \boldsymbol{3{,}64 \cdot 10^5\ km} \quad \text{und}$$

$$\boldsymbol{r_f} \approx 6{,}25 \cdot 10^6\ km \cdot \frac{1\ mm}{15{,}4\ mm} \approx \boldsymbol{4{,}06 \cdot 10^5\ km}$$

zu 6) Keine Atmosphäre, keine Erosion

Aufgabe 3: Die Bahn des Mars:

Der Planet Mars umläuft die Sonne auf einer Ellipsenbahn mit der großen Halbachse $a = 1{,}524\ AE$ und der Bahnexzentrizität $\varepsilon = 0{,}093$.

a) Wie lang ist die kleine Halbachse der Umlaufbahn des Mars?

b) Welche maximale und minimale Entfernung von der Sonne erreicht der Mars?

Lösung:

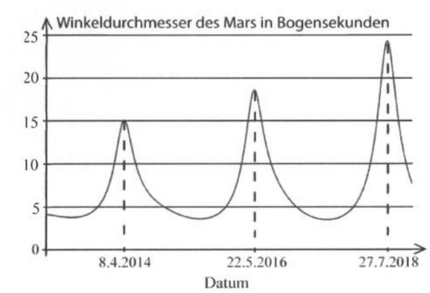
zu 1) $\varepsilon = \frac{e}{a} = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{b} = a \cdot \sqrt{1-\varepsilon^2} = 1{,}524\ AE \cdot \sqrt{1 - 0{,}093^2} \approx \mathbf{1{,}52\ AE}$

zu 2) **Aphel:** $\boldsymbol{r_A} = a + e = a \cdot (1+\varepsilon) = 1{,}524\ AE \cdot (1 + 0{,}093) \approx \mathbf{1{,}67\ AE}$

Perihel: $\boldsymbol{r_P} = a - e = a \cdot (1-\varepsilon) = 1{,}524\ AE \cdot (1 - 0{,}093) \approx \mathbf{1{,}38\ AE}$

Aufgabe 4: Besonderheiten bei der Beobachtung des Planeten Mars (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2013):

Mars ist besonders gut zu beobachten, wenn er in Opposition zur Sonne steht. Bei dieser Konstellation erscheint der Durchmesser des Mars von der Erde aus betrachtet unter einem vergleichsweise großen Winkel. Das nebenstehende Diagramm zeigt den Winkeldurchmesser des Mars für die kommenden Jahre und insbesondere die Daten der nächsten drei Oppositionen.



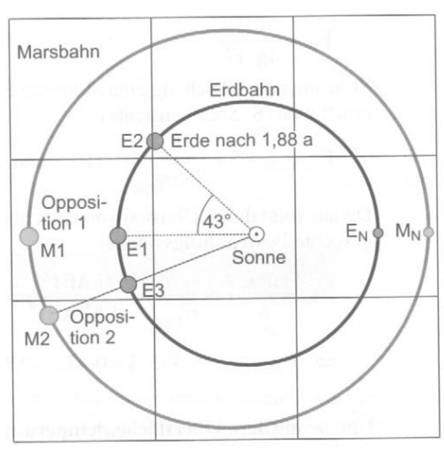
1) Erläutere anhand einer Skizze, warum die Maxima in einem zeitlichen Abstand von mehr als zwei Jahren auftreten, obwohl Mars nur $1{,}88\ a$ für einen Sonnenumlauf benötigt.

2) Erkläre, wie es zu den unterschiedlich großen Winkeldurchmessern des Mars bei den drei Oppositionen kommt.

3) Berechne unter Verwendung des Diagramms und mit dem Marsdurchmesser von $d = 6734\ km$ den Abstand des Mars zur Erde am 8.4.2014.

Lösung:

zu 1) $1{,}88\ a$ ist die siderische Umlaufzeit des Planeten Mars. $1{,}88\ a$ nach Opposition 1 befindet sich Mars wieder an der Stelle M1. Die Erde (höhere Winkelgeschwindigkeit als Mars!) läuft dem Mars auf ihrer Umlaufbahn voraus. Weil die Erde ein Jahr für einen Umlauf um die Sonne benötigt, hat sie nach $1{,}88\ a$ noch keine zwei Umläufe geschafft. Sie befindet sich an der Stelle E2. Bis die Erde auf ihrer zweiten Umlaufbahn den Planeten Mars eingeholt hat, die beiden Planeten also wieder in Opposition (Opposition 2) stehen, vergeht noch etwa Zeit.



zu 2) Die Marsbahn ($\varepsilon = 0{,}094$) ist stärker gekrümmt als die Erdbahn ($\varepsilon = 0{,}017$). Deshalb sind die Abstände zwischen Mars und Erde bei verschiedenen Oppositionen (Skizze: E1-M1, E3-M2, E_N-M_N) unterschiedliche groß. Je näher Mars ist, desto größer erscheint er dem irdischen Beobachter.

zu 3) Winkeldurchmesser $\alpha = 15°$

$$\frac{2\pi r}{d} = \frac{360°}{\alpha} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{r} = \frac{360°}{\alpha} \cdot \frac{d}{2\pi} = \frac{360°}{15°} \cdot \frac{6734\ km}{2\pi} \approx 9{,}3 \cdot 10^7\ km \approx \mathbf{0{,}62\ AE}$$

Aufgabe 5: **Die Bahn des Zwergplaneten Pluto:**

Der Zwergplanet Pluto ist im Aphel seiner Bahn 49,62 AE von der Sonne entfernt; er legt dort pro Sekunde 3,67 km zurück. Pluto benötigt für einen Umlauf um die Sonne 248 Erdjahre.

a) Berechne die große Halbachse (in AE) und die Bahnexzentrizität der Bahnellipse.

b) Welchen Sonnenabstand und welche Geschwindigkeit besitzt Pluto im Perihel seiner Bahn?

Lösung:

zu 1)

$$\frac{{T_P}^2}{{a_P}^3} = \frac{{T_E}^2}{{a_E}^3} = 1\,\frac{a^2}{AE^3} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{a_P} = \sqrt[3]{{T_P}^2 \cdot \frac{AE^3}{a^2}} = \sqrt[3]{(248\,a)^2 \cdot \frac{AE^3}{a^2}} \approx \mathbf{39,5\ AE}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{e}{a} = \frac{r_a - a}{a} = \frac{r_a}{a} - 1 = \frac{49{,}62\ AE}{39{,}47\ AE} - 1 \approx \mathbf{0,26}$$

zu 2)

$$\boldsymbol{r_P} = a - e = a \cdot (1 - \varepsilon) = 39{,}47\ AE \cdot (1 - 0{,}257) \approx \mathbf{29,3\ AE}$$

$$\frac{v_A}{v_P} = \frac{r_P}{r_A} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{v_P} = \frac{r_A}{r_P} \cdot v_A = \frac{49{,}62\ AE}{29{,}32\ AE} \cdot 3{,}67\ \frac{km}{s} \approx \mathbf{6,21\ \frac{km}{s}}$$

Aufgabe 6: **Die maximale Elongation der Venus:**

Venus- und Erdbahn werden näherungsweise als Kreisbahnen betrachtet. Der Radius der Venusbahn beträgt dabei 0,723 AE.

a) Berechne die maximale Elongation der Venus!

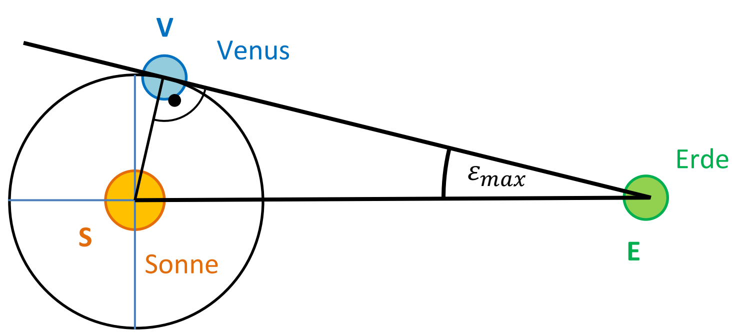
b) Zeichne die Konstellation von Sonne, Venus und Erde zum Zeitpunkt der maximalen Elongation!

Lösung:

Wegen der kleinen Exzentrizität $\varepsilon = 0{,}007$ kann die Venusbahn näherungsweise als Kreisbahn betrachtet werden.

$$\sin \varepsilon_{max} = \frac{\overline{SV}}{\overline{SE}} = \frac{0{,}723\ AE}{1\ AE} = 0{,}723$$

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{\varepsilon_{max}} \approx \mathbf{46,3°}$$



Aufgabe 7: **Konjunktion der Venus:**

a) Der Planet Venus stand am 15.6.1984 und danach erst wieder am 19.1.1986 in oberer Konjunktion zur Sonne. Berechne mit diesen Angaben die siderische Umlaufdauer und den mittleren Bahnradius der Venus in *AE*!

b) Zum Zeitpunkt der unteren Konjunktion wird von der Erdoberfläche ein Radarsignal ausgesandt, das an der Venus reflektiert und nach 276,3 Sekunden wieder empfangen wird. Rechne nach diesen Angaben die Entfernungseinheit $1\ AE$ in *km* um!

Lösung:

zu 1) Die Venus ist ein unterer Planet:

$$\frac{1}{T_{sid}} = \frac{1}{a} + \frac{1}{T_{syn}}$$

$$T_{syn} = 15\ d + 31\ d + 31\ d + 30\ d + 31\ d + 30\ d + 31\ d + 365\ d + 19\ d = 583\ d$$

$$\boldsymbol{T_{sid}} = \frac{1}{\frac{1}{a} + \frac{1}{T_{syn}}} = \frac{1}{\frac{1}{365\ d} + \frac{1}{583\ d}} \approx \mathbf{224{,}5\ \boldsymbol{d}}$$

$$\frac{{T_{sid}}^2}{{r_V}^3} = \frac{{T_E}^2}{{r_E}^3} = 1\,\frac{a^2}{AE^3} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{r_V} = \sqrt[3]{{T_{sid}}^2 \cdot \frac{AE^3}{a^2}} = \sqrt[3]{(224{,}5\ d)^2 \cdot \frac{AE^3}{(365\ d)^2}} \approx \mathbf{0{,}723\ \boldsymbol{AE}}$$

zu 2) In der Zeit $\Delta t = 276{,}3\ s$ läuft das Radarsignal mit Lichtgeschwindigkeit von der Erde zur Venus und wieder zurück.

Abstand Erde-Venus: $d = \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot c = \frac{1}{2} \cdot 276{,}3\ s \cdot 3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s} \approx 4{,}145 \cdot 10^{10}\ m$

$$d = r_E - r_V = 1\ AE - 0{,}723\ AE = 0{,}277\ AE$$

$$\Rightarrow\ \mathbf{1}\ \boldsymbol{AE} = \frac{d}{0{,}277} = \frac{4{,}145 \cdot 10^{10}\ m}{0{,}277} \approx \mathbf{1{,}496 \cdot 10^8}\ \boldsymbol{km}$$

Aufgabe 8: Die Sichtbarkeit des Planeten Merkur (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2009):

Am 26. April 2009 konnte man bei klarer Sicht den Planeten Merkur kurz nach Sonnenuntergang am Abendhimmel sehen. An diesem Abend stand Merkur in größter östlicher Elongation zur Sonne.

a) Fertige eine maßstabsgetreue Zeichnung an ($1\ AE$ entspricht $5\ cm$), welche die kreisförmig angenommenen Bahnen von Merkur und Erde um die Sonne sowie deren Positionen bei größter östlicher Elongation Merkurs zeigen. Berechne für diese Konstellation die Entfernung Merkurs von der Erde sowie den Winkelabstand Sonne-Merkur für einen Beobachter auf der Erde.

In den darauffolgenden Wochen verkürzt Merkur zunächst seinen Abstand von der Erde und wird sich eineinhalb Monate später in größter westlicher Elongation befinden.

b) Trage die Positionen von Erde und Merkur zu diesem Zeitpunkt in die Zeichnung von Teilaufgabe **1)** ein und diskutiere, ob bzw. wo Merkur im Zeitraum zwischen größter östlicher und westlicher Elongation mit bloßem Auge zu beobachten ist.

Lösung:

zu 1)

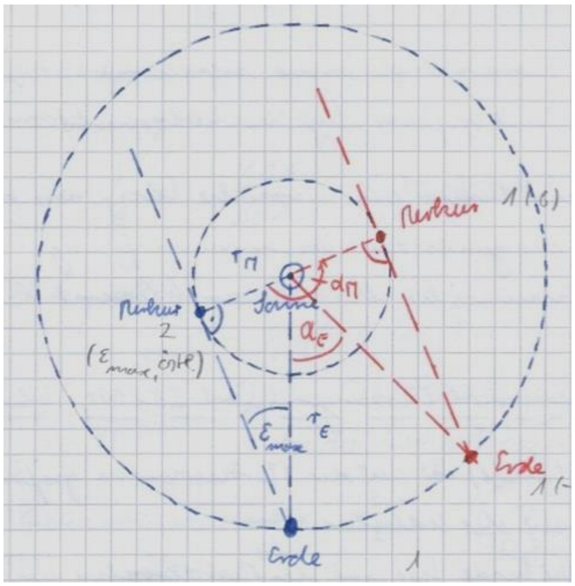
Merkur: $r_M = 0{,}387\ AE\ \widehat{=}\ 1{,}9\ cm$

Erde: $r_E = 1\ AE\ \widehat{=}\ 5\ cm$

$$\boldsymbol{d_{EM}} = \sqrt{{r_E}^2 - {r_M}^2} = \sqrt{1 - 0{,}387^2}\ AE = \mathbf{0{,}922\ AE}$$

$$\sin \varepsilon_{max} = \frac{r_M}{r_E} = \frac{0{,}387\ AE}{1\ AE} = 0{,}387$$

$$\Rightarrow\ \boldsymbol{\varepsilon_{max}} \approx \mathbf{22{,}8°}$$



zu 2)

$\Delta t = 1{,}5\ Monate = 0{,}125\ a$

Weiterbewegung der Erde in dieser Zeit:

$$\frac{\alpha_E}{360°} = \frac{0{,}125\ a}{1\ a} = 0{,}125 \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{\alpha_E} = \mathbf{45°}$$

Merkur nähert sich zwischen größter östlicher und größter westlicher Elongation immer mehr der Sonne (vom Winkelabstand her). $\Longrightarrow$ Er wird zur Mitte des Zeitintervalls hin immer schwieriger beobachtbar; dann wieder besser.
Die Schwierigkeit der Beobachtung ergibt sich aus der Überstrahlung durch die Sonne.
Solange Merkur eine östliche Elongation hat, ist er abends kurz nach Sonnenuntergang in Sonnennähe beobachtbar (im Westen).
Wenn Merkur vor der Sonne vorbeizieht ($\varepsilon = 0$) ist er mit bloßem Auge nicht beobachtbar.
Während Merkur eine westliche Elongation hat, ist er morgens kurz vor Sonnenaufgang in Sonnennähe beobachtbar (im Osten).

<u>Aufgabe 9</u>: **Fluchtgeschwindigkeit einer Rakete:**

Die Startgeschwindigkeit, die eine Rakete haben muss, um den Anziehungsbereich der Erde zu verlassen, heißt **Fluchtgeschwindigkeit** oder **2. kosmische Geschwindigkeit**.

a) Begründe, dass die Fluchtgeschwindigkeit einer Rakete unabhängig von der Masse der Rakete ist!

b) Berechne die Fluchtgeschwindigkeit in den Einheiten $\frac{km}{s}$ und $\frac{km}{h}$.

c) Welcher Energieaufwand ist nötig, um eine 12 Tonnen schwere Rakete gerade aus dem Anziehungsbereich der Erde herauszuschießen, wenn die gesamte Energie der Rakete beim Start mitgegeben wird?

d) Welche potentielle Energie hat eine solche Rakete in 36 000 km Höhe?

<u>Lösung</u>:

zu 1) Die Fluchtgeschwindigkeit wird aus folgendem Energieansatz hergeleitet

$$E_{kin} = W(R_E \to \infty)$$

$$\frac{1}{2} m {v_F}^2 = G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{R_E}$$

In dieser Gleichung kürzt sich die Masse m der Rakete.

zu 2)

$$\boldsymbol{v_F} = \sqrt{2 \cdot G \cdot m_E \cdot \frac{1}{R_E}} = \sqrt{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot 5{,}977 \cdot 10^{24}\ kg \cdot \frac{1}{6371 \cdot 10^3\ m}} \approx \mathbf{11{,}2}\ \boldsymbol{\frac{km}{s}}$$

$$\approx \mathbf{40{,}3}\ \boldsymbol{\frac{km}{h}}$$

zu 3)

$$\boldsymbol{W(R_E} \to \infty) = G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{R_E} = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot 5{,}977 \cdot 10^{24}\ kg \cdot 12 \cdot 10^3\ kg \cdot \frac{1}{6371 \cdot 10^3\ m}$$

$$\approx \mathbf{751}\ \boldsymbol{GJ}$$

zu 4)

$$\boldsymbol{E_{pot}(R_E + h)} = -G \cdot m_E \cdot m \cdot \frac{1}{R_E + h} =$$

$$= -6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot 5{,}977 \cdot 10^{24}\ kg \cdot 12 \cdot 10^3\ kg \cdot \frac{1}{6371 \cdot 10^3\ m + 36\,000 \cdot 10^3\ m}$$

$$\approx \mathbf{-113}\ \boldsymbol{GJ}$$

<u>Aufgabe 10</u>: Apollo-Mission zum Mond (nach einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2005):

Bei den Apollo-Missionen zum Mond wurde die Raumkapsel zunächst in eine kreisförmige Erdumlaufbahn (Parkbahn) gebracht und anschließend durch kurzzeitiges Zünden des Haupttriebwerks auf den Weg zum Mond beschleunigt.

a) Zwischen Erde und Mond gibt es einen Lagrange-Punkt, in dem sich die Gravitationskräfte von Erde und Mond aufheben. Berechne den Abstand r_0 dieses Punktes vom Erdmittelpunkt. Verwende für den Abstand von der Erde zum Mond $3{,}84 \cdot 10^5\ km$.

b) Berechne die Geschwindigkeit v^*, auf die ein Satellit von der Parkbahn ($190\ km$ über der Erdoberfläche) beschleunigt werden müsste, um anschließend antriebslos den Abstand r_0 zu erreichen. Der Einfluss des Mondes soll dabei nicht berücksichtigt werden.

c) Bei der Apollo-Mission genügte für den Mondflug eine Geschwindigkeit $v < v^*$.
Begründe diese Tatsache.

<u>Lösung</u>:

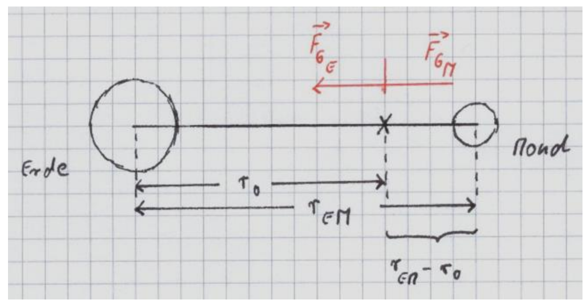
zu 1)

Kraftansatz: $F_{G_E} = F_{G_M}$

$$G \cdot \frac{m \cdot m_E}{{r_0}^2} = G \cdot \frac{m \cdot m_M}{(r_{EM} - r_0)^2}$$

$$\Longrightarrow \quad (m_E - m_M) \cdot {r_0}^2 - 2 \cdot r_{EM} \cdot r_0 + {r_{EM}}^2 \cdot m_E = 0$$

(quadratische Gleichung mit der Variablen r_0)



Die Mitternachtsformel liefert für diese quadratische Gleichung zwei Lösungen:

1) $r_0 = 4{,}32 \cdot 10^5\ km$ und 2) $r_0 = 3{,}46 \cdot 10^5\ km$

Die erste Lösung ist wegen $r_0 > r_{EM}$ sinnlos und kann somit verworfen werden.

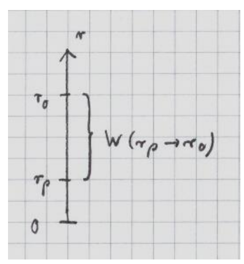
$$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{r_0 = 3{,}46 \cdot 10^5\ km}$$

Der Lagrange-Punkt ist etwa $40\ 000\ km$ vom Mond entfernt und liegt damit nah beim Mond.

zu 2)

Radius der Parkbahn: $r_P = r_E + 190\ km = 6371\ km + 190\ km = 6561\ km$

Lösung über die Arbeit zum Heben des Satelliten von r_P auf r_0.
(Der Einfluss des Mondes bleibt bei der Rechnung unberücksichtigt.):



$$W(r_P \to r_0) = \int_{r_P}^{r_0} F_G(r)\, dr = \int_{r_P}^{r_0} G \cdot \frac{m \cdot m_E}{r^2}\, dr = G \cdot m \cdot m_E \cdot \left[-\frac{1}{r}\right]_{r_P}^{r_0}$$

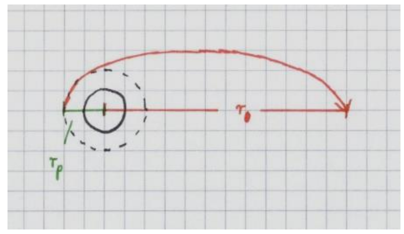
$$W(r_P \to r_0) = \frac{1}{2} m {v^*}^2$$

$$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{v^*} = \sqrt{2 \cdot G \cdot m_E \cdot \left(\frac{1}{r_P} - \frac{1}{r_0}\right)} =$$

$$= \sqrt{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot 5{,}977 \cdot 10^{24}\ kg \cdot \left(\frac{1}{6561 \cdot 10^3\ m} - \frac{1}{3{,}46 \cdot 10^8\ m}\right)}$$

$$\approx \boldsymbol{10{,}92\ \frac{km}{s}}$$

Man kann die Aufgabe auch über die Bahngeschwindigkeit auf einer Ellipsenbahn lösen *(FS 12)*:



$$v^* = \sqrt{G \cdot m_E \cdot \left(\frac{2}{r_P} - \frac{1}{a}\right)} \quad \text{mit } a = \frac{r_P + r_0}{2}$$

$$\Rightarrow \quad v^* = \sqrt{G \cdot m_E \cdot \left(\frac{2}{r_P} - \frac{2}{r_P + r_0}\right)} =$$

$$= \sqrt{G \cdot m_E \cdot \left(\frac{2}{6561 \cdot 10^3\ m} - \frac{2}{6561 \cdot 10^3\ m + 3{,}46 \cdot 10^8\ m}\right)} \approx 10{,}9\ \frac{km}{s}$$

zu 3) Für die tatsächliche Geschwindigkeit v gilt: $v < v^*$, denn die Anziehungskraft des Mondes wirkt umso stärker, je näher man dem Mond kommt. Dies gilt auch für $r < r_0$, was in Teilaufgabe **2)** vernachlässigt wurde!

<u>Aufgabe 11</u>: Mars Pathfinder (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2002)

Am 4.12.1996 startete die Sonde der erfolgreichen Marsmission Pathfinder, die nach 213 Tagen den Mars erreichte.

1) Entscheide durch Rechnung, ob es sich beim Hinflug der Pathfinder-Sonde um eine Hohmann-Bahn handelte!

2) Bei der Exkursion des Fahrzeugs auf dem Mars stellte sich eine gefährliche Situation ein, die zur Erde gemeldet wurde. Der Erdabstand betrug $1{,}9 \cdot 10^8\ km$.
Wann konnte frühestens nach Absenden des Meldesignals ein korrigiertes Steuersignal beim Rover auf dem Mars eintreffen?

<u>Lösung</u>:

zu 1) Prüfe, ob die Hinflugzeit $\left(= \frac{1}{2} \cdot T_H\right)$ auf der Hohmannbahn 213 Tage beträgt:

Große Halbachse der Hohmann-Bahn:

$$a_H = \frac{1}{2} \cdot (r_E + r_M) = \frac{1}{2} \cdot (1\ AE + 1{,}52\ AE) = 1{,}26\ AE$$

Betrachtet man Pathfinder-Sonde und Erde als gemeinsam um die Sonne laufende Himmelskörper, so folgt mit dem 3.Keplerschen Gesetz:

$$\frac{{T_H}^2}{{a_H}^3} = 1\,\frac{a^2}{AE^3} \;\Rightarrow\; T_H = \sqrt{\frac{{a_H}^3}{AE^3}}\,a = \sqrt{\frac{(1{,}26\ AE)^3}{AE^3}}\,a \approx 1{,}41\ a \approx 517\ d \;\Rightarrow\; \boldsymbol{\frac{1}{2} \cdot T_H \approx 258\ d}$$

Die Flugzeit zum Mars ist kürzer als sie auf einer Hohmann-Bahn wäre. Die Sonde flog also nicht auf einer Homann-Bahn.

zu 2) Das Funksignal breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit c aus. Insgesamt muss es den Weg von der Erde zum Mars und zurücklaufen.

zu 3)

$$c = \frac{\Delta s}{t} = \frac{2 \cdot 1{,}9 \cdot 10^{11} m}{t} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{t} = \frac{2 \cdot 1{,}9 \cdot 10^{11} m}{3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}} \approx 1267\ s \approx \boldsymbol{21\ min}$$

<u>Aufgabe 12</u>: Raumsonde Cassini und Saturn (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 1999):

Am 15. Oktober 1997 startete die Raumsonde Cassini zur Erforschun des Planeten Saturn. Am 1. Juli 2004 soll sie in eine Umlaufbahn um den Saturn einschwenken.

a) Saturn benötigt 29,5 Jahre für einen Umlauf um die Sonne. Berechne damit die große Halbachse der Saturnbahn!

b) Auf ihrer Flugbahn zum Saturn erreicht die Cassini-Sonde Geschwindigkeiten von bis zu $40\ \frac{km}{s}$. Erläutere, weshalb derart hohe Geschwindigkeiten erreichbar sind, obwohl die zurzeit verfügbaren Raketen nur ein Drittel dieser Geschwindigkeit aus eigener Kraft ermöglichen!

c) Die Raumsonde Cassini erkundete auch den Saturnmond Titan. Dieser umkreist den Planeten auf einer Bahn mit dem Radius $r = 1{,}22 \cdot 10^6\ km$ in 15,9 Tagen.
Bestimme daraus die Masse des Planeten Saturn!

<u>Lösung</u>:

a) Betrachtet man Saturn und Erde als gemeinsam um die Sonne laufende Himmelskörper, so folgt mit dem 3.Keplerschen Gesetz

$$\frac{{T_H}^2}{{a_H}^3} = 1\,\frac{a^2}{AE^3} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{a_J} = \sqrt[3]{29{,}5^2}\ AE \approx \mathbf{9{,}5\ AE}$$

b) Zum Erreichen derartig hoher Geschwindigkeiten nutzt man zunächst die Eigenbewegung der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne. Man schießt also die Rakete mit der Sonde in Erdbewegungsrichtung ab. Während des antriebslosen Fluges der Sonde liefern Swing-by-Manöver zusätzliche Bewegungsenergie. Bei der Annäherung an einen Planeten wird aufgrund der Gravitationskraft zwischen Planet und Sonde ein kleiner Teil der Bewegungsenergie des Planeten auf die Sonde übertragen.

c) Die für die Kreisbewegung von Titan benötigte Zentripetalkraft F_Z wird durch die Gravitationskraft F_G zwischen Saturn und Titan zur Verfügung gestellt:

$$F_Z = F_G \quad \Longrightarrow \quad m_{Ti} \cdot \frac{v^2}{r} = G \cdot \frac{m_{Ti} \cdot m_S}{r^2}$$

$$\text{Mit } v = \frac{2\pi r}{T_{Ti}} \qquad \text{folgt} \qquad m_{Ti} \cdot \frac{(2\pi r)^2}{{T_{Ti}}^2 \cdot r} = G \cdot \frac{m_{Ti} \cdot m_S}{r^2}$$

$$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{m_S} = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{r^3}{{T_{Ti}}^2} = \frac{4\pi^2}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2}} \cdot \frac{(1{,}22 \cdot 10^9\ m)^3}{(15{,}9 \cdot 24 \cdot 3600\ s)^2}$$

$$\approx \mathbf{5{,}7 \cdot 10^{26}\ kg}$$

<u>Aufgabe 13</u>: Cassini-Huygens-Mission (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2006):

Am 14. Januar 2005 landete die ESA-Sonde Huygens auf dem größten Saturn-Mond Titan, den Christian Huygens im Jahr 1655 entdeckt hatte. Mehr als sieben Jahre hatte der gemeinsame Flug der Sonde und ihres Mutterschiffes Cassini gedauert.

a) Zwischen zwei Saturnoppositionen liegen ein Jahr und 12,8 Tage. Berechne aus diesem Wert die siderische Umlaufzeit des Planeten und die Länge der großen Halbachse der Bahnellipse.

Die energetisch günstigste Bahn für einen interplanetaren Flug ist die so genannte Hohmann-Bahn.

b) Skizziere für einen Flug von der Erde zum Saturn die Hohmann-Bahn und bestimme deren große Halbachse sowie die zugehörige Reisezeit von der Erde zum Saturn.

c) Bestimme für die Bahn von Teilaufgabe **2)** die Geschwindigkeit im Perihel.

d) Mit der heutigen Raketentechnik ist eine Beschleunigung auf die in Teilaufgabe **3)** berechnete Geschwindigkeit nicht möglich.
Nenne zwei Gegebenheiten im Sonnensystem, die man geschickt nutzen kann, um dennoch derartige Geschwindigkeiten zu erreichen.

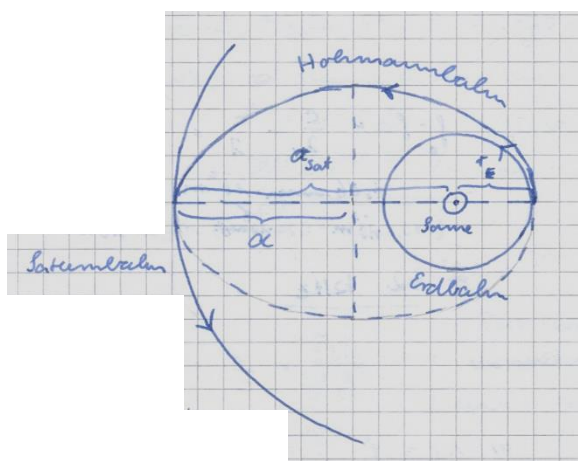
<u>Lösung</u>:

zu 1) $T_{syn} = 365\,d + 12{,}8\,d = 377{,}8\,d$

$$\frac{1}{T_{sid}} = \frac{1}{a} - \frac{1}{T_{syn}} = \frac{1}{365\,d} - \frac{1}{377{,}8\,d} \approx 9{,}28 \cdot 10^{-5}\,\frac{1}{d} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{T_{sid}} = 10773\,d \approx \boldsymbol{29{,}5\,a}$$

$$\frac{{T_{sid}}^2}{a^3} = 1\,\frac{a^2}{AE^3} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{a} = \sqrt[3]{\frac{{T_{sid}}^2}{a^2}}\,AE = \sqrt[3]{29{,}5^2}\,AE \approx \boldsymbol{9{,}55\,AE}$$

zu 2)



$$a_H = \frac{r_{Sat} + r_{E2}}{2} = \frac{9{,}55 + 1}{2}\,AE \approx 5{,}28\,AE$$

$$\frac{T^2}{a^3} = 1\,\frac{a^2}{AE^3} \quad \Rightarrow \quad T = \sqrt{\frac{(5{,}28\,AE)^3}{AE^3}}\,a \approx 12{,}1\,a$$

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{t_{Flug}} = \frac{1}{2} \cdot T = \boldsymbol{6{,}06\,a}$$

zu 3)

$$\boldsymbol{v_P} = \sqrt{G \cdot m_\odot \cdot \left(\frac{2}{r_P} - \frac{1}{a}\right)} =$$

$$= \sqrt{6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot 1{,}99 \cdot 10^{30}\,kg \cdot \left(\frac{2}{1{,}496 \cdot 10^{11}\,m} - \frac{1}{5{,}28 \cdot 1{,}496 \cdot 10^{11}\,m}\right)} \approx 40{,}1\,\frac{km}{s}$$

zu 4) Beim Start werden die Eigenrotation und die Bahngeschwindigkeit der Erde genutzt.
Swing-by-Manöver.

Aufgabe 14: **Der Asteroid Itokawa (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2017):**

Der 1998 entdeckte Asteroid Itokawa gehört zu den Apollo-Asteroiden, einer Gruppe von Asteroiden, die der Erde besonders nahe kommen.

Daten von Itokawa:
Umlaufzeit: $T = 556\ d$
Numerische Exzentrizität: $\varepsilon = 0{,}28$
Mittlerer Radius: $R = 0{,}40\ km$
Fallbeschleunigung an der Oberfläche: $g = 1{,}5 \cdot 10^{-5}\ \frac{m}{s^2}$

a) Nenne zwei Unterschiede zwischen Asteroiden und Planeten.

b) Berechne die große Halbachse a der Itokawa-Bahn. Untersuche, ob Itokawa die Erdbahn kreuzen kann.

c) Obwohl die Erde deutlich größer ist als der Mond, befinden sich auf der Erdoberfläche vergleichsweise wenige Einschlagkrater von Objekten aus dem Weltall. Erkläre diese Diskrepanz.

d) Berechne mithilfe der Formelsammlung die Fluchtgeschwindigkeit v_F von Itokawa und ermittele, welche Höhe ein Körper mit dieser Startgeschwindigkeit auf der Erde maximal erreichen kann.

Lösung:

zu 1) Vgl. S. 135

zu 2)

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{{T_E}^2}{{a_E}^3} = 1\ \frac{a^2}{AE^3} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{a} = \sqrt[3]{\frac{T^2}{a^2}}\ AE = \sqrt[3]{\left(\frac{556}{365}\right)^2}\ AE \approx \boldsymbol{1{,}32\ AE}$$

$$r_P = a - e = a \cdot (1 - \varepsilon) = 1{,}32\ AE \cdot (1 - 0{,}28) \approx 0{,}95\ AE < 1\ AE$$

$$r_A = a + e = a \cdot (1 + \varepsilon) = 1{,}32\ AE \cdot (1 + 0{,}28) \approx 1{,}69\ AE > 1\ AE$$

Itokawa kann die Erdbahn kreuzen, weil seine Periheldistanz r_P kleiner und seine Apheldistanz r_A größer als der mittlere Bahnradius der Erde sind.

zu 3)

Im Gegensatz zum Mond besitzt die Erde eine Atmosphäre, in der Meteorite größtenteils verglühen.

zu 4)

$$\boldsymbol{v_F} = v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot R} = \sqrt{2 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-5}\ \frac{m}{s^2} \cdot 0{,}40 \cdot 10^3\ m} \approx \boldsymbol{0{,}11\ \frac{m}{s}}$$

$$W_h(R_E \to R_E + h) = \int_{R_E}^{R_E+h} F_G(r)\, dr = \int_{R_E}^{R_E+h} G \cdot \frac{m \cdot m_E}{r^2}\, dr = G \cdot m \cdot m_E \cdot \left(\frac{1}{R_E} - \frac{1}{R_E + h}\right) =$$

$$= E_{kin} = \frac{1}{2} m {v_F}^2$$

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{h} = \frac{1}{\frac{1}{R_E} - \frac{{v_F}^2}{2 \cdot G \cdot m_E}} - R_E =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{6371 \cdot 10^3\ m} - \frac{\left(0{,}11\ \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot 5{,}974 \cdot 10^{24}\ kg}} - 6371 \cdot 10^3\ m \approx \boldsymbol{0{,}61\ mm}$$

Hier könnte man wegen der geringen Höhe h auch kurz rechnen:

$$W_h(R_E \to R_E + h) = mgh = E_{kin} = \frac{1}{2} m{v_F}^2 \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{h} = \frac{{v_F}^2}{2 \cdot g} = \frac{\left(0{,}11\ \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9{,}81\ \frac{m}{s^2}} \approx \mathbf{0{,}61\ mm}$$

<u>Aufgabe 15</u>: Ida – ein Asteroid mit Mond (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2011):

Der Asteroid Ida (Durchmesser: $70\ km$) umrundet die Sonne in 4,84 Jahren auf einer Bahn mit der numerischen Exzentrizität $\varepsilon = 0{,}045$. Die Raumsonde Galileo flog 1993 auf ihrem Weg zu Jupiter an Ida vorbei und sandte detailreiche Bilder von Ida und deren Umgebung zur Erde.

1) Erörtere Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Asteroiden und Kometen hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Erscheinung.

2) Berechne die große Halbachse der Idabahn.
Bestimme, um wie viel Prozent Ida im Aphel weiter von der Sonne entfernt ist als im Perihel.

Auf den Bildern der Raumsonde entdeckte man einen Begleiter von Ida, der den Namen Dactyl erhielt. Ida war damit der erste Asteroid, bei dem ein Mond nachgewiesen werden konnte. Dactyl ist im Vergleich zu Ida sehr klein und bewegt sich in 37 Stunden auf einer nahezu kreisförmigen Bahn mit Radius $108\ km$ um den Asteroiden.

3) Bestimme aus den Bahndaten von Dactyl die Masse m_I von Ida.

4) Berechne die Fallbeschleunigung g_I auf der Oberfläche von Ida. Um welchen Faktor ist die Fallbeschleunigung auf der Erdoberfläche größer als g_I?
Folgere daraus, welche Schwierigkeiten ein Astronaut bei der Fortbewegung auf Ida zu erwarten hätte.

<u>Lösung</u>:

zu 1)
<u>Asteroiden</u>: Bestehen aus Gestein oder Metall. Ähneln von ihrer Form her Kometenkernen, verändern ihr Aussehen bei einer Annäherung an die Sonne aber nicht (keine Koma, keine Schweife).
<u>Kometen</u>: Bestehen aus Eis und Staub. Bilden in Sonnennähe Koma und Schweife aus.

zu 2)

$$\frac{{T_{Ida}}^2}{{a_{Ida}}^3} = \frac{{T_E}^2}{{a_E}^3} = 1\,\frac{a^2}{AE^3} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{a_{Ida}} = \sqrt[3]{{T_{Ida}}^2 \cdot \frac{AE^3}{a^2}} = \sqrt[3]{(4{,}84\ a)^2 \cdot \frac{AE^3}{a^2}} \approx \mathbf{2{,}86\ AE}$$

$$r_P = a - e = a \cdot (1 - \varepsilon) = 2{,}86\ AE \cdot (1 - 0{,}045) \approx 2{,}73\ AE$$

$$r_A = a + e = a \cdot (1 + \varepsilon) = 2{,}86\ AE \cdot (1 + 0{,}045) \approx 2{,}99\ AE$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\boldsymbol{r_A - r_P}}{\boldsymbol{r_P}} = \frac{2{,}99\ AE - 2{,}73\ AE}{2{,}73\ AE} \approx 0{,}095 = \mathbf{9{,}5}\%$$

zu 3) Weil Dactyl im Vergleich zu Ida sehr klein ist, darf man näherungsweise die Bahn des Mondes als Kreisbahn um den Schwerpunkt des Asteroiden betrachten:

$$F_Z = Z_G \quad \Rightarrow \quad m_D \cdot \frac{v^2}{r} = G \cdot \frac{m_D \cdot m_I}{r^2}$$

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{m_I} = \frac{v^2 \cdot r}{G} = \frac{\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 \cdot r}{G} = \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{G \cdot T^2} = \frac{4\pi^2 \cdot (108 \cdot 10^3\ m)^3}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot (37 \cdot 3600\ s)^2} \approx \mathbf{4{,}2 \cdot 10^{16}\ kg}$$

zu 4)

$$m \cdot g_I = G \cdot \frac{m \cdot m_I}{{R_I}^2} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{g_I} = G \cdot \frac{m_I}{{R_I}^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot \frac{4{,}2 \cdot 10^{16}\ kg}{(35 \cdot 10^3\ m)^2} \approx \mathbf{2{,}3 \cdot 10^{-3}}\ \boldsymbol{\frac{m}{s^2}}$$

$$\frac{\boldsymbol{g_E}}{\boldsymbol{g_I}} = \frac{9{,}81\ \frac{m}{s^2}}{2{,}3 \cdot 10^{-3}\ \frac{m}{s^2}} \approx \mathbf{4{,}3 \cdot 10^3}$$

Weil die Fallbeschleunigung auf Ida viel kleiner ist als auf der Erde würde sich ein Astronaut bei jedem Schritt sehr stark von der Asteroidenoberfläche abstoßen und könnte sich damit nur schwer fortbewegen.

Aufgabe 16: Die NASA-Mission Dawn zu Vesta und Ceres (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2014):

Die im Jahr 2007 gestartete Raumsonde Dawn erreichte im Jahr 2011 den Asteroiden Vesta. Der Abstand von Vesta zur Sonne variiert zwischen 2,15 AE und 2,57 AE.

1) Berechne die Umlaufzeit von Vesta.

Man geht davon aus, dass Vesta an einer größeren Kollision beteiligt war. Trümmer dieser Kollision bewegen sich durch das Sonnensystem; einige davon haben die Erde als Meteoriten erreicht.

2) Beschreibe zwei Phänomene, die im Zusammenhang mit Meteoriten auftreten können.

Im Jahr 2015 erreichte die Sonde Dawn den Zwergplaneten Ceres, der wie Vesta zum Asteroidengürtel gehört.

3) Mitte April 2014 standen Ceres und Vesta in Opposition zur Sonne.
Führe zwei mögliche Gründe an, weshalb uns Vesta hierbei heller erschien, obwohl Ceres größer ist.

Lösung:

zu 1)

$$2 \cdot a = r_A + r_P \quad \Longrightarrow \quad a = \frac{r_A + r_P}{2} = \frac{2{,}15\ AE + 2{,}57\ AE}{2} = 2{,}36\ AE$$

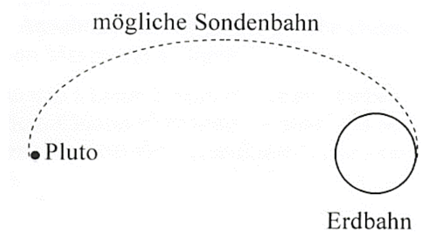
$$\frac{T^2}{a^3} = 1\ \frac{a^2}{AE^3} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{T} = \sqrt{\frac{(2{,}36\ AE)^3}{AE^3}}\ a \approx \mathbf{3{,}63}\ \boldsymbol{a}$$

zu 2) Meteorite erzeugen, wenn sie beim Eintritt in die Erdatmosphäre verglühen Leuchterscheinungen (Meteore). Wenn Meteorite auf der Erdoberfläche auftreffen, können Meteoritenkrater entstehen.

zu 3) Vesta war der Erde näher als Ceres oder Vesta reflektiert das Sonnenlicht stärker als Ceres.

<u>Aufgabe 17</u>: Mission „New Horizons“ (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2017):

Am 24.7.2015 passierte die NASA-Sonde „New Horizons“, die am 18.1.2006 gestartet war, den Zwergplaneten Pluto. Beim Vorbeiflug befanden sich Pluto und New Horizons in einer Sonnenentfernung von 33 AE.



1) Eine mögliche Bahn der Sonde von der Erde zum Pluto ist eine Ellipse, wie in der nicht maßstäblichen Abbildung dargestellt. Beschreibe die Lage der Sonne in dieser Ellipse und begründe, dass die große Halbachse der Bahn 17 AE beträgt.

2) Berechne die Flugdauer für diese Ellipsenbahn und vergleiche diese mit der tatsächlichen Flugdauer, die durch ein Swing-By-Manöver an Jupiter erreicht wurde.

Die Abbildung zeigt Pluto (rechts) und seinen Mond Charon (links) in einer zusammengesetzten Aufnahme der „New Horizons“-Sonde. Die Größen- und Helligkeitsverhältnisse sind richtig dargestellt, der Abstand zwischen den Himmelskörpern jedoch nicht.

3) Bestimme anhand der Abbildung näherungsweise das Verhältnis der Durchmesser von Pluto und Charon und ermittele anschließend damit das Verhältnis der Massen unter der Annahme, dass beide die gleiche Dichte haben, d.h. das gleiche Verhältnis von Masse und Volumen.

4) Es sollen die Einzelmassen von Pluto und Charon bestimmt werden. Gib an, welche Daten des Systems Pluto-Charon zu bestimmen sind, und beschreibe, wie mit diesen und dem Ergebnis aus Teilaufgabe **5)** die Einzelmassen berechnet werden können.

<u>Lösung</u>:

zu 1) Bei der skizzierten Bahn der Sonde handelt es sich um eine Hohmann-Bahn (vgl. S. 124). Im Vergleich zur Hohmann-Bahn ist die Umlaufbahn der Erde um die Sonne näherungsweise kreisförmig. Mit dieser Näherung steht die Sonne im Mittelpunkt der Erdbahn und zugleich in dem auf der Erdseite liegenden Brennpunkt der Hohmann-Ellipse.

Wenn Pluto 33 AE von der Sonne entfernt ist, beträgt die Entfernung Pluto-Erde 34 AE. Das ist aber die Länge der großen Symmetrieachse der Hohmannbahn. Damit folgt: $a_H = \frac{1}{2} \cdot 34\ AE = 17\ AE$.

zu 2) Die Hohmann-Bahn ist, wie die Erdbahn, eine Ellipsenbahn, bei der in einem der Brennpunkte die Sonnen als Zentralgestirn steht. Deshalb gilt:

$$\frac{{T_H}^2}{{a_H}^3} = \frac{{T_E}^2}{{a_E}^3} = 1\ \frac{a^2}{AE^3} \quad \Rightarrow \quad T = \sqrt{\frac{(17\ AE)^3}{AE^3}}\ a \approx 7{,}0 \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{t_{Flug}} = \frac{1}{2} \cdot T \approx \mathbf{3{,}5\ \boldsymbol{a}}$$

Die tatsächliche Flugzeit war mit ca. 9,5 Jahren deutlich länger. Dies liegt daran, dass die Sonde keine Hohmann-Bahn flog, sondern ein Swing-by-Manöver an Jupiter durchführte (vgl. S. 125).

zu 3)

$$\frac{\boldsymbol{D_{Pluto}}}{\boldsymbol{D_{Charon}}} = \frac{R_{Pluto}}{R_{Charon}} \approx \frac{3{,}5}{1{,}8} \approx \mathbf{1{,}94}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi R^3} \quad \Rightarrow \quad m = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi R^3 \quad \Rightarrow \quad \frac{\boldsymbol{m_{Pluto}}}{\boldsymbol{m_{Charon}}} = \frac{{R_{Pluto}}^3}{{R_{Charon}}^3} \approx 1{,}94^3 \approx \mathbf{7{,}3}$$

zu 4) Bei der gemeinsamen Bewegung von Pluto und Charon um den gemeinsamen Schwerpunkt handelt es sich um ein Zweikörperproblem. Es gilt:

$$\frac{T^2}{a_{Pluto}{}^3} = \frac{T^2}{a_{Charon}{}^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot (m_{Pluto} + m_{Charon})} \quad \text{und} \quad m_{Pluto} \cdot a_{Pluto} = m_{Charon} \cdot a_{Charon}$$

(Die Umlaufzeiten T sind Pluto und Charon gleich groß!)

Zur Bestimmung der Einzelmassen löst man das System der beiden obenstehenden Gleichungen mit den Unbekannten m_{Pluto} und m_{Charon}. Vorher müssen folgende Größen durch Messung bestimmt werden: Die beiden großen Halbachsen a_{Pluto} und a_{Charon} und die gemeinsame Umlaufzeit T.

Lösen des Gleichungssystems:

$$m_{Pluto} \cdot a_{Pluto} = m_{Charon} \cdot a_{Charon} \quad \Rightarrow \quad m_{Charon} = m_{Pluto} \cdot \frac{a_{Pluto}}{a_{Charon}} \quad (*)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{T^2}{a_{Pluto}{}^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot m_{Pluto}\left(1 + \frac{a_{Pluto}}{a_{Charon}}\right)} \quad \Rightarrow \quad m_{Pluto} = \frac{4\pi^2 \cdot a_{Pluto}{}^3}{G \cdot T^2\left(1 + \frac{a_{Pluto}}{a_{Charon}}\right)}$$

m_{Charon} wird dann mit $(*)$ berechnet.

<u>Aufgabe 18</u>: Jupiter und Komet Shoemaker-Levy 9 (SL 9):

In der Regel bewegen sich Kometen auf Ellipsenbahnen um die Sonne. t

1) Beschreibe anhand einer Skizze den typischen Aufbau eines Kometen in Sonnennähe und gib die charakteristischen Abmessungen an.

2) Beschreibe, wie es zur Ausbildung eines Kometenschweifs kommt. Warum ist die Zeitspanne, in der ein Komet einen Schweif ausbildet, im Vergleich zu seiner Umlaufzeit sehr klein?

Der Komet SL 9 wurde vom Planeten Jupiter in eine Umlaufbahn gezwungen. Nimm vereinfachend an, dass SL 9 sich nach dem Einfang zunächst auf einer Ellipsenbahn um das Zentralgestirn Jupiter bewegte. Beobachtungen ergaben, dass SL 9 im Juli 1992 mit $2{,}0 \cdot 10^4\ km$ den geringsten Abstand von der Oberfläche Jupiters hatte und 374 Tage später den Jupiterfernsten Punkt (Apojovium) erreichte.

3) Berechne mit den bekannten Werten für den Jupitermond Himalia (große Halbachse $a = 1{,}15 \cdot 10^7\ km$; Umlaufzeit $T = 251\ d$) die große Halbachse a_{SL} der Bahn von SL 9 und den größten Abstand r_A des SL 9 vom Jupitermittelpunkt.

4) Nimm an, dass das Apojovium auf der Verbindungsstrecke von Sonne und Jupiter liegt. Fertige eine maßstabsgetreue Zeichnung der Lage von Sonne, SL 9 im Apojovium und Jupiter, und berechne für diese Konstellation das Verhältnis der Gravitationskräfte von Sonne und Jupiter auf SL 9.

Im Juli 1994 fand eines der spektakulärsten astronomischen Ereignisse der letzten Jahre in unserem Sonnensystem statt: Der Komet SL 9 zerbrach und viele Bruchstücke stürzten nacheinander auf den Planeten Jupiter.

5) Berechne die Auftreffgeschwindigkeit eines Bruchstücks. Du kannst dabei davon ausgehen, dass diese dem Betrag nach etwa mit der Fluchtgeschwindigkeit vom Jupiter übereinstimmt.

6) Ein Bruchstück von SL 9 mit der Masse $1 \cdot 10^{12}\ kg$ drang mit der Geschwindigkeit von $v = 60\ \frac{km}{s}$ in die Jupiteratmosphäre ein und wurde dabei vollständig abgebremst. Welche Energie wurde bei diesem Einschlag dem Jupiter zugeführt? Vergleiche diese Wert mit der Energie von $3 \cdot 10^{20}\ J$, die bei der Entstehung des Nördlinger Rieses durch einen Meteoriteneinschlag freigesetzt wurde.

Lösung:

zu 1) Vgl. S. 139

zu 2) Vgl. S. 139

zu 3)

$$\frac{{T_{SL}}^2}{{a_{SL}}^3} = \frac{{T_H}^2}{{a_H}^3} \implies \boldsymbol{a_{SL}} = \sqrt[3]{\frac{{a_H}^3}{{T_H}^2} \cdot {T_{SL}}^2} = \sqrt[3]{\frac{(1{,}15 \cdot 10^7\ km)^3}{(251\ d)^2} \cdot (748\ d)^2} \approx 2{,}4 \cdot 10^7\ km \approx \mathbf{0{,}32}\ \boldsymbol{AE}$$

$$\boldsymbol{r_A} = 2 \cdot a_{SL} - r_P = 2 \cdot 2{,}4 \cdot 10^7\ km - 2{,}0 \cdot 10^4\ km \approx \mathbf{4{,}8 \cdot 10^7}\ \boldsymbol{km}$$

zu 4)

Skizze: $1\ AE\ \hat{=}\ 2\ cm \implies r_{\odot,J} = 5{,}2\ AE\ \hat{=}\ 10{,}4\ cm$ und $r_{SL,J} = 0{,}32\ AE\ \hat{=}\ 0{,}65\ cm$

Gravitationskraft, die die Sonne auf SL 9 ausübt:

$$F_{G1} = G \cdot \frac{m_\odot \cdot m_{SL}}{{r_{\odot,SL}}^2}$$

Gravitationskraft, die die Jupiter auf SL 9 ausübt:

$$F_{G2} = G \cdot \frac{m_{SL} \cdot m_J}{{r_{SL,J}}^2}$$

$$\frac{\boldsymbol{F_{G1}}}{\boldsymbol{F_{G2}}} = \frac{m_\odot}{m_J} \cdot \frac{{r_{\odot,J}}^2}{{r_{\odot,SL}}^2} \approx \frac{1{,}99 \cdot 10^{30}\ kg}{318 \cdot 5{,}974 \cdot 10^{24}\ kg} \cdot \frac{(0{,}32\ AE)^2}{(5{,}2\ AE - 0{,}32\ AE)^2} \approx \mathbf{4{,}5}$$

zu 5)

$$\boldsymbol{v} = \lim_{a \to \infty} \sqrt{G \cdot m_J \cdot \left(\frac{2}{r_J} - \frac{1}{a}\right)} = \sqrt{G \cdot m_J \cdot \frac{2}{R_J}} = \sqrt{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot \frac{318 \cdot 5{,}974 \cdot 10^{24}\ kg}{69{,}9 \cdot 10^6\ m}}$$

$$\approx \mathbf{60}\ \frac{\boldsymbol{km}}{\boldsymbol{s}}$$

zu 6)

$$\boldsymbol{E_{kin}} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \cdot 10^{12}\ kg \cdot \left(60 \cdot 10^3\ \frac{m}{s}\right)^2 \approx \mathbf{1{,}8 \cdot 10^{21}}\ \boldsymbol{J}$$

Diese Energie ist etwa 6-mal so groß wie die Energie des Meteoriten vom Nördlinger Ries.

Aufgabe 19: **Landung auf dem Kometen Tschurjumow-Gerassimenko (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2016):**

Am 12.11.2014 setzte mit Philae erstmals ein Lander auf die Oberfläche eines Kometen auf. Die Gestalt des Kometen Tschurjumow-Gerassimenko kann durch zwei Kugeln vom Radius $1{,}4\ km$ modelliert werden, die über ein Zwischenstück mit vernachlässigbaren Ausmaßen verbunden sind. Senkrecht auf dem Zwischenstück steht die Rotationsachse, um die sich der Komet einmal in $12{,}4\ h$ dreht. Es wird angenommen, dass die Masse $1{,}0 \cdot 10^{13}\ kg$ des Kometen zu gleichen Teilen auf die beiden Kugeln verteilt ist.

1) Durch Ausgasen des Kometen in Sonnennähe besteht die Möglichkeit, dass das Zwischenstück bricht. Untersuche auf Grundlage des obigen Modells, ob die beiden Kometenhälften dann auseinanderdriften würden.

Der Lander Philae wurde von der Sonde Rosetta ausgestoßen, die den Kometen näherungsweise auf einer Kreisbahn mit dem Radius $20\ km$ umrundete. Nehmen Sie an, dass Philae unmittelbar danach relativ zum Kometenschwerpunkt ruht und ein freier, geradliniger Fall in Richtung der Kometenoberfläche beginnt. Zur Untersuchung dieser Bewegung wird der Komet stark vereinfachend als eine Kugel mit Radius $1{,}8\ km$ angenommen.

2) Zeige, dass die Beschleunigung, die Philae zu Beginn des Falls erfährt, $1{,}7 \cdot 10^{6}\ \frac{m}{s^2}$ beträgt. Berechne die Falldauer bis zur Oberfläche in Tagen unter der vereinfachenden Annahme, dass die Beschleunigung während des gesamten Falls konstant bleibt.

3) Philae trifft mit etwa $2{,}9\ \frac{km}{h}$ auf dem Kometen auf. Erkläre, weshalb Philae ohne den Einsatz technischer Vorrichtungen nicht dauerhaft auf der Oberfläche des Kometen landen kann, und schlage eine sinnvolle Vorrichtung vor.

Lösung:

zu 1) Wir vergleichen die anziehende Gravitationskraft F_G zwischen den beiden kugelförmigen Teilchen des Kometenkerns mit der Zentrifugalkraft F_Z, die auf jeweils eine der Kugeln wirkt:

$$\boldsymbol{F_G} = G \cdot \frac{\left(\frac{1}{2} \cdot m\right)^2}{r^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2} \cdot 1{,}0 \cdot 10^{13}\ kg\right)^2}{(2 \cdot 1{,}4 \cdot 10^3\ m)^2} \approx \boldsymbol{2{,}13 \cdot 10^8\ N}$$

$$\boldsymbol{F_Z} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \frac{v^2}{r} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \frac{\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2}{r} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \frac{4\pi^2 \cdot r}{T^2} = \frac{1}{2} \cdot 1{,}0 \cdot 10^{13}\ kg \cdot \frac{4\pi^2 \cdot 1{,}4 \cdot 10^3\ m}{(12{,}4 \cdot 3600\ s)^2}$$
$$\approx \boldsymbol{1{,}39 \cdot 10^8\ N}$$

$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{F_G > F_Z} \quad \Longrightarrow$ Die Kometenhälften würden nicht auseinanderdriften.

zu 2)

$$F_G = G \cdot \frac{m_{Ph} \cdot m}{r^2} = m_{Ph} \cdot a \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{a} = G \cdot \frac{m}{r^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot \frac{1{,}0 \cdot 10^{13}\ kg}{(20 \cdot 10^3\ m)^2} \approx \boldsymbol{1{,}7 \cdot 10^{-6}\ \frac{m}{s^2}}$$

$$\Delta s = r - R = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \Longrightarrow \boldsymbol{t} = \sqrt{\frac{2 \cdot (r-R)}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (20 \cdot 10^3\ m - 1{,}8 \cdot 10^3\ m)}{1{,}7 \cdot 10^{-6}\ \frac{m}{s^2}}} \approx 1{,}48 \cdot 10^5\ s \approx \boldsymbol{1{,}7\ d}$$

zu 3) Vgl. S. 143

<u>Aufgabe 20</u>: **Die Draconiden – ein himmlisches Feuerwerk (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2013):**

Jedes Jahr lässt sich Anfang Oktober der Sternschnuppen-Schauer der Draconiden beobachten, der auf den Kometen Giacobini-Zinner zurückzuführen ist. Der Komet hat eine siderische Umlaufzeit um die Sonne von $T = 6{,}62\ a$, seine Periheldistanz beträgt $r_P = 1{,}04\ AE$.

1) Berechne die große Halbachse a der Kometenbahn sowie die Apheldistanz r_A des Kometen.

2) Berechne die Geschwindigkeit des Kometen im Perihel.

3) Beschreibe mithilfe einer geeigneten Skizze die Erscheinungsform eines Kometen in Sonnennähe.

4) Erläutere allgemein, wie Sternschnuppen mit Kometen zusammenhängen. Gehe dabei sowohl auf die Entstehung der optischen Erscheinung der Sternschnuppen als auch auf ihre regelmäßige jährliche Wiederkehr ein.

5) Sternschnuppen sind typischerweise einige Millimeter groß und zwischen einigen Milligramm und einigen Gramm schwer. Berechne die kinetische Energie eines Partikels der Masse $0{,}10\ g$ aus dem Sternschnuppen-Schauer, das sich mit $21\ \frac{km}{s}$ relativ zur Erde bewegt.

6) Stelle einen Alltagsbezug her, indem Du einen Gegenstand mit realistischen Angaben für Masse und Geschwindigkeit nennst, der in etwa dieselbe kinetische Energie besitzt, wie das Partikel aus Teilaufgabe **5)**.

<u>Lösung</u>:

zu 1)

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{{T_E}^2}{{a_E}^3} = 1\,\frac{a^2}{AE^3} \quad \Rightarrow \quad a = \sqrt[3]{T^2 \cdot \frac{AE^3}{a^2}} = \sqrt[3]{(6{,}62\ a)^2 \cdot \frac{AE^3}{a^2}} \approx 3{,}53\ AE$$

$$\boldsymbol{r_A} = 2 \cdot a - r_P = 2 \cdot 3{,}53\ AE - 1{,}04\ AE \approx \mathbf{6{,}02\ AE}$$

zu 2) Geschwindigkeit auf der Ellipsenbahn im Perihel:

$$\boldsymbol{v_P} = \sqrt{G \cdot m_\odot \cdot \left(\frac{2}{r_P} - \frac{1}{a}\right)} =$$

$$= \sqrt{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot 1{,}989 \cdot 10^{30}\ kg \cdot \left(\frac{2}{1{,}04 \cdot 1{,}496 \cdot 10^{11}\ m} - \frac{1}{3{,}53 \cdot 1{,}496 \cdot 10^{11}\ m}\right)}$$

$$\approx \mathbf{38{,}1\ \frac{km}{s}}$$

zu 3) Vgl. S. 139

zu 4) Sternschnuppen entstehen, wenn Partikel aus der Koma oder dem Schweif, die Kometen auf ihrer Bahn hinterlassen in die Erdatmosphäre eindringen und verglühen. Jährlich wiederkehrende Sternschnuppenströme entstehen, wenn die Erde Gebiete mit Kometenpartikeln auf ihrer Bahn durchläuft.

zu 5) $$\boldsymbol{E_{kin}} = \tfrac{1}{2} m v^2 = \tfrac{1}{2} 0{,}10 \cdot 10^{-3}\ kg \cdot \left(21 \cdot 10^3\ \tfrac{m}{s}\right)^2 \approx \mathbf{22\ kJ}$$

zu 6) Z.B.: Auto mit der Masse $m = 1000\ kg$:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{kin}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 22 \cdot 10^3\ J}{1000\ kg}} \approx 6{,}63\ \frac{m}{s} \approx 24\ \frac{km}{h}$$

Quellen und weiterführende Literatur:

Werner Büdeler: Projekt Apollo, Bertelsmann Sachbuchverlag

Astronomie und Raumfahrt, Erhard Friedrich Verlag:

<u>Der Mond</u>:

Heft 1/2005: Untersuchungen zur Physik des Mondes (S. 19 bis 22)
Heft 2/2014: Den Mond im Visier (S. 4 bis 7)
Heft 2/2014: Einschlagende Experimente und spannende Theorien: Mondkrater im Unterricht (S. 35 bis 39)
Heft 5/2001: Vermessung von Mondberghöhen (S. 32 bis 35)
Heft 1/2007: Abschätzung von Berghöhen auf dem Mond (S. 19 bis 21)
Heft 2/2014: Auf dem Weg zum neuen Mond (S. 12 bis 14)
Heft 2/2014: Mondforschung heute und morgen (S. 15 bis 17)
Heft 1/2007: Gezeiten und Erdrotation (S. 40 bis 44)
Heft 2/2008: Mondfinsternisse (S. 4 bis 6)
Heft 1/2007: Der Mond im Schulfernrohr (S. 4 bis 7)
Heft 2/2014: Mondfotografie - Techniken und Möglichkeiten auch für die Schule (S. 8 bis 10)

<u>Raumfahrt zum Mond</u>:

Heft 6/2003: Die erste bemannte Mondlandung – ein Jahrhundertereignis (S. 11 bis 14)
Heft 5/2011: Die Geschichte der weichen Mondlandungen (S. 43 bis 45)
Heft 4/1999: Apollo 11 – Drei Jahrzehnte später (S. 6 bis 9)
Heft 5/2016: Weltraumbahnhöfe heute: Wo kosmische Reisen beginnen (S. 23 bis 25)
Heft 5/1999: Was hat die Raumfahrt für die Astronomie gebracht? (S. 30 bis 36)

<u>Sonden</u>:

Heft 4/2002: Cassini: Swing-by-Manöver in Vollendung (S. 41 bis 43)
Heft 5/2004: Cassinis Auftakt am Saturn (S. 32 bis 35)
Heft 1/2017: Lagrange-Punkte als Thema im Physikunterricht (S. 10 bis 15)
Heft 2/2010: Lagrange-Punkte im Physikunterricht (S. 15 bis 17)

<u>Die Planeten</u>:

Heft 5/2005: Die Entstehung unseres Planetensystems (S. 23 bis 26)
Heft 5/2001: Betrachtungen zum Aufbau und zur Entstehung des Planetensystems (S. 13 bis 17)
Heft 1/2010: Protoplanetare Scheiben (S. 33 bis 36)
Heft 5/2001: Planetenschleifen und der Stern von Betlehem (S. 23 bis 26)
Heft 1/2009: Raumsonde Messenger erforscht den Merkur (S. 10 bis 13)
Heft 1/2014: Zum Mars, wohin sonst? (S. 43 bis 46)
Heft 6/2010: Wasser auf dem Planeten Mars (S. 21 bis 25)
Heft 2/2003: Die Mars-Mission (S. 31 bis 34)
Heft 5/2005: Die Marsoberfläche – überprägt durch Wasser und Eis bis heute (S. 29 bis 33)
Heft 3/2000: Vergleichende Morphologie Mars-Erde (S. 22 bis 29)
Heft 3/2000: Vulkanismus auf Jupitermond Io (S. 30 bis 33)
Heft 3_4/2017: Entdeckungen auf fernen Saturnwelten (S. 29 bis 32i)

Asteroiden und Zwergplaneten:
Heft 5/2015: Drei Zwergwelten des Sonnensystems (Rosetta, Dawn, New Horizons) (S. 34 bis 37)
Heft 1/2010: Neuordnung im Sonnensystem (Zwergplaneten) (S. 30 bis 32)
Heft 3_4/2008: Asteroiden (S. 43 bis 46)
Heft 3_4/2012: Erdnahe Asteroiden und der Kuipergürtel (S. 33 bis 37)
Heft 5/2015: Der Asteroid 433 Eros und die Bestimmung der Astronomischen Einheit (S. 8 bis 12)
Heft 5/2015: Schäferhunde u. Chaoten – ein himmelsmechanischer Ausflug i. d. Planetenringe (S. 19 bis 24)
Heft 1/2008: Meteorite – Urmaterie des Sonnensystems (S. 19 bis 22)
Heft 3_4/2008: Kuiper-Gürtel und Bahnresonanzen (S. 51 bis 54)
Heft 6/2000: Der Ursprung der erdnahen Asteroiden (S. 9 bis 11)
Heft 5/2015: David gegen Goliath – Erste Experimente zu Asteroidenabwehr (S. 30 bis 33)

Kometen:
Heft 6/2014: Von Giotto bis Rosetta – Kometenforschung mit Raumsonden (S. 34 bis 37)
Heft 5/2015: Zur Erforschung der Natur der Kometenschweife (S. 13 bis 18)
Heft 6/2000: Ein Komet auf seiner Reise durch das Sonnensystem (S. 4 bis 8)
Heft 3/2006: Die Rosetta-Mission (S. 4 bis 7)
Heft 5/2015: Die Rosetta-Mission (S. 38 bis 42)
Heft 1/2008: Deep Impact – Einschlag auf einem Kometen (S. 13 bis 16)

Kosmos Himmelsjahr:

Der Mond:
Kosmos Himmelsjahr 2014: Ein Blick zum Vollmond (S. 208 bis 213)
Kosmos Himmelsjahr 2011: Der goldene Henkel (Mondbeobachtung) (S. 39 bis 43)

Die Planeten:
Kosmos Himmelsjahr 2013: Merkur – Planet in der Sonnenglut (S. 65 bis 71)
Kosmos Himmelsjahr 2016: Der Schleier der Venus (S. 259 bis 267)
Kosmos Himmelsjahr 2018: Mars in extremer Erdnähe (S. 147 bis 153)
Kosmos Himmelsjahr 2016: Die Marsmonde Phobos und Deimos (S. 108 bis 113)
Kosmos Himmelsjahr 2014: Leben auf Mars? (S. 92 bis 98)
Kosmos Himmelsjahr 2014: Jupiter – Gigant des Sonnensystems (S. 50 bis 57)
Kosmos Himmelsjahr 2018: Jupiter und Juno (S. 125 bis 133)
Kosmos Himmelsjahr 2012: Die Ringplaneten (S. 105 bis 113)
Kosmos Himmelsjahr 2015: Woher stammt der Saturnring (S. 126 bis 133)
Kosmos Himmelsjahr 2014: Titan – der Riesenplanet des Ringplaneten (S. 134 bis 139)
Kosmos Himmelsjahr 2018: Der magische Planet (Uranus) (S. 223 bis 249)
Kosmos Himmelsjahr 2015: Die Entdeckung des 13. Planeten (Neptun) (S. 164 bis 171)

Asteroiden und Zwergplaneten:
Kosmos Himmelsjahr 2017: Dier Trojaner – Vasallen des Jupiter (S. 106 bis 111)
Kosmos Himmelsjahr 2017: Besuch bei der Göttin Siziliens (Ceres) (S. 258 bis 266)
Kosmos Himmelsjahr 2015: Endspurt zu Pluto (New Horizons) (S. 164 bis 171)

Kometen:
Kosmos Himmelsjahr 2016: Rosetta – Inspektion eines Kometen (S. 143 bis 151)

Spektrum der Wissenschaft:

Dossier Raumfahrt, 4/1999 Die Pathfinder-Mission (S. 28 bis 35)
Dossier Mars, 3/2004 Suche nach Leben (S. 28 bis 32)
Dossier Mars, 3/2004 Die Suche nach Leben in unserem Sonnensystem (S. 33 bis 38)
Dossier Mars, 3/2004 Die ersten Besucher des Mars (Viking, Mariner) (S. 21 bis 26)
Dossier Mars, 3/2004 Mars im Fokus (Mars Express) (S. 6 bis 15)
Dossier Mars, 3/2004 Die Pathfinder-Mission (S. 68 bis 75)
Dossier Mars, 3/2004 Die unteririschen Landschaften des Mars (S. 58 bis 67)
Dossier Mars, 3/2004 Gefrorener Ozean unter dem Marsboden (Mars Odyssey) (S. 76 bis 79)

Sterne und Weltraum:

Dossier 1/2010 Phoenix – Der Vogel aus der Asche (Mars) (S. 10 bis 20)

Filme:

Jacqueline Smith, Die Planeten: Nachbar Mond, BBC
Deborah Cadbury und Christopher Spencer: Wettlauf zum Mond – Die Apollo-Mission

Themen für Seminararbeiten und Referate:

- **Der Weg zur ersten bemannten Mondlandung**

→ Die Mission Apollo 11

- **Mondbeobachtung mit dem Schulteleskop**

→ Mond und Sonnenfinsternisse

- **Unser Nachbarplanet der Mars – Marsforschung mit Raumsonden**

→ Die Mission Mars-Express

- **Die Erforschung von Asteroiden und Zwergplaneten**

→ Die New-Horizons-Mission zu Pluto

- **Kometen-Beobachtung und Erforschung**

→ Die Rosetta-Mission zum Kometen Tschurjumow-Gerassimenko

- **Der Saturn – Planet, Ringsystem und Monde**

→ Die Cassini-Huygens-Mission zu Saturn

IV. Die Sonne

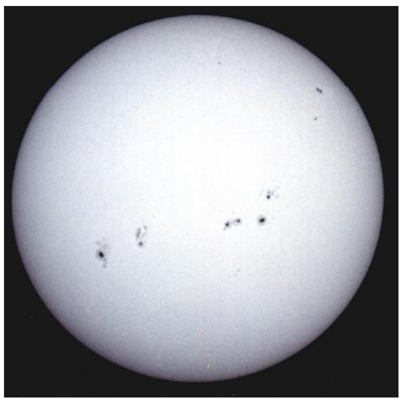
1) Sonnenbeobachtung

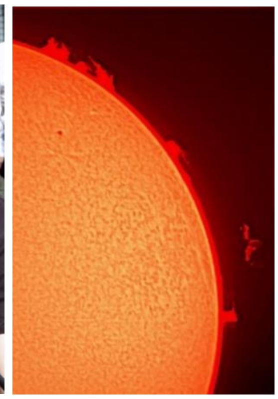
Hinweis zur Sonnenbeobachtung:

Blicke nie länger mit ungeschütztem Auge und keinesfalls mit einem Fernglas oder Teleskop ohne Sonnenfilter in die Sonne!

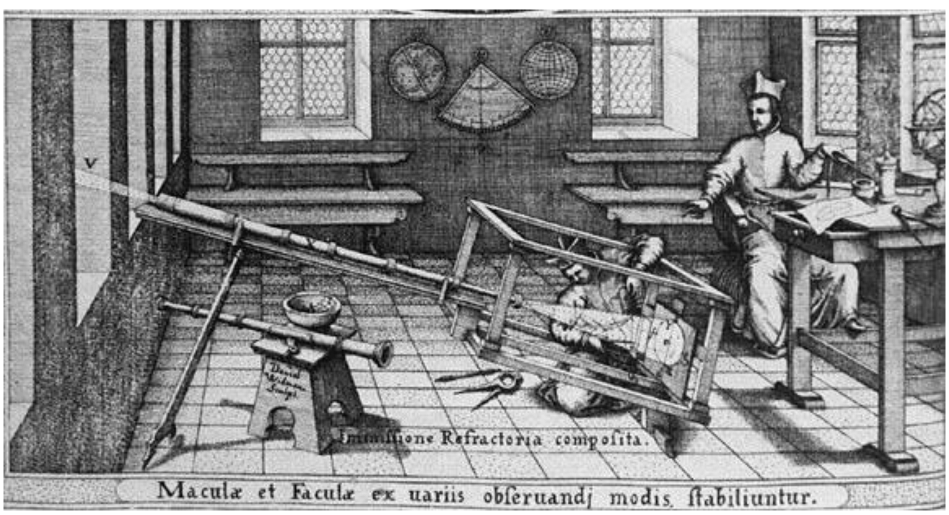
Linsen bündeln das Sonnenlicht und brennen irreparabel Löcher in die Netzhaut des Auges.

Im Unterricht bringen wir bei Sonnenbeobachtungen vor dem Teleskop einen **Sonnenfilter** an.
Wenn die Sonne gerade Sonnenflecken zeigt, sind diese in einem Spiegelteleskop mit Sonnenfilter gut sichtbar (Bild 1 und Bild 2 von links).



In einem Teleskopmit **H-Alpha-Filter**, der nur für Licht des schmalen Wellenlängenbereichs der H_α-Linie (vgl. Kap II, S. 41) durchlässig ist, sieht man Protuberanzen und Flares. Wir verwenden im Unterricht ein kleines H-Alpha-Teleskop, das Coronado P.S.T. (Bild 3 und Bild 4 von links).



Eine weitere Möglichkeit, die Sonne bzw. Sonnenflecken gefahrlos zu beobachten, ist die **Projektion der Sonnenscheibe** auf einen weißen Schirm. Für diese Methode darf man allerdings kein Spiegelteleskop verwenden, sondern nur Linsenteleskope. Die Spiegel eines Spiegelteleskops heizen sich zu stark auf, wodurch Spiegel und Teleskop beschädigt werden können.
In der Abbildung beobachtet der in der Jesuitenpater und Astronom ***Christoph Scheiner (1575 -1650)*** die Sonne in Projektion.

2) Grundlegende physikalische Eigenschaften der Sonne

Masse und Größe der Sonne:

Die Sonnenmasse lässt sich mithilfe des 3. Keplerschen Gesetzes berechnen. Man betrachtet dabei Sonne und Erde und geht näherungsweise von einer Kreisbahn der Erde um die feststehende Sonne aus.

Beachte: In Skizzen und Berechnungen verwenden wir für „Sonnengrößen" als Index das Sonnensymbol ⊙.

3. Keplersches Gesetz (vgl. S. 83):

$$\frac{{T_E}^2}{{a_E}^3} = 1\frac{a^2}{AE^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot m_\odot}$$

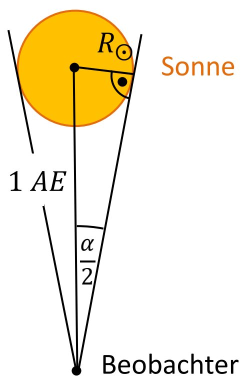
$$\Longrightarrow \quad m_\odot = \frac{4\pi^2 \cdot AE^3}{G \cdot a^2} = \frac{4\pi^2 \cdot (1{,}496 \cdot 10^{11}\ m)^3}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot (365 \cdot 24 \cdot 3600\ s)^2} \approx 1{,}99 \cdot 10^{30}\ kg$$

$$\frac{m_\odot}{m_E} = \frac{1{,}99 \cdot 10^{30}\ kg}{5{,}974 \cdot 10^{24}\ kg} \approx 3{,}3 \cdot 10^5$$

Masse der Sonne: $\boldsymbol{m_\odot \approx 1{,}99 \cdot 10^{30}\ kg \approx 330\,000 \cdot m_E}$ (FS 43)

- Mehr als 99% der Gesamtmasse des Sonnensystems sind in der Sonne vereinigt!

Der **Radius der Sonne** lässt sich trigonometrisch aus dem Winkel, unter dem der Beobachter auf der Erde die Sonne sieht und dem Abstand der Erde von der Sonne berechnen:



Für den Winkel α, unter dem der irdische Beobachter die Sonne sieht, gilt:

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{R_\odot}{1\ AE} \quad \Longrightarrow \quad R_\odot = \sin\frac{\alpha}{2}\ AE$$

Aus der Messung des Winkels α folgt:

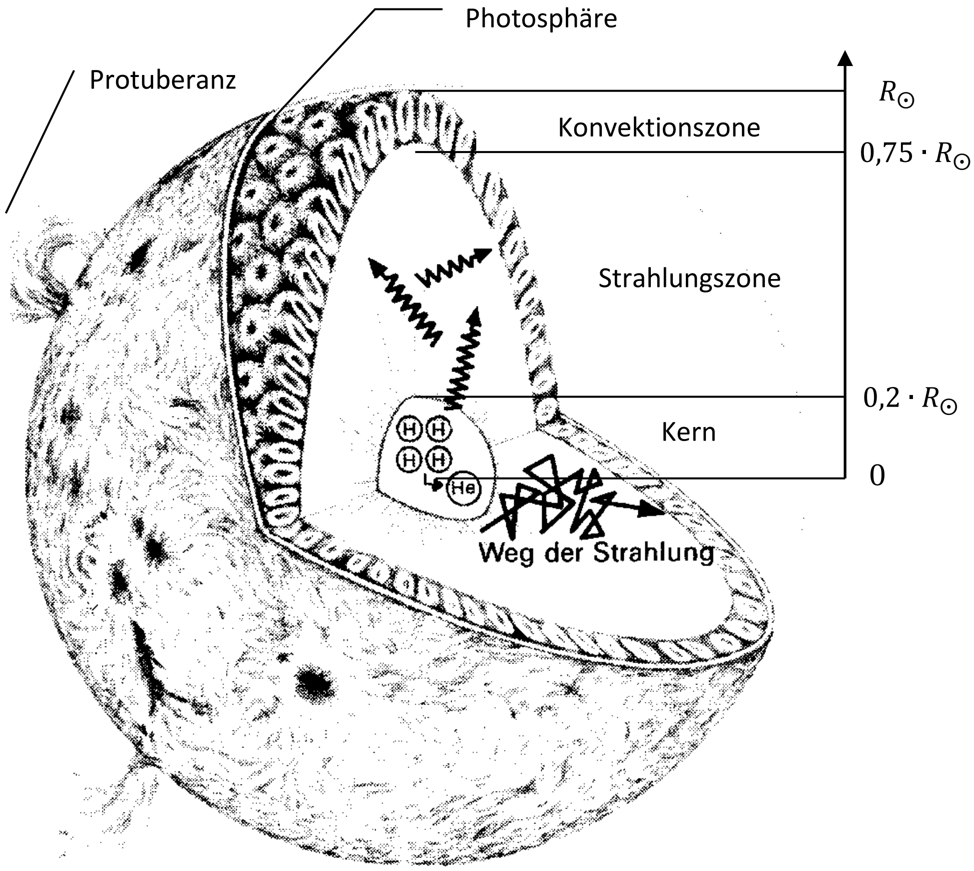
Radius der Sonne: $\boldsymbol{R_\odot \approx 14{,}0 \cdot 10^5\ km \approx 109 \cdot R_E}$ (FS 43)

Rechenbeispiel: Wie oft passt das Volumen der Erde in das Sonnenvolumen?

$$V_{\text{Kugel}} = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad \Longrightarrow \quad \frac{V_\odot}{V_E} = \frac{{R_\odot}^3}{{R_E}^3} \approx 109^3 \approx 1{,}3 \cdot 10^6$$

Das Volumen der Erde passt also etwa 1,3 Millionen-mal in das Sonnenvolumen!

Der Aufbau der Sonne:



Sonnenkern:

Ort der Energieerzeugung durch Kernfusion
Temperatur: $15 \cdot 10^6\ K$ innen bis $10 \cdot 10^6\ K$ außen
35% der Sonnenmasse befinden sich im Kern.

Strahlungszone:

Wärmetransport erfolgt durch Strahlung nach außen.
Temperatur: $10 \cdot 10^6$ K innen bis $1{,}5 \cdot 10^6$ K außen
64% der Sonnenmasse befinden sich in der Strahlungszone.

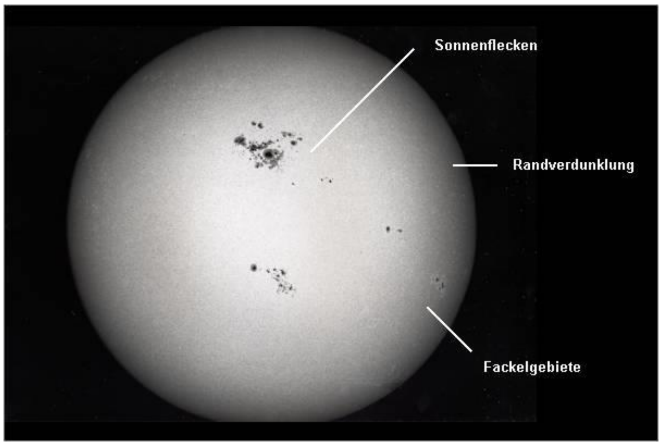
Konvektionszone:

Wärmetransport erfolgt durch Konvektion (Wärmebewegung) nach außen.
Temperatur: $1{,}5 \cdot 10^6$ K innen bis $5800\ K$ außen
1% der Sonnenmasse befindet sich in der Konvektionszone.

Photosphäre („Sonnenoberfläche“)

Nur etwa 200 km dicke, sichtbare Schicht, aus der die Sonnenstrahlung kommt, die die Erde erreicht.

Die Photosphäre wird manchmal bereits zur Sonnenatmosphäre gerechnet.



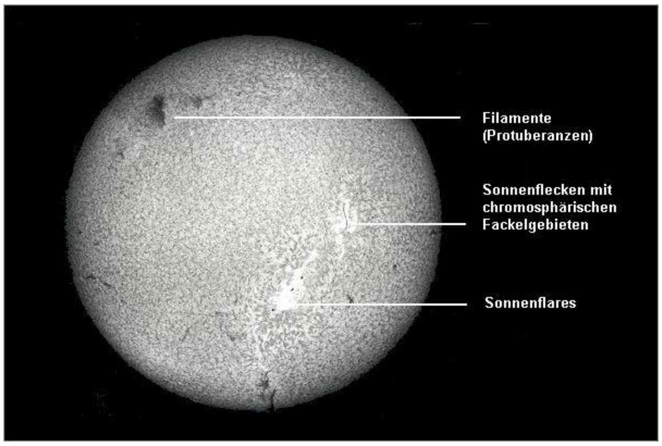
Sonnenatmosphäre:

Chromosphäre:

Etwa $10\,000\,km$ dicke innere Sonnenatmosphärenschicht

Die Chromosphäre ist bei Sonnenfinsternis oder mit einem H-Alpha-Filter beobachtbar.

In der Chromosphäre steigt die Temperatur auf bis $10\,000\,K$ an.

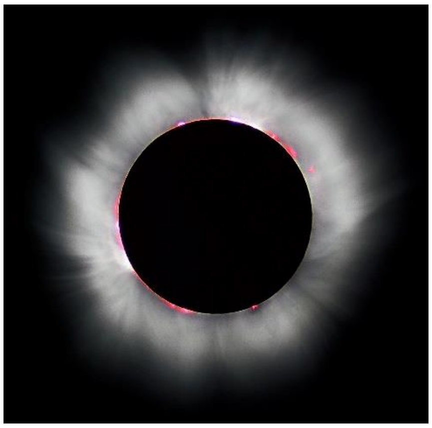


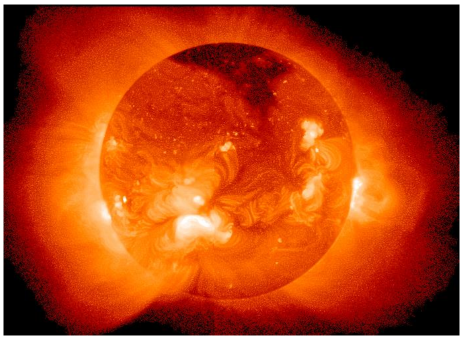
Korona:

Die Korona ist die äußerste Sonnenatmosphäre und dehnt sich in den interplanetaren Raum hinein aus. Die Dichte der Korona ist sehr gering, um 1000- bis 1 000 000-mal geringer als die der Chromosphäre.

Die Temperatur steigt in der Chromosphäre auf etwa $25\,000\,K$ und in der Korona etwa 1 Million Kelvin an. Die Ursache dieser starken Temperaturzunahme in der Sonnenatmosphäre ist noch nicht vollständig geklärt. Man vermutet aber, dass die Sonnenatmosphäre durch Magnetfelder beheizt wird.

Bei Sonnenfinsternis ist die Korona als Strahlenkranz um die Sonne beobachtbar. Das Bild rechts zeigt die Sonnen-Korona bei der **Sonnenfinsternis von 1999**. Der rote Flammenrand ist die Chromosphäre.





Die Aufnahme des japanischen **Röntgensatelliten Yohkoh** zeigt die Korona auch vor der Sonne.

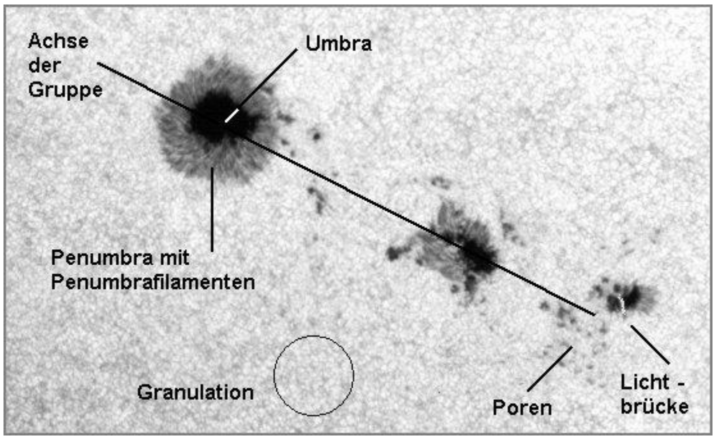
Die Sonnenmaterie besteht im Wesentlichen aus **Plasma**. In diesen Zustand geht die Materie bei hohen Temperaturen über. Die Elektronen lösen sich aufgrund ihrer hohen Bewegungsenergie von den Atomkernen, so dass die Materie aus freien geladenen Teilchen besteht. Eine wichtige Eigenschaft des Plasmas ist seine gute elektrische Leitfähigkeit.

Sonnenflecken:

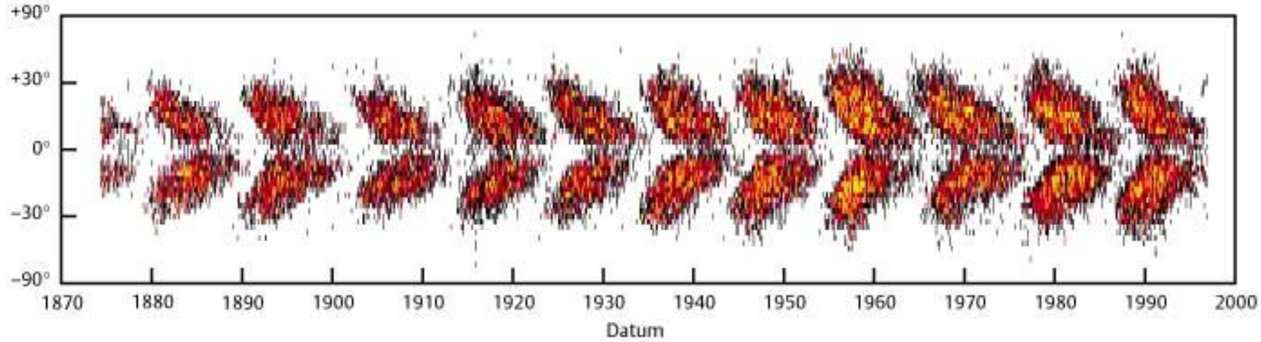
Bereits Galileo Galilei sah, als er die Sonne durch das Fernrohr in Projektion beobachtete, dunkle Flecken auf der Sonne. **Sonnenflecken** treten meist in Gruppen auf.

Größere Sonnenflecken weisen eine Struktur auf: Ein dunklerer **Kern (Umbra)** ist von einem helleren **Hof (Penumbra)** umgeben.

Die Flecken erscheinen schwarz, weil sie weniger heiß sind, als die sie umgebende, etwa $5800\,K$ heiße Photosphäre. Aber auch die Sonnenflecken sind nicht gerade kühl: Ihre Temperatur beträgt etwa $3700\,K$ (Umbra) bzw. $4500\,K$ (Penumbra).



In **Schmetterlingsdiagrammen** wird die Häufigkeit der Sonnenflecken bezogen auf Zeit und Abstand vom Sonnenäquator aufgetragen:



Man erkennt zwei Phänomene:

- Ausgehend von einzelnen Sonnenflecken in maximalem Abstand vom Sonnenäquator (etwa 30°) bilden sich in Richtung zum Sonnenäquator hin weitere Sonnenflecken. Dabei verschwinden die älteren Sonnenflecken mit der Zeit wieder.
- Die Sonnenfleckentätigkeit weist eine Periode von etwa 11 Jahren auf.

Hinweis: Auf der Internetseite http://spaceweather.com/ kann man nachschauen, ob gerade Sonnenflecken beobachtbar sind bzw. wie sie die Sonnenoberfläche in der letzten Zeit verändert hat.

Beobachtet man die gleichen Sonnenflecken über mehrere Tage hinweg, so fällt auf, dass sie scheinbar über die Sonnenscheibe wandern. Diese scheinbare Bewegung ist ein Nachweis für die **Sonnenrotation**.

Differenzielle Rotation der Sonne:

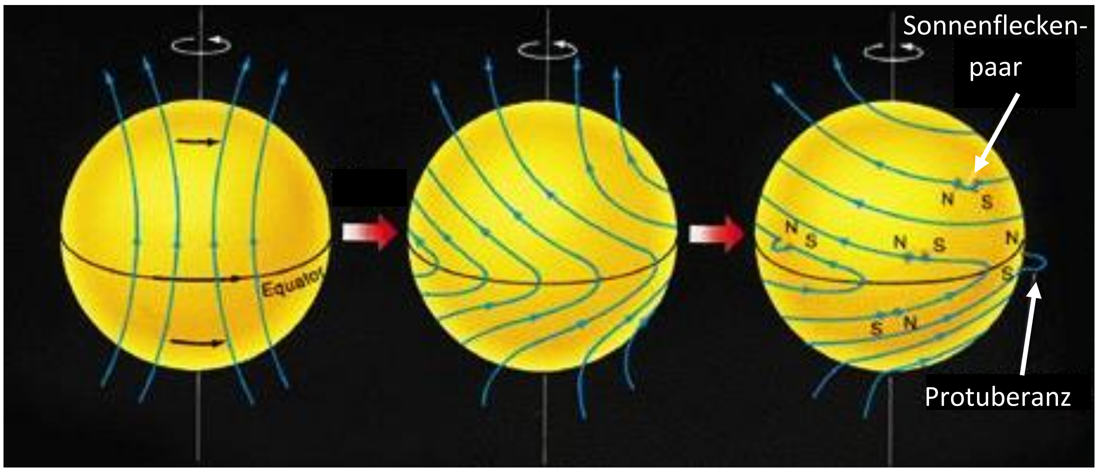
Die Sonne dreht sich nicht, wie ein starrer Körper (Erde und fest Planeten), sondern die Gasmassen der Sonne rotieren am Äquator schneller (Umlaufdauer $\approx$ 25 Tage) und in höheren Breiten langsamer (Umlaufdauer $\approx$ 35 Tage an den Polen).

Ein weiteres Phänomen der Photosphäre ist die **Granulation**, eine wabenartige Struktur. Im Inneren der Granulen steigt heiße Sonnenmaterie auf, am Rand der Granulen sinkt sie wieder ab.

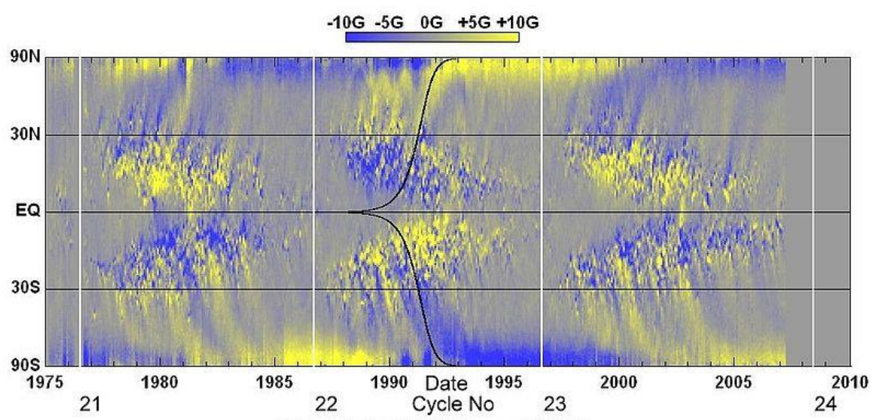
Das Magnetfeld der Sonne:

Das Magnetfeld der Sonne ändert seine Form periodisch in einem Zeitraum von 22 Jahren:

Zur Zeit eines **Aktivitätsminimums** hat die Sonne, wie die Erde, genau zwei magnetische Pole: einen magnetischen Nord- und einen magnetischen Südpol. Man sagt, die Sonne besitzt ein **bipolares Magnetfeld** (vgl. linkes Bild).

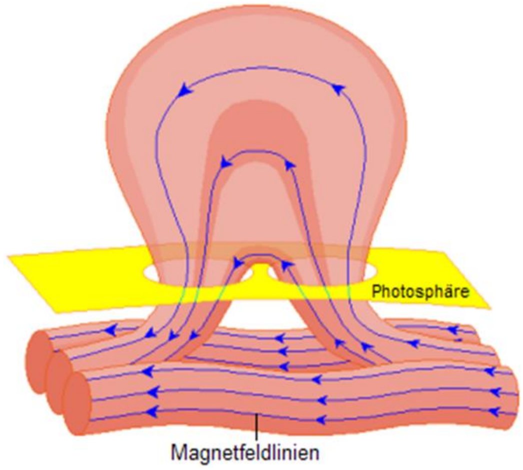


Wegen der hohen Leitfähigkeit des Sonnenplasmas ist das Sonnenmagnetfeld an die Sonnenmaterie gebunden. Die differenzielle Rotation der Sonne führt zu einer Relativbewegung von Teilen der Sonnenmaterie zueinander. Deshalb wird das Magnetfeld der Sonne gestaucht und verdrillt (vgl. mittleres Bild). Die magnetischen Feldlinien im Inneren der Sonne verdichten sich im Bereich um den Sonnenäquator. Der zunehmende „magnetische Druck“ sorgt schließlich dafür, dass die Feldlinien dort, wo das Magnetfeld am stärksten ist, aufsteigen und die Photosphäre durchdringen (vgl. rechtes Bild). Im Bereich um den Sonnenäquator bilden sich zahlreiche magnetische Pole die über die Sonnenoberfläche verteilt sind. Die Sonne besitzt nun ein **toroidales Magnetfeld**.

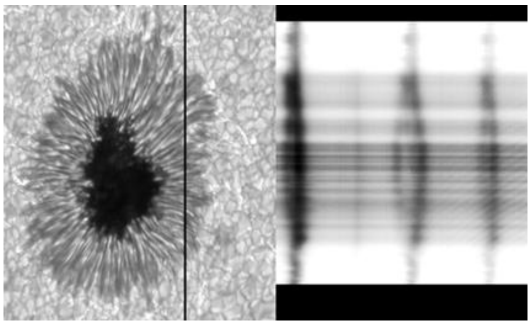


Die Abbildung rechts zeigt eine Karte der Photosphäre, in die die Pole des Sonnenmagnetfeldes eingetragen sind. Magnetische Nord- bzw. Südpole wurden durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet (blau, gelb). Zu Zeitpunkten, die durch senkrechte weiße Linien markiert wurden, ist das Magnetfeld der Sonne bipolar. Dazwischen erkennt man die Übergänge zu einem toroidalen Magnetfeld.

Sonnenflecken befinden sich an den Stellen, wo im toroidalen Magnetfeld die magnetischen Feldlinien aus der Photosphäre austreten. An diesen Stellen ist das Magnetfeld der Sonne bis zu 10 000-mal so stark wie das Erdmagnetfeld. Im Sonneninneren hemmen starke Magnetfelder die Konvektionsströmungen, so dass weniger Energie nach außen transportiert wird und im Vergleich zur Umgebung kühlere Bereiche an der Sonnenoberfläche entstehen.



Das Magnetfeld dehnt sich über die Sonnenflecken hinaus nach außen hin in die Chromosphäre aus und bildet bogenartige Feldlinien, die in den Magnetpolen auf der Photosphäre beginnen und enden. Sonnenflecken treten meist in Zweiergruppen auf, deren Partner sich durch die magnetische Polarität unterscheiden.



Dass es im Bereich der Sonnenflecken zu Verdichtungen des Magnetfeldes kommt, kann man mithilfe des **Zeeman-Effekts** nachweisen: Magnetfelder in der Sonnenatmosphäre führen im Sonnenspektrum zu einer Aufspaltung der Fraunhoferlinien, die man mit einem hochauflösenden Spektrografen beobachten kann.

In Zeiten mit toroidalem Magnetfeld und vielen Sonnenflecken befindet sich die Sonne in einem Zustand **hoher Aktivität**.

Im weiteren zeitlichen Verlauf bildet sich wieder ein bipolares Magnetfeld aus, das aber eine umgekehrte Polung aufweist. Nun ist wieder ein Minimum der Sonnenaktivität erreicht.

Die wichtigsten Aktivitätserscheinungen in der Chromosphäre:

In Zeiten hoher Sonnenaktivität ist die Photosphäre sehr turbulent und auch in der Chromosphäre sind interessante Erscheinungen beobachtbar.

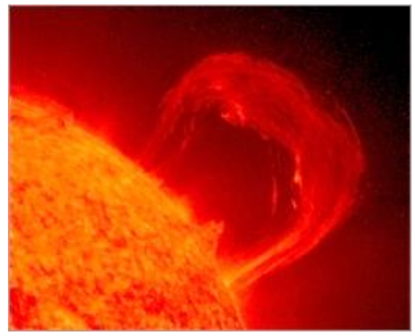
Wo das Magnetfeld der Sonne stark verdichtet ist, also an den Sonnenflecken, treten nicht nur magnetische Feldlinien aus der Photosphäre in die Sonnenatmosphäre aus, sondern häufig auch Materie aus dem Sonneninneren. Die elektrisch geladenen Teilchen des Sonnenplasmas werden durch Lorentzkräfte gezwungen, sich auf Schraubenlinien entlang der magnetischen Feldlinien zu bewegen. Oberhalb der Photosphäre bilden sich leuchtende, an die Feldlinien-Struktur des Magnetfeldes gebundene Materieströme.

Experiment:

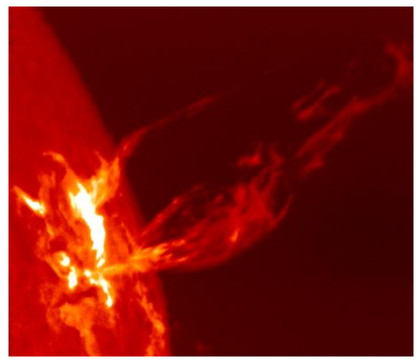
Ablenkung eines Elektronenstrahls im Fadenstrahlrohr mit einem Helmholtz-Spulenpaar auf Spiralbahnen.

Flares sind leuchtende Plasma-Magnetfeldbögen in der Chromosphäre, die mehrere Minuten bis etwa eine Stunde andauern können. Das Bild auf der rechten Seite zeigt ein von der Sonnensonde TRACE aufgenommenes Bild von Sonnenflares.

Protuberanzen sind leuchtende Materieströme, die sich entlang der magnetischen Feldlinien bis weit in die Sonnenkorona hinein ausbilden. Sie erreichen Höhen von bis zu 1 Million km über der Photosphäre.
Wenn sich magnetische Feldlinien sehr stark annähern, kann es zu einem „magnetischen Kurzschluss" kommen. Die Struktur des Magnetfeldes ändert sich abrupt und riesige Energiemengen werden freigesetzt (magnetische Rekonnexion). Häufig wird diese Energie Teilchen der Sonnenmaterie als Bewegungsenergie mitgegeben. Die magnetische Schleife wird mit dem in ihr enthaltenen Material ins Weltall hinauskatapultiert.



Man unterscheidet **ruhende Protuberanzen**, in denen monatelang Sonnenmaterie entlang magnetischer Feldlinien fließt (oberes Bild) und **eruptive Protuberanzen**, bei denen während weniger Minuten bis hin zu Stunden Sonnenmaterie in Form elektrisch geladener Teilchen mit bis zu $1000\ \frac{km}{s}$ in den interplanetaren Raum weggeschleudert wird (unteres Bild).



Den eruptiven Ausstoß von Sonnenmaterie ins Weltall bezeichnet man auch als **Koronalen Massenauswurf** oder kurz **CME** (Coronal Mass Ejection).

Protuberanzen kann man im H-Alpha-Filter als mattrote Erscheinungen am Sonnenrand beobachten. Protuberanzen, die vor der Sonnenoberfläche als dunkle, fadenartige Strukturen sichtbar sind, nennt man auch **Filamente**.

Sonnenwind und Polarlichter

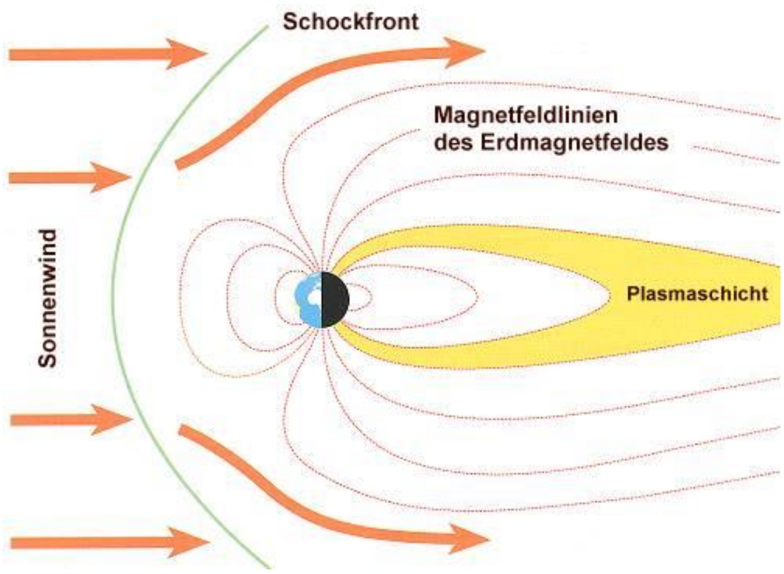
Den von der Sonne ausgehenden Strom elektrisch geladener Teilchen bezeichnet man als **Sonnenwind**. Aufgrund der sehr geringen Teilchendichte des Sonnenwindes liegt die Materie auch hier in Form eines Plasmas vor.

Durch den Sonnenwind verliert die Sonne pro Sekunde etwa 1 Million Tonnen ihrer Masse. Die Teilchen des Sonnenwindes haben Geschwindigkeiten von $400\ \frac{km}{s}$ bis $900\ \frac{km}{s}$. Den Bereich, in dem der Sonnenwind durch Sonden registriert werden kann, bezeichnet man als **Heliosphäre**, die Grenze dieses Bereichs als **Heliopause**. Die Heliopause liegt in einer Entfernung von $100\ AE$ bis $150\ AE$, also weit außerhalb des Planetensystems der Sonne.

In Erdnähe beträgt die Teilchendichte des Sonnenwindes etwa 5 Millionen Teilchen pro m^3.

Auswirkungen des Sonnenwindes auf der Erde:

Das **Magnetfeld der Erde** wirkt als natürlicher Schutzschild gegen den Sonnenwind. Die elektrisch geladenen Teilchen des Sonnenwindes werden auch im Magnetfeld der Erde auf Spiralbahnen entlang der magnetischen Feldlinien gezwungen. Die Bindung des Teilchenstroms an das Magnetfeld führt wegen der hohen Bewegungsenergie der Teilchen zu einer Deformation des Erdmagnetfeldes. Auf der der Sonne zugewandten Seite wird das Erdmagnetfeld gestaucht, auf der gegenüberliegenden Seite vom Sonnenwind mitgezogen (vgl. Abbildung rechts).



Die geladenen Teilchen des Sonnenwindes bewegen sich entlang der magnetischen Feldlinien zu den magnetischen Polen der Erde hin. Dabei dringen sie in die oberste, dünne Schicht der Erdatmosphäre, die Ionosphäre ein, wo sie auf Stickstoff- und Sauerstoffatome treffen und diese anregen. Daraufhin strahlen die Atome farbiges Licht ab:

- rotes Licht: in $200\ km$ Höhe angeregte Sauerstoffatome
- grünes Licht: in $100\ km$ Höhe angeregte Sauerstoffatome
- blau/violettes Licht: angeregte Stickstoffatome

Unzählige gleichzeitig stattfindende Kollisionen von elektrisch geladenen Teilchen des Sonnenwinds mit Gasatomen der Erdatmosphäre führen zu den als **Polarlichtern** bekannten großflächigen Leuchterscheinungen.

In der Nähe der magnetischen Pole der Erde, also z.B. in Skandinavien, Nord-Schottland, Island, Grönland, Kanada und Russland können Polarlichter häufig beobachtet werden.

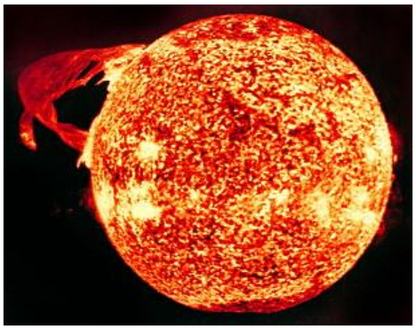
Je höher die Sonnenaktivität und je heftiger folglich der Sonnenwind ist, desto mehr wird das Magnetfeld der Erde zusammengestaucht. Eine starke Stauchung bewirkt, dass die elektrisch geladenen Teilchen den magnetischen Feldlinien folgend bereits weit entfernt von den Magnetpolen der Erde Kontakt zur Erdatmosphäre bekommen. Dann ist auch in Mitteleuropa mit Polarlichtern zu rechnen.

Außer zu Polarlichtern führt der Sonnenwind bei starker Sonnenaktivität zu **Störungen des Funkverkehrs** auf der Erde.

3) Die Erforschung der Sonne mithilfe von Satelliten und Raumsonden

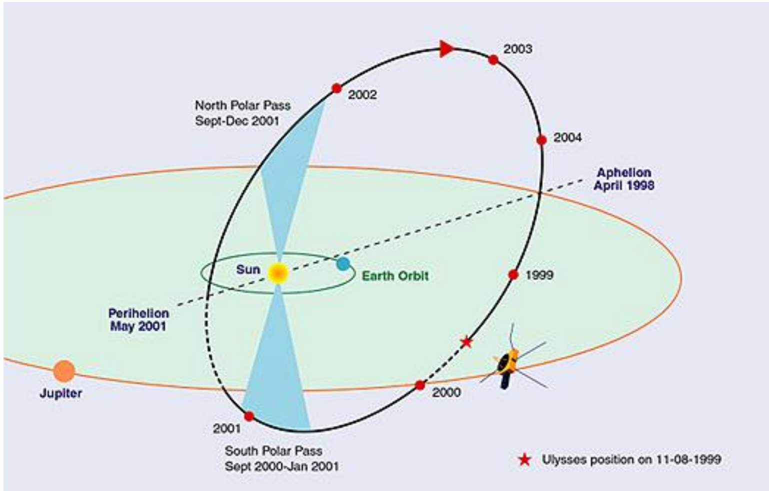
Die hohen Temperaturen und die Intensive Strahlung in der näheren Umgebung der Sonne verhindern die Erforschung der Sonne mithilfe von Orbiter- oder gar Landesonden, wie wir sie bei den Planetensonden kennengelernt haben. Trotzdem spielen Raumsonden und Satelliten eine wichtige Rolle in der Sonnenforschung. Auch hier ist es von Vorteil, außerhalb der Erdatmosphäre in Wellenlängenbereichen, für die die Erdatmosphäre undurchlässig ist, beobachten zu können. In der Sonnenforschung spielen UV- und Röntgenteleskope eine zentrale Rolle.

Erste Beobachtungen der Sonne ohne störende Einflüsse der Erdatmosphäre ermöglichte **1973** und **1974** die amerikanische Raumstation **Skylab**, die unter anderem mit einem Röntgenteleskop ausgestattet war. Die beiden Abbildungen zeigen Skylab und eine Aufnahme von der Sonne im Röntgenlicht, auf der eine riesige Protuberanz zu sehen ist.



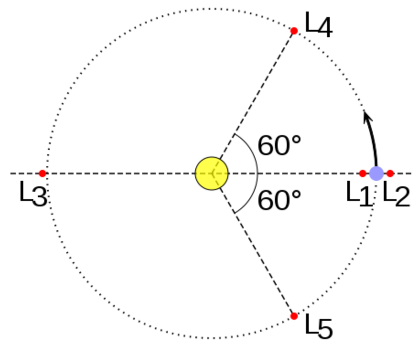
1974 und **1976** schickte man mit den **Helios-Sonden** zum ersten Mal zwei Raumsonden zur Sonne. Es handelte sich bei diesen Missionen um ein deutsch-amerikanisches Gemeinschaftsprojekt. Die Sonden konnten sich der Sonne allerdings nur bis auf 43,5 Millionen km nähern. Dies entspricht etwa der Perihelentfernung des Merkur. Die Sonden untersuchten Teilchen des Sonnenwindes und das interplanetare Magnetfeld. Eine mit den geflogenen Helios-Sonden baugleiche Reservesonde ist im Deutschen Museum in München ausgestellt.

1990 wurde die von NASA und ESA gemeinsam entwickelte Raumsonde **Ulysses**, auf eine polare Umlaufbahn um die Sonne geschickt. Die Sonde überflog 1994 und 1995 bzw. im Jahr 2001 die Pole der Sonne, die aus der Ekliptikebene und damit von der Erde aus nicht sichtbar sind. Die Sonde wurde vom Space Shuttle Discovery ausgesetzt. Der Wechsel von der ursprünglich in der Ekliptikebene liegenden Bahn der Sonde in ihre gegen die Ekliptik stark geneigte polare Umlaufbahn um die Sonne erfolgte mithilfe eines Swing-by-Manövers an Jupiter. In der Abbildung rechts ist die **sonnenpolare Bahn der Sonde Ulysses** in der Zeit von 1999 bis 2004 zusehen.



Das wohl bekannteste Sonnenbeobachtungsobservatorium ist die von ESA und NASA betriebene Sonnensonde **SOHO**. Die **1995** gestartete Sonde befindet sich in einer Umlaufbahn um den **Lagrange-Punkt L1**.

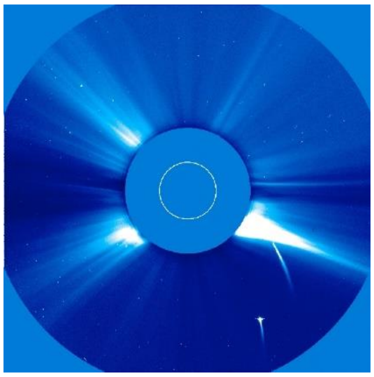
Im Zweikörpersystem Sonne-Erde gibt es fünf sogenannte **Lagrangepunkte**, an denen sich die von Sonne und Erde erzeugten Gravitationskräfte und die auf der Umlaufbahn um die Sonne wirkende Fliehkraft gegenseitig aufheben. Ein Satellit oder eine Sonde bewegt sich an den Lagrange-Punkten in derselben Umlaufzeit wie die Erde um die Sonne. Seine Position zur Erde ändert sich dabei nicht. Der Lagrange-Punkt L1 ist etwa 1,5 Millionen km von der Erde entfernt.

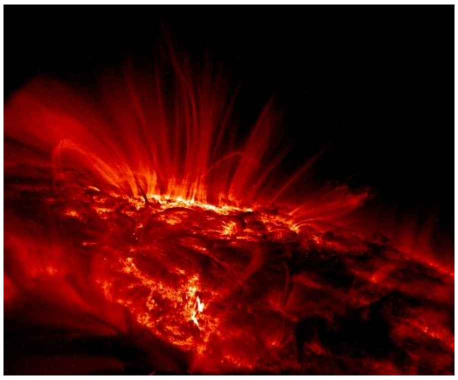


SOHO ist mit insgesamt 12 Messgeräten zur Sonnenbeobachtung ausgestattet. Darunter befinden sich ein UV-Teleskop und ein Sonnenkoronograf, mit dem eine Sonnenfinsternis simuliert und so die Sonnenatmosphäre beobachtet werden kann. Aktuelle und interessante ältere Aufnahmen von SOHO findet man auf der SOHO-Homepage https://sohowww.nascom.nasa.gov/. Auf der Internetseite http://spaceweather.com/ kann man täglich das neueste SOHO-Bild von der Photosphäre betrachten und sehen, ob es Sonnenflecken gibt (vgl. S. 170).

Seit **1998** befindet sich zur Unterstützung von SOHO der NASA-Satellit **TRACE** ebenfalls am Lagrange-Punkt L1. Die TRACE-Mission endete allerdings im Jahr 2010.

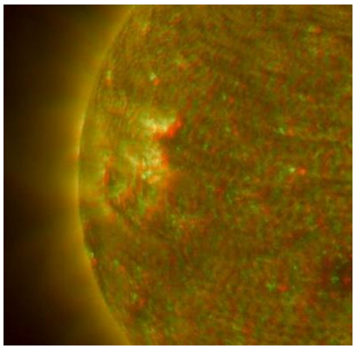
Die folgenden Abbildungen zeigen eine UV-Aufnahme der Sonne von SOHO und eine Aufnahme der Sonnenkorona, die mit dem Sonnenkoronografen von SOHO erstellt wurde. Rechts ist eine Aufnahme von TRACE zu sehen, die die Umgebung eines Sonnenflecks in der Chromosphäre zeigt.





Die NASA-Sonde **Genesis** (**2001**) sammelte vom Lagrange-Punkt L1 aus 2,5 Jahre lang Teilchen des Sonnenwindes und schickte diese 2004 mit einer Kapsel zurück zur Erde.

Die beiden **STEREO**-Sonden, die im Auftrag der NASA **2006** ins Weltall geschickt wurden, befinden sich an den Lagrange-Punkten L4 und L5. Sie lieferten erstmals dreidimensionale Bilder von der Sonne. Ein Forschungsziel von STEREO ist ein besseres Verständnis der Ursachen für koronale Massenauswürfe auf der Sonne. Die dreidimensionale Wirkung des STEREO-Bildes auf der rechten Seite kommt zur Geltung, wenn man es mit einer Rot-Grün-Brille betrachtet.



2010 startete die NASA das **Solar Dynamics Observatorium (SDO)** als Nachfolge-Sonde für SOHO.

Für Mitte des Jahres **2018** ist der Start der NASA-Sonde **Parker Solar Probe** geplant. Mithilfe dieser Sonde versucht man herauszufinden, warum sich die Korona so stark aufheizt und wodurch die Teilchen des Sonnenwindes beschleunigt werden.

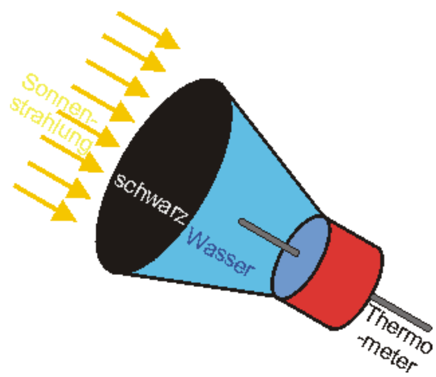
4) Die Leuchtkraft der Sonne

Die von der Sonne abgestrahlte Energie kann nicht durch Wärmeleitung (Konvektion) zur Erde kommen, weil Konvektion auf Teilchenbewegung beruht und damit in dem im Weltraum vorliegenden Vakuum nicht möglich ist. Die Sonnenenergie breitet sich im Weltall durch **Wärmestrahlung** aus.

Als **Solarkonstante S** bezeichnet man den Bruchteil der Strahlungsleistung der Sonne, der im Abstand $1\ AE$ (also auf der Erde) senkrecht auf eine Fläche von $1\ m^2$ trifft.

Modellversuch zur Bestimmung der Solarkonstanten:

Wir bestrahlen die mit Ruß geschwärzte Bodenfläche eines mit Wasser (Zimmertemperatur!) gefüllten Erlenmeyerkolbens 10 Minuten lang mit einem Halogenstrahler. Gemessen wird die Änderung der Wassertemperatur während der Bestrahlungszeit.



Die „Solarkonstante" des Halogenstrahlers berechnet sich wie folgt:

geschwärzte Fläche (Radius $r = 4\ cm$), auf die Wärmestrahlung senkrecht trifft:

$$A = r^2 \cdot \pi = (4\ cm)^2 \cdot \pi \approx 50{,}3\ cm^2 \approx 50{,}3 \cdot 10^{-4}\ m^2$$

Wir gehen beispielsweise von einer Temperaturerhöhung von $\Delta\vartheta = 4{,}5°$ und einem Wasservolumen im Kolben von $31\ ml$ aus:

Berechnung der „Solarkonstante":

Für die auf die geschwärzte Fläche des Erlenmeyerkolbens auftreffende Strahlungsleistung P gilt:

$$P = \frac{\Delta E_i}{\Delta t} = \frac{c_W \cdot m_W \cdot \Delta\vartheta}{\Delta t} \qquad (FS\ 29)$$

Dabei sind ΔE_i die Erhöhung der inneren Energie des Wassers beim Erwärmen, $c_W = 4{,}19\ \frac{J}{g \cdot K}$ die spezifische Wärmekapazität von Wasser, m_W die Masse des Wassers (hier: $m_W = 31\ g$) und Δt die Zeitdauer, während der der Erlenmeyerkolben mit der Halogenlampe bestrahlt wird (hier: $\Delta t = 600\ s$).

$$S = \frac{P}{A} = \frac{\Delta E_i}{\Delta t \cdot A} = \frac{c_W \cdot m_W \cdot \Delta\vartheta}{\Delta t \cdot A} = \frac{4{,}19 \cdot 10^3\ \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 31 \cdot 10^{-3}\ kg \cdot 4{,}5\ K}{600\ s \cdot 50{,}3 \cdot 10^{-4}\ m^2} \approx 193{,}7\ \frac{W}{m^2}$$

Die **Solarkonstante der Sonne** hat einen etwa 7-mal höheren Wert als die in unserem Modellexperiment ermittelte „Solarkontante“:

Solarkonstante: $\boxed{\boldsymbol{S = 1{,}36\ \frac{kW}{m^2}}}$ *(FS 39)*

Interpretation: Auf jeden m^2 der Erdoberfläche trifft von der Sonne eine Strahlungsleistung von 1,36 kW.

Weil die Erdatmosphäre einen Großteil der von der Sonne kommenden Wärmestrahlung absorbiert, muss die Solarkonstante mit Satelliten außerhalb der Erdatmosphäre gemessen werden.

Rechenbeispiel:

Welche Fläche wäre auf der Erde nötig, um mit der (ungedämpft) auftreffenden Sonnenstrahlung eine $60W$-Glühlampe betreiben zu können, wenn die Sonnenstrahlung voll nutzbar wäre?

$$S = \frac{P}{A} \quad \Longrightarrow \quad A = \frac{P}{S} = \frac{60\ W}{1{,}36\ \frac{kW}{m^2}} \approx 441\ cm^2$$

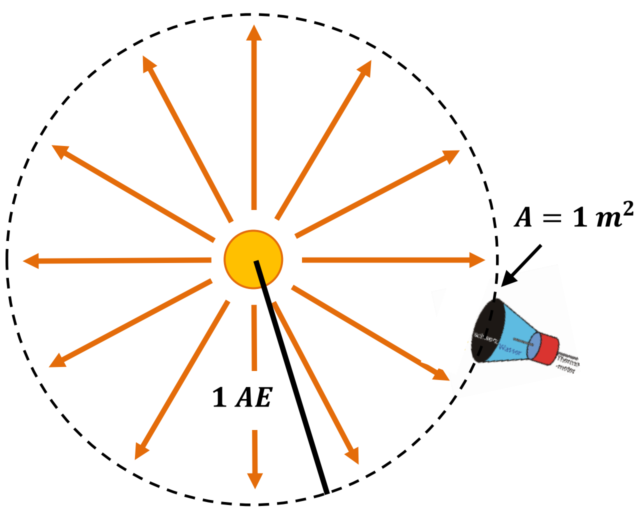
Eine quadratische Fläche mit etwa 21 *cm* Seitenlänge würde also genügen!

Die Leuchtkraft der Sonne:

Die **Gesamtstrahlungsleistung der Sonne** (oder eines beliebigen Sterns) heißt **Leuchtkraft $\boldsymbol{L_\odot}$**.

Die Sonne strahlt gleichmäßig in alle Richtungen.

Die auf der Erde auf die Fläche $1\ m^2$ treffende Strahlungsleistung ist somit der Bruchteil der Gesamtstrahlungsleistung, der dem Anteil von $1\ m^2$ an der Oberfläche einer Kugel mit dem Radius $1\ AE$ entspricht.



Kugeloberfläche:

$$A_{\text{Kugel}} = 4r^2\pi = 4 \cdot (1\ AE)^2 \cdot \pi =$$

$$= 4 \cdot (1{,}496 \cdot 10^{11}\ m)^2 \cdot \pi \approx 2{,}81 \cdot 10^{23}\ m^2$$

Leuchtkraft der Sonne:

$$L_\odot = P_{ges,\odot} = S \cdot A_{\text{Kugel}} = 1{,}36\ \frac{kW}{m^2} \cdot 2{,}81 \cdot 10^{23}\ m^2 \approx 3{,}82 \cdot 10^{26}\ W$$

Je nach momentaner Aktivität der Sonne unterliegt die Leuchtkraft erheblichen Schwankungen. Als Mittelwert gilt aber:

Leuchtkraft der Sonne: $\boxed{\boldsymbol{L_\odot = 3{,}82 \cdot 10^{23}\ kW}}$ (FS 43)

5) Kernfusion, die Energiequelle der Sonne

Die Sonne ist vor ca. 4,5 Milliarden Jahren entstanden. Seither strahlte sie folgende Energie ab:

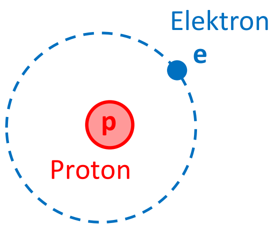
$$\boldsymbol{E} = L_{\odot} \cdot t = 3{,}82 \cdot 10^{26} W \cdot 4{,}5 \cdot 10^{9} \cdot 365{,}25 \cdot 24 \cdot 3600\, s \approx \mathbf{5{,}42 \cdot 10^{43}}\, \boldsymbol{J}$$

Fossile Brennstoffe haben einen Heizwert von höchstens 50 $\frac{MJ}{kg}$ (Heizöl: 41 $\frac{MJ}{kg}$, Steinkohle: 30 $\frac{MJ}{kg}$, Holz: 16 $\frac{MJ}{kg}$). Man müsste also mindestens $\frac{5{,}42 \cdot 10^{43}\, J}{50 \cdot 10^{6} \frac{J}{kg}} \approx 1{,}08 \cdot 10^{36}\, kg$ fossile Brennstoffe verheizen, um die Energie zu erzeugen, die die Sonne seit ihrer Entstehung abgestrahlt hat. $1{,}08 \cdot 10^{36}\, kg$ wären aber mehr als $500\,000$ Sonnenmassen ($m_{\odot} \approx 2{,}0 \cdot 10^{30}\, kg$). Damit scheidet Verbrennung von Sonnenmaterie als Energiequelle aus.

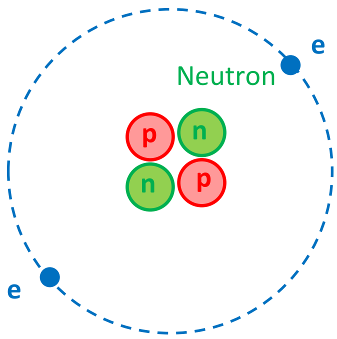
Die **Kernspaltung** wäre eine Energiequelle, die derart große Energien erzeugen könnte. In Kernreaktoren werden schwere Atomkerne (z.B. Uran, Plutonium) durch Neutronenbeschuss gespalten. Dabei wird Energie frei. Die Sonne besteht aber zum größten Teil aus Wasserstoff und Helium, den Elementen mit den leichtesten Kernen. Diese leichten Kerne liefern bei einer Kernspaltung jedoch keine Energie. Einen Wasserstoffkern (1 Proton) kann man nicht spalten und die Spaltung eines Heliumkerns (2 Protonen, 2 Neutronen) erfordert selbst Energie (vgl. Kap. V, S. 238). Deshalb scheidet auch die Kernspaltung als Energiequelle der Sonne aus.

Die Strahlungsenergie wird im Sonnenkern durch **Kernfusion** erzeugt. **Wasserstoffkerne verschmelzen zu Heliumkernen**. Dabei wird Energie frei.

Energieerzeugung durch Kernfusion:



Wasserstoffatom $^{1}_{1}H$



Heliumatom $^{4}_{2}He$

Warum Energie frei wird, wenn 4 Wasserstoffkerne zu 1 Heliumkern verschmelzen, zeigt sich, wenn man die Summe der Massen der beteiligten Kernbausteine mit der Masse eines Heliumkerns vergleicht:

Massen:

Proton m_p	$1{,}67262 \cdot 10^{-27}\ kg$
Neutron m_n	$1{,}67493 \cdot 10^{-27}\ kg$
He-Kern: $\boldsymbol{m_{\mathrm{He}}}$	$\boldsymbol{6{,}64466 \cdot 10^{-27}\ kg}$

$$\boldsymbol{2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n} = 2 \cdot 1{,}67262 \cdot 10^{-27}\ kg + 2 \cdot 1{,}67493 \cdot 10^{-27}\ kg \boldsymbol{= 6{,}6951 \cdot 10^{-27}\ kg}$$

Ergebnis:

Die Summe der einzelnen Bausteine eines Heliumkerns ist schwerer als der Heliumkern.

$$\boldsymbol{\Delta m =} 6{,}6951 \cdot 10^{-27}\ kg - 6{,}64466 \cdot 10^{-27}\ kg \boldsymbol{= 0{,}05044 \cdot 10^{-27}\ kg}$$

Der bei der Fusion von 4 Wasserstoffkernen zu 1 Heliumkern auftretende Massenverlust $\boldsymbol{\Delta m}$ heißt **Massendefekt**. Wegen der Äquivalenz von Masse und Energie, die in der Speziellen Relativitätstheorie von Einstein durch die Formel $E = m \cdot c^2$ beschrieben wird, lässt sich die Massendifferenz Δm dirket in die Energie $E = \Delta m \cdot c^2$ umwandlen. (Vgl. Kap. VIII , S. 404) Diese **Kernbindungsenergie** wird beim Prozess der Kernfusion freigesetzt.

Bei der Fusion zweier H-Kerne zu einem He-Kern freigesetzte Kernbindungsenergie:

$$E = \Delta m \cdot c^2 = 0{,}05044 \cdot 10^{-27}\ kg \cdot \left(3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}\right)^2 \approx 4{,}54 \cdot 10^{-12}\ J \approx 28\ MeV$$

Durch die Abstrahlung von Energie verliert die Sonne also Masse.

Die Sonne verliert pro Sekunde durch Strahlung eine Masse von 4,2 Millionen Tonnen.

Das sind $6{,}0 \cdot 10^{23}$ Tonnen seit der Entstehung der Sonne.

Dieser Massenverlust entspricht über 100 Erdmassen (was groß aussieht), macht aber nur 0,03% der Sonnenmasse aus.

Die Proton-Proton-Reaktion – Kernfusion von Wasserstoff zu Helium:

Es gibt mehrere sogenannte Fusionszyklen für die Verschmelzung von Wasserstoffkernen zu Heliumkernen. Welche Fusionsreaktion in einem Stern die maßgebliche ist, hängt von der Temperatur im Kern des Sterns und damit von der Masse des Sterns ab. Die wichtigste Fusionsreaktion, mit der im Kern der Sonne Energie erzeugt wird, ist die **Proton-Proton-Reaktion** oder kurz **p-p-Reaktion**.

Die p-p-Reaktion läuft in 3 Schritten ab, für die sich Reaktionsgleichungen aufstellen lassen:

$$\boldsymbol{{}^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + {}^0_1e + {}^0_0\nu_e}$$

Deuterium Positron Neutrino

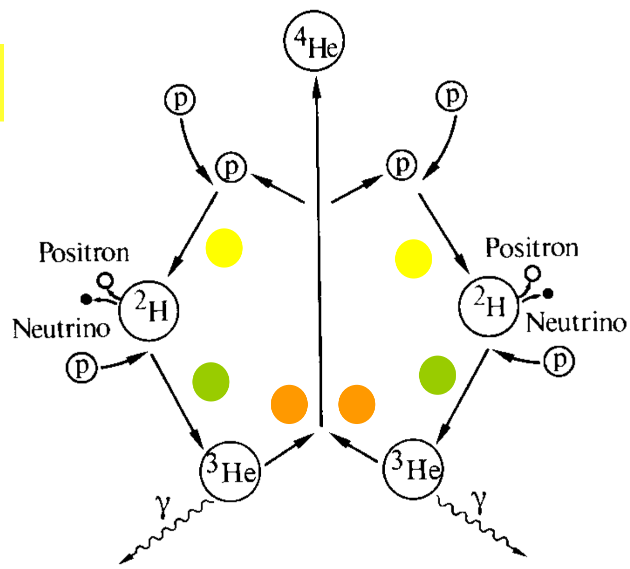
(1 Proton + 1 Neutron)

$$\boldsymbol{{}^2_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^3_2He + \gamma}$$

He (3)-Kern Gammaquant

mit nur 1 Neutron

$$\boldsymbol{{}^3_2He + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + 2\cdot{}^1_1H}$$



$$\boldsymbol{6\cdot{}^1_1H \rightarrow {}^4_2He + 2\cdot{}^1_1H + 2\cdot\gamma + 2\cdot{}^0_1e + 2\cdot{}^0_0\nu_e}$$

Bilanz: **4 ${}^1_1H$-Kerne (Protonen) verschmelzen zu einem ${}^4_2He$-Kern.**

Bei der p-p-Reaktion freiwerdende Fusionsenergie:

Summe der Ausgangsmassen: $4\cdot m_p = 4\cdot 1{,}67262\cdot 10^{-27}\,kg = 6{,}69048\cdot 10^{-27}\,kg$

Endmasse: $m({}^4_2He) = 6{,}64466\cdot 10^{-27}\,kg$

Massendefekt: $\Delta m = 4\cdot m_p - m({}^4_2He) = 4{,}582\cdot 10^{-29}\,kg$

Reaktionsenergie:

$$\boldsymbol{E} = \Delta m\cdot c^2 = 4{,}582\cdot 10^{-29}\,kg\cdot\left(3{,}0\cdot 10^8\,\frac{m}{s}\right)^2 = 4{,}1238\cdot 10^{-12}\,J \approx \boldsymbol{25{,}8\,MeV}$$

Diese Energie steckt in der Bewegungsenergie der Reaktionsprodukte (Protonen, $He4$-Kerne, Neutrinos) und in der emittierten Gammastrahlung.

Die Sonne fusioniert in ihrem Kern pro Sekunde etwa 600 Millionen Tonnen Wasserstoff zu etwa 595 Millionen Tonnen Helium. Sie erzeugt also jede Sekunde eine Fusionsenergie von etwa

$$E = \Delta m\cdot c^2 = 5\cdot 10^3\,kg\cdot\left(3{,}0\cdot 10^8\,\frac{m}{s}\right)^2 = 450\cdot 10^{18}\,J = 450\cdot 10^{12}\,MJ$$

bzw. eine Leistung von $P = 450\cdot 10^{12}\,MW$.

- Das Kernkraftwerk Gundremmingen erzeugt eine elektrische Leistung von $2688\ MW$.
  Somit ist die Strahlungsleistung der Sonne etwa 167 Milliarden-mal größer als die Leistung des leistungsstärksten deutschen Kernkraftwerks.

Die bei der Kernfusion in der Sonne erzeugten **Neutrinos** sind fast masselose Elementarteilchen, die in großer Zahl von der Sonne zur Erde gelangen. Sie sind schwer nachweisbar, weil sie die Erde in der Regel unbemerkt durchdringen. In den letzten Jahren entwickelte sich die Neutrinoforschung zu einem wichtigen Forschungsgebiet in der Astronomie. Die Nobelpreise der Jahre 2002 und 2015 gingen beide an Neutrinoforscher. Zum Nachweis von Sonnenneutrinos: vgl. Kap. IX, S. 480.

Bedingungen für die Kernfusion:

Damit zwei Wasserstoffkerne (positiv geladene Protonen) verschmelzen können, müssen sie ihre gegenseitige elektrische Abstoßung überwinden und sich bis auf Kernabstand (Kernradius $\approx 3 \cdot 10^{-15}\ m$) annähern. Erst dann werden die sehr starken, aber extrem kurzreichweitigen Kernkräfte wirksam, die zum Verschmelzen der Protonen führen (vgl. starke Wechselwirkung, Kap. IX, S. 487).

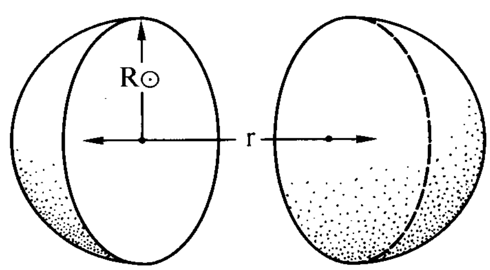
Um ihre elektrische Abstoßung überwinden zu können, müssen die Protonen eine hohe Bewegungsenergie haben. Diese Bewegungsenergie haben sie bei hohen Temperaturen (Wärmebewegung).

Trotz der Temperatur von etwa 15 Millionen K im Sonnenkern reicht die Bewegungsenregie der Protonen rechnerisch nicht aus, um die elektrische Abstoßung zu überwinden. Erst der quantenmechanische **Tunneleffekt** macht die Verschmelzung von Protonen bereits bei den im Sonnenkern herrschenden Temperaturen möglich.
Unter Berücksichtigung des Tunneleffekts ist für das Einsetzen der Kernfusion von Wasserstoff zu Helium eine Temperatur von mindestens 5 Millionen K nötig.

Diese hohe Temperatur stellt das Hauptproblem bei den Bemühungen, die Kernfusion auf der Erde als Energiequelle zu nutzen, dar.

Temperatur und Druck im Sonneninneren:

Im Sonnenkern bewirken ungeheure Gravitationskräfte einen Druck von bis zu $2 \cdot 10^{11}\ bar$. Das ist das $2 \cdot 10^{11}$-fache des Luftdrucks auf der Erde.



Um zu verstehen, wie dieser unglaublich große Druck zustande kommt, denken wir uns die Sonne in zwei Kugelhälften geteilt. Aufgrund ihrer gewaltigen Massen werden die Sonnenhälften durch sehr große Gravitationskräfte an den Schnittflächen zusammengepresst.

Der **Sonnenkern** ist gasförmig und besteht hauptsächlich aus **Wasserstoff-Plasma** (freie Protonen und Elektronen).

Der Radius eines Wasserstoffatoms kommt dadurch zustande, dass das Elektron auf einer Kugelschale um das Proton (Atomkern) läuft. Ein Wasserstoffatom hat einen Radius von etwa $5 \cdot 10^{-11}\ m$. Das Proton hat hingegen einen Radius von nur etwa $1{,}4 \cdot 10^{-15}\ m$. Die Ausdehnung der freien Elektronen ist so gering, dass sie gegenüber der Größe der Protonen vernachlässigt werden kann.

Demnach führt die Ionisierung der Wasserstoffatome im Sonnenplasma zu einer starken Reduzierung der Ausdehnung der Gasteilchen etwa um den Faktor $30\,000$. Das **Plasma im Sonnenkern** ist somit ein **sehr stark komprimierbares Gas**. Das heißt, dass bei sehr großem Druck p das Gasvolumen V extrem klein wird.

Näherungsweise erfüllt das Sonnenplasma das **Gesetz von Boyle und Mariotte:**

$$\boldsymbol{p \cdot V = konst.}$$

Damit darf das Sonnenplasma näherungsweise als **ideales Gas** betrachtet werden.

Für ideale Gase gilt aber das **Gesetz von Gay-Lussac:**

$$\boldsymbol{T \sim p}$$

Die hohe **Temperatur von $\boldsymbol{15 \cdot 10^6\ K}$ im Sonnenkern** ist somit eine Folge des hohen Drucks, der im Kern der Sonne aufgrund der Eigengravitation der Sonne herrscht.

- Der englische Physiker ***James Jeans*** (1877- 1946) berechnete, dass ein stecknadelkopfgroßes Stück Materie dieser Temperatur noch in $150\ km$ Entfernung jedes Leben auslöschen würde.

6) Die Oberflächentemperatur der Sonne

Da man an der Sonne selbst keine Messungen durchführen kann, werden Informationen über die Eigenschaften der Sonne, insbesondere ihre Temperatur, aus der Strahlung der Sonne gewonnen.

Schwarze Strahler und Strahlungsgesetze:

Das **Absorptionsvermögen $\boldsymbol{\alpha}$** eines Körpers gibt an, wie groß der Anteil der vom Körper aufgenommenen Strahlungsenergie an der eingestrahlten Energie ist:

Absorptionsvermögen: $$\boldsymbol{\alpha = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{eingestrahlte Energie}}}$$

Das Absorptionsvermögen eines Körpers hängt unter anderem von dessen **Oberflächenbeschaffenheit** ab:

<u>Beispiele für Oberflächen mit zunehmendem Absorptionsvermögen</u> sind:

versilberte Oberfläche $\rightarrow$ weiße Oberfläche $\rightarrow$ glatte schwarze Oberfläche $\rightarrow$ raue schwarze Oberfläche

Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz:

Je höher das Absorptionsvermögen eines Körpers ist, desto mehr Energie strahlt er auch selbst ab.

Das Gesetz geht auf Gustav **Robert Kirchhoff *(1824 – 1887)*** zurück, der zusammen mit Robert Bunsen erkannte, dass sich die chemische Zusammensetzung der Sonnenatmosphäre aus den Absorptionslinien im Sonnenspektrum bestimmen lässt.

<u>Anwendungsbeispiel aus dem Alltag</u>:

Schwarzer Asphalt wird bei starker Sonneneinstrahlung heiß (starke Absorption).
Bei Kälte bildet sich auf schwarzem Asphalt leicht Reifglätte (starke Abstrahlung).

Ein (theoretischer) Körper, der die gesamte eingestrahlte Energie absorbiert, heißt **Schwarzer Körper**.

Für **Schwarze Körper** gilt: $\boldsymbol{\alpha = 1}$

Ein schwarzer Körper absorbiert also die eingestrahlte Energie vollständig.

Nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz absorbiert ein Schwarzer Körper nicht nur maximal, sondern strahlt auch mit größtmöglicher Leistung. Deshalb heißt ein Körper mit dem Absorptionsvermögen $\boldsymbol{\alpha = 1}$ auch **Schwarzer Strahler**.

Bedeutung Schwarzer Strahler für die Astronomie:

Die Sonne und allgemein Sterne werden näherungsweise wie Schwarze Strahler behandelt.

Die Temperaturabhängigkeit der Strahlungsleistung:

Gesetz von Stefan und Boltzmann: $\boldsymbol{P = \sigma \cdot A \cdot T^4}$

(FS 14)

Dabei ist $\boldsymbol{\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \, \frac{W}{m^2 \cdot K^4}}$ die **Stefan-Boltzmann-Konstante.** *(FS 39)*

P ist die Strahlungsleistung des Schwarzen Strahlers.

A ist die Oberfläche des Schwarzen Strahlers.

T ist die absolute Temperatur des Schwarzen Strahlers in Kelvin ($0°C = 273{,}16\,K$)

Nach dem Gesetz von Stefan und Boltzmann hängt die Strahlungsleistung eines Schwarzen Strahlers stark von dessen Temperatur ab.

Das Gesetz ist nach den beiden Physikern ***Josef Stefan (1837 - 1893)*** und ***Ludwig Boltzmann (1844 – 1906)*** benannt.

Rechenbeispiel:

Ein Körper der Oberfläche $1\,m^2$ besitzt die Temperatur $500°C$. Er strahlt in der Minute eine Energie von $250\,kJ$ ab. Zeige, dass es sich um keinen Schwarzen Körper handeln kann!

Für einen Schwarzen Körper würde nach Stefan und Boltzmann gelten:

$$E = \sigma \cdot A \cdot T^4 \cdot t = 5{,}6704 \cdot 10^{-8} \, \frac{J/_s}{m^2 \cdot K^4} \cdot (773{,}16\,K)^4 \cdot 1\,m^2 \cdot 60\,s \approx 1215\,kJ$$

Diese Energie, die ein schwarzer Körper mit der Temperatur $500°C$ und der Oberfläche $1\,m^2$ in einer Minute abstrahlen würde, liegt weit über der tatsächlich abgestrahlten Energie von $250\,kJ$. Deshalb kann es sich bei dem Körper nicht um einen schwarzen Körper handeln.

Die Wellenlängenabhängigkeit der Strahlungsleistung:

Strahlung ist die Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle. Beispiele für Strahlung sind sichtbares Licht, aber auch UV-Strahlung, Röntgenstrahlung, Infrarotstrahlung (= Wärmestrahlung) oder radioaktive Strahlung. Um welche Art von Strahlung es sich handelt bzw. welche Farbe sichtbares Licht hat, hängt von der Wellenlänge λ der elektromagnetischen Welle ab. (Vgl. Kap. II, S. 33)

Die Strahlungsleistung eines Schwarzen Strahlers hängt (außer von seiner Temperatur) auch von der Wellenlänge λ der ausgesandten Strahlung ab:

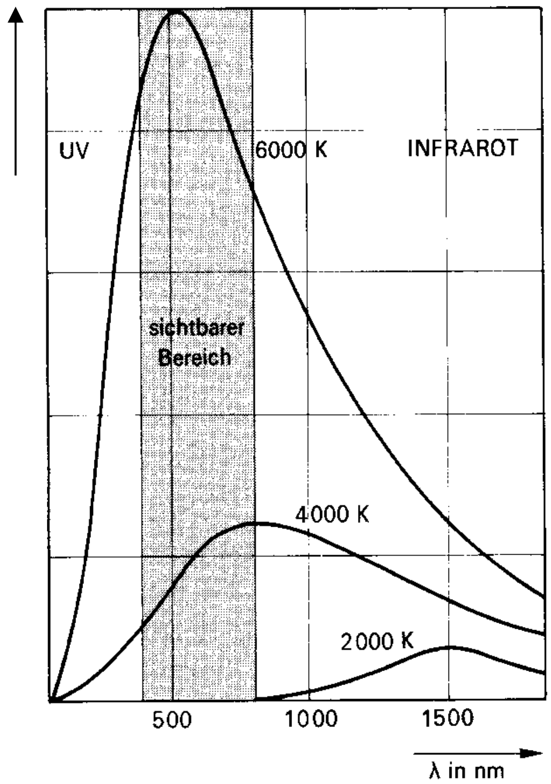
Das Wiensche Verschiebungsgesetz:

Ein Schwarzer Körper strahlt mit maximaler Leistung bei einer bestimmten Wellenlänge λ_{max}.

Mit wachsender Temperatur T verschiebt sich λ_{max} zu kleineren Wellenlängen hin.

(Vgl. Diagramm auf der rechten Seite!)

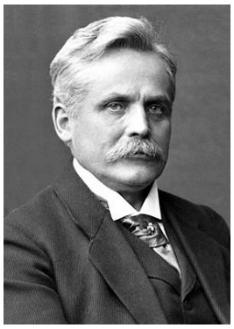
relative Intensität der Strahlungsleistung:



Zusammenhang zwischen λ_{max} und T:

$$\boxed{\lambda_{max} \cdot T = b} \qquad (FS\ 14)$$

Dabei ist $b = 2,8978 \cdot 10^{-3}\ m \cdot K$ die **Wiensche Verschiebungskonstante** ***(FS 39)***



Das Wiensche Verschiebungsgesetz wurde nach dem Physiker ***Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864 – 1928)*** benannt.

<u>Anwendungsbeispiel aus dem Alltag</u>:

Eine Flamme ändert mit der Temperatur ihre Farbe: Eine rote Flamme ist weniger heiß. Wenn die Flamme heißer wird, verändert sich ihre Farbe von rot über orange und gelb zu weiß-bläulich. Die den Farben entsprechenden Wellenlängen nehmen in dieser Reihenfolge ab.

Rechenbeispiel:

Eine schwarze Holzkugel von $1\ m$ Durchmesser und sehr rauer Oberfläche besitzt eine Temperatur von $100\ °C$, eine dunkle, grobe Eisenkugel von nur $10\ cm$ Durchmesser ist auf $1000°C$ erhitzt.

- Berechne die Wellenlängen, bei denen die beiden Körper optimal strahlen.

Man geht bei beiden Körpern näherungsweise von Schwarzen Strahlern aus, wendet also das **Wiensche Verschiebungsgesetz** an:

Holzkugel: $$\lambda_{max} = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}\ m \cdot K}{373{,}16\ K} \approx 7{,}77 \cdot 10^{-6}\ m \ \ \text{(Infrarotbereich)}$$

Eisenkugel: $$\lambda_{max} = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}\ m \cdot K}{1273{,}16\ K} \approx 2{,}35 \cdot 10^{-6}\ m \ \ \text{(Infrarotbereich)}$$

- Vergleiche die Strahlungsleistungen der beiden Kugeln!

Die Strahlungsleistungen liefert das **Gesetz von Stefan und Boltzmann**:

Holzkugel: $$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 4\pi \cdot (0{,}5\ m)^2 \cdot (373{,}16\ K)^4 \approx 3{,}45 \cdot 10^3\ W$$

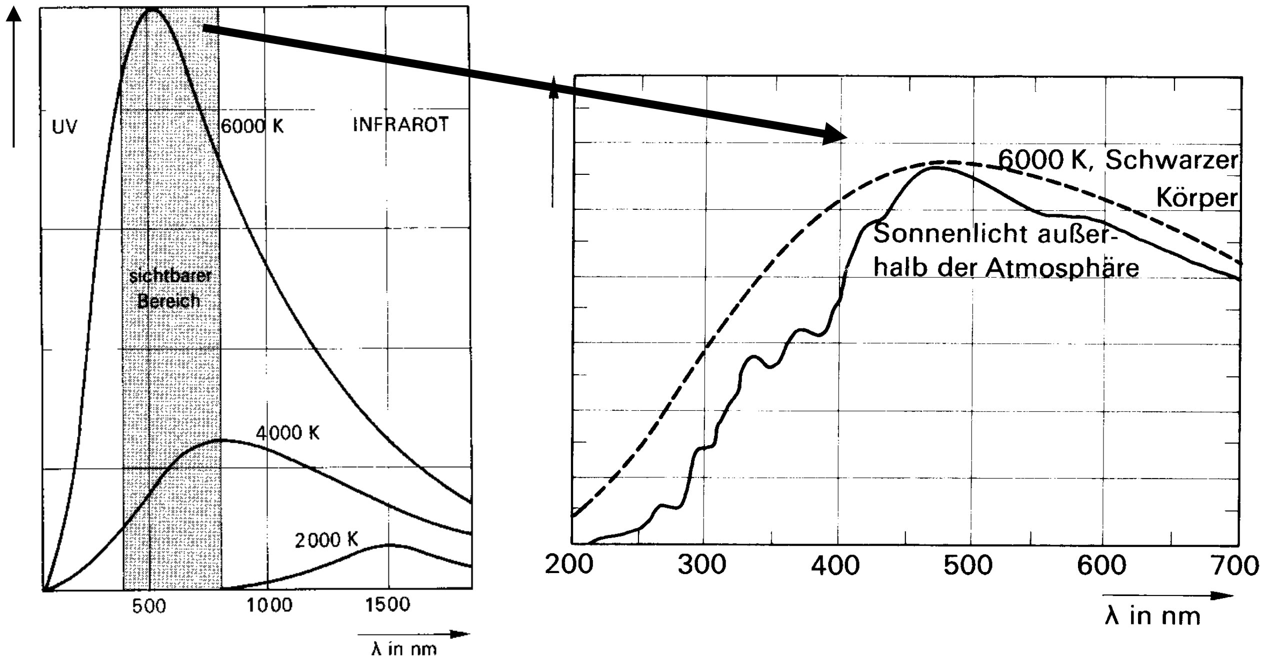
Eisenkugel: $$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 4\pi \cdot (0{,}05\ m)^2 \cdot (1273\ K)^4 \approx 4{,}67 \cdot 10^3\ W$$

Die höhere Temperatur bewirkt also bei der viel kleineren Eisenkugel (die kleiner Kugel passt 1000-mal in die größere Kugel!) eine höhere Strahlungsleistung. Der Grund ist, dass die Temperatur T im Gesetz von Stefan und Boltzmann in der vierten Potenz auftritt.

Die Oberflächentemperatur der Sonne:

Die von der Sonne emittierte Strahlung entsteht in der Photosphäre. Somit liefert die Strahlung Informationen über die Oberflächentemperatur der Sonne.

relative Intensität der Strahlungsintensität:



Die durchgezogene Kurve in der rechten Graphik zeigt die Belichtungsstärkeverteilung auf einem Film, mit dem außerhalb der Erdatmosphäre das Sonnenspektrum aufgenommen wurde.

Ergebnis:

In einem großen Wellenlängenbereich (Mikrowellenbereich bis UV-Bereich) ähnelt die Wellenlängenabhängigkeit der Strahlungsintensität der Sonne stark der eines Schwarzen Strahlers mit einer Temperatur von etwa $6000\ K$.

Da die **Sonnenstrahlung also in guter Näherung eine Schwarzkörperstrahlung** ist, kann man die Oberflächentemperatur der Sonne sowohl mit dem Gesetz von Stefan und Boltzmann als auch mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz berechnen:

Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$L_\odot = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{T} = \sqrt[4]{\frac{L_\odot}{\sigma \cdot A}} = \sqrt[4]{\frac{L_\odot}{\sigma \cdot 4\pi \cdot (R_\odot)^2}} = \sqrt[4]{\frac{3{,}82 \cdot 10^{26}\ W}{5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 4\pi \cdot (6{,}96 \cdot 10^8\ m)^2}}$$

$$\approx \mathbf{5800}\ \boldsymbol{K}$$

Die mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz berechnete Oberflächentemperatur heißt **effektive Temperatur**.

Wiensches Verschiebungsgesetz:

Die auf S. 188 abgebildete, experimentell gewonnene Graphik zeigt: Die Strahlungsintensität der Sonne ist maximal für Strahlung der Wellenlänge $\lambda_{max} = 475\ nm$ (sichtbares, grünes Licht).

Mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz $\lambda_{max} \cdot T = 2{,}898 \cdot 10^{-3}\ m \cdot K$ folgt:

$$T = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}\ m \cdot K}{475 \cdot 10^{-9}\ m} \approx 6100\ K$$

Die mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz berechnete Oberflächentemperatur heißt **Farbtemperatur**.

➢ Die beiden Strahlungsgesetze liefern also ähnliche Wert für die Oberflächentemperatur der Sonne.

Die Oberflächentemperatur von Planeten:

Die der Sonne zugewandte Seite eines Planeten reflektiert einen Teil der von der Sonne kommenden Strahlung sofort. Den Rest der auftreffenden Strahlung absorbiert die der Sonne zugewandte Seite des Planeten. Dadurch erwärmt sich der Planet und strahlt in alle Richtungen Strahlungsleistung ab.

Die **Albedo** eines Planeten gibt an, welcher Anteil der auftreffenden Strahlungsleistung an der Planetenoberfläche reflektiert wird. Dieser Anteil trägt <u>nicht</u> zur Erwärmung des Planeten bei.

$$\boxed{\textbf{Albedo} = \frac{\textbf{reflektierte Strahlungsleistung}}{\textbf{auftreffende Strahlungsleistung}}}$$

<u>Beispiele</u> für Albedos von Planeten, Mond, Asteroiden und Kometenkernen:

Merkur: 0,06 Venus: 0,77 Erde: 0,367 Mars: 0,15 Jupiter: 0,52 Saturn: 0,47

Uranus: 0,51 Neptun: 0,41

Erdmond: 0,12 Asteroid Pallas: 0,16 Kern des Kometen Tschurjumow-Gerassimenko: 0,05

Für Himmelskörper ohne Atmosphäre (z.B.: Monde, Merkur) stellt sich ein **Strahlungsgleichgewicht** ein:

$$\boxed{\begin{array}{ccc} \textbf{aufgenommene Strahlungsleistung} & = & \textbf{abgestrahlte Strahlungsleistung} \\ \boldsymbol{P}_{\textbf{auf}} & = & \boldsymbol{P}_{\textbf{ab}} \end{array}}$$

aufgenommene Strahlungsleistung:

Der Planet nimmt nicht mit seiner ganzen Oberfläche Strahlung auf, sondern nur mit seiner der Sonne zugewandten Seite. Von der der Sonne zugewandten Halbkugel nimmt wiederum der Bereich, auf den die Sonnenstrahlung senkrecht einfällt, am meisten Strahlungsleistung auf, die anderen Bereiche weniger.

Näherungsweise nimmt man als Fläche, die Strahlung aufnimmt, eine Kreisfläche mit dem Radius R_P des Planeten (**„Planetenscheibe“**).

Auf die Planetenscheibe trifft der Bruchteil der Gesamt-Strahlungsleistung der Sonne (Leuchtkraft $L_\odot$), der dem Bruchteil

$$\frac{\text{Fläche der Planetenscheibe}}{\text{Kugelfläche mit dem mittleren Radius der Planetenbahn als Radius}} = \frac{\pi \cdot {R_P}^2}{4\pi \cdot {r_P}^2}$$

entspricht.

Von der Albedo des Planeten hängt es ab, wie viel von der auftreffenden Strahlungsleistung der Planet absorbiert.

absorbierte Strahlungsleistung:

$$P_{\text{auf}} = (1 - \text{Albedo}) \cdot L_\odot \cdot \frac{\pi \cdot {R_P}^2}{4\pi \cdot {r_P}^2}$$

abgestrahlte Strahlungsleistung:

Der Planet strahlt die absorbierte Strahlungsleistung nach allen Richtungen in den Weltraum ab. Wir betrachten den Planeten als **Schwarzen Strahler** und wenden das **Gesetz von Stefan und Boltzmann** an:

$$P_{\text{ab}} = \sigma \cdot 4\pi \cdot {R_P}^2 \cdot T^4$$

Mit der Annahme des **Strahlungsgleichgewichts $\boldsymbol{P_{\text{auf}} = P_{\text{ab}}}$** folgt:

$$(1 - \text{Albedo}) \cdot L_\odot \cdot \frac{{R_P}^2}{4\pi \cdot {r_P}^2} = \sigma \cdot 4\pi \cdot {R_P}^2 \cdot T^4$$

$\Longrightarrow$ **Oberflächentemperatur eines Planeten:**

$$\boxed{\boldsymbol{T = \sqrt[4]{\frac{(1 - \text{Albedo}) \cdot L_\odot}{16 \cdot \pi \cdot {r_P}^2 \cdot \sigma}}}}$$

<u>Hinweis</u>:

Übersichtlicher ist es, zuerst P_{auf} zu berechnen, und dann T mit $T^4 = \dfrac{P_{\text{auf}}}{\sigma \cdot 4\pi \cdot {R_P}^2}$.

Dazu muss allerdings der Radius bzw. die Oberfläche des Planeten oder des Himmelskörpers bekannt sein.

- Lerne auf keinen Fall die oben angegebene Formel für T auswendig, sondern mache dir klar, wie sie hergleitet wird!

Rechenbeispiel: Die Oberflächentemperatur des Planeten Neptun

Der mittlere Abstand des Planeten Neptun von der Sonne ist $r_P = 30{,}06\ AE$. Neptun hat die Albedo 0,41.

Der mittlere Radius von Neptun ist $R_P = 24{,}6 \cdot 10^3\ km$.

$$\boldsymbol{P}_{\mathbf{auf}} = (1 - \text{Albedo}) \cdot L_\odot \cdot \frac{{R_P}^2}{4\pi \cdot {r_P}^2} = (1 - 0{,}41) \cdot 3{,}82 \cdot 10^{26}\ W \cdot \frac{(24{,}6 \cdot 10^6\ m)^2}{4\pi \cdot (30{,}06 \cdot 1{,}496 \cdot 10^{11}\ m)^2}$$

$$\approx \mathbf{5{,}367 \cdot 10^{14}}\ \boldsymbol{W}$$

Strahlungsgleichgewicht und Gesetz von Stefan und Boltzmann:

$$T^4 = \frac{P_{\text{auf}}}{\sigma \cdot 4\pi \cdot {R_P}^2} = \frac{5{,}367 \cdot 10^{14}\ W}{5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 4\pi \cdot (24{,}6 \cdot 10^6\ m)^2} \approx 1{,}245 \cdot 10^6\ K^4$$

$$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{T} \approx \sqrt[4]{1{,}245 \cdot 10^6}\ K \approx \mathbf{33{,}4}\ \boldsymbol{K} \approx \mathbf{-239{,}8°}\boldsymbol{C}$$

Tatsächlich liegt die Oberflächentemperatur des Neptun bei $72\ K$ bzw. bei $-201°C$.

Als Gründe für die Abweichung vom berechneten Wert werden diskutiert:

- Der Planet erzeugt durch radioaktive Prozesse in seinem Kern selbst Energie.
- Es wird nach wie vor Wärme abgestrahlt, die bei der Entstehung des Planeten durch einfallende Materie erzeugt wurde.

Bei Planeten mit Atmosphäre (z.B. Venus, Erde) verhindert die Atmosphäre, dass alle abgestrahlte Strahlungsleistung in den Weltraum abgegeben wird: $P_{\text{auf}} > P_{\text{ab}}$

Dies führt zu einer langfristigen Erwärmung des Planeten (**Treibhauseffekt**).

Aufgaben zu Kapitel IV Die Sonne:

Aufgabe 1: Granulation und Sonnenflecken (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2008)

Beobachtet man die Sonne durch einen geeigneten Filter, so erkennt man, dass sie nicht gleichmäßig hell ist.

1) Beschreibe die Granulation und erläutere ihr Zustandekommen anhand des Aufbaus der Sonne.

Eine sehr auffällige Erscheinung der Sonnenoberfläche sind Sonnenflecken, die eine Temperatur von etwa $4{,}0 \cdot 10^3\ K$ besitzen. Zurzeit sind aber nur sehr selten größere Flecken auf der Sonne zu finden.

2) Erkläre dies anhand der durch langjährige Beobachtungen festgestellten Gesetzmäßigkeit über die Häufigkeit von Sonnenflecken.

3) Erläutere eine Besonderheit der Sonnenrotation, die man durch Beobachtung der Sonnenflecken entdeckt hat.

Lösung:

zu 1) Die Granulation ist eine wabenartige Struktur auf der Sonnenoberfläche (Photosphäre). Im Inneren der Granulen steigt heißt Sonnenmaterie aus dem Sonneninneren auf, zwischen den Granulen sinkt sie wieder ab. Die aufsteigende Materie stammt aus der Konvektionszone (ab 85% des Sonnenradius nach außen). „Wärmequelle" ist die Kernfusion (H → He) im Sonnenkern (bis 20% des Sonnenradius). Die im Kern erzeugte Wärme wird in der Strahlungszone (bis 85% des Sonnenradius) durch Strahlung zur Konvektionszone nach außen transportiert.

zu 2) Sonnenflecken entstehen meist in größerer Entfernung vom Sonnenäquator und wandern dann zum Äquator hin, wobei sich um vorhandene Sonnenflecken Sonnenfleckengruppen ausbilden. Etwa 11 Jahre nach der Entstehung der ersten Sonnenflecken verschwinden die Flecken wieder. Dieser Vorgang wiederholt sich periodisch ca. alle 11 Jahre. (Vgl. Schmetterlingsdiagramm!)

zu 3) Die Rotationsgeschwindigkeit der Sonne kann durch Beobachtung des Weiterwanderns gleicher Sonnenflecken während mehrerer Tage gemessen werden. Dabei fällt auf, dass die Sonne im Bereich des Äquators schneller ($T \approx 25\ d$) rotiert als in polnahen Breiten ($T \approx 37\ d$). (differenzielle Sonnenrotation).

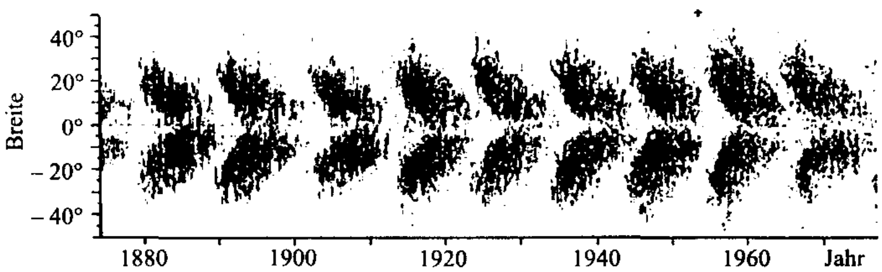
<u>Aufgabe 2</u>: Rotationsdauer der Sonne und Sonnenflecken (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2000)

Entsprechend der geografischen Breite auf der Erde definiert man für die Sonne die heliografische Breite als Winkelabstand vom Äquator in Richtung Pol. Zu bestimmten Zeiten lässt sich die synodische Rotationsdauer der Sonne für bestimmte heliografische Breiten durch visuelle Beobachtung der Sonne besonders gut ermitteln.

1) Nenne dieses Verfahren und erläutere, warum hier zwischen der synodischen und der siderischen Rotationsdauer der Sonne unterschieden werden muss.

2) Für eine bestimmte heliografische Breite beobachtet man eine synodische Rotationsdauer von 27,2 Tagen. Berechne die dazu gehörige siderische Rotationsdauer der Sonne.
Hinweis: Die Orientierung der Sonnenrotation und des Erdumlaufs um die Sonne sind gleich.

3) Im unten angegebenen Diagramm ist die heliografische Breite sehr vieler beobachteter Sonnenflecken gegen die Zeit angetragen. Erläutere kurz drei Gesetzmäßigkeiten für Sonnenflecken, die man diesem Diagramm entnehmen kann.



<u>Lösung</u>:

zu 1) In Zeiten größerer Sonnenaktivität beobachtet man auf der Sonnenoberfläche Sonnenflecken. Über mehrere Tage hinweg kann man sehen, wie sich ein Sonnenfleck oder eine ganze Sonnenfleckengruppe scheinbar über die Sonnenscheibe bewegt. Tatsächlich wandern die Sonnenflecken in dieser relativ kurzen Zeit nicht so schnell weiter. Ihre rasche Bewegung liegt an der Eigenrotation der Sonne. Aus der scheinbaren Geschwindigkeit der Bewegung der Sonnenflecken kann man die Rotationsdauer der Sonne bestimmen. Weil die Erde während einer Eigenrotation der Sonne auf ihrer Bahn um die Sonne weiterwandert, muss man allerdings zwischen der tatsächlichen oder siderischen Rotationsdauer der Sonne und der von der Erde aus gemessenen synodischen Rotationsdauer unterscheiden.

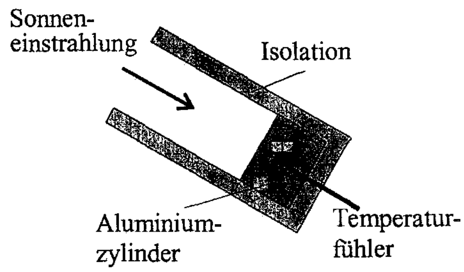
zu 2)

$$\frac{1}{T_{sid}} = \frac{1}{T_E} + \frac{1}{T_{syn}} = \frac{1}{365\ d} + \frac{1}{27{,}2\ d} \approx 3{,}95 \cdot 10^{-2}\ \frac{1}{d} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{T_{sid} \approx 25{,}3\ d}$$

zu 3) Vgl. S. 170

Aufgabe 3: Bestimmung der Solarkonstante (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2002)

Für die Abschätzung der Solarkonstanten wird ein geschwärzter Aluminiumzylinder (Masse $100\ g$, Querschnittsfläche $25\ cm$, spezifische Wärmekapazität $c_{Cu} = 0{,}896\ \frac{J}{g \cdot K}$ durch die einfallende Sonnenstrahlung erwärmt (siehe nebenstehende Abbildung).



1) Bei einer Sonnenhöhe von 30° über dem Horizont wurde innerhalb von 10 Minuten eine Temperaturerhöhung von $10{,}6\ K$ gemessen. Berechne daraus einen Wert für die Solarkonstante.

2) Die Messung wurde bei einem wesentlich höheren Sonnenstand wiederholt. Begründe, warum sich dabei ein größerer Wert für die Solarkonstante ergibt.

Lösung:

zu 1)
$$\boldsymbol{S} = \frac{P}{A} = \frac{\Delta E_i}{\Delta t \cdot A} = \frac{c_{Cu} \cdot m \cdot \Delta\vartheta}{\Delta t \cdot A} = \frac{0{,}896 \cdot 10^3\ \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 100 \cdot 10^{-3}\ kg \cdot 10{,}6\ K}{600\ s \cdot 25 \cdot 10^{-4}\ m^2} \approx \boldsymbol{6{,}3 \cdot 10^2\ \frac{W}{m^2}}$$

zu 2) Die von der Sonne kommende Strahlung wird durch die Erdatmosphäre teilweise absorbiert. Bei höherem Sonnenstand ist der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre kürzer. Dadurch entstehen weniger Verluste.

Aufgabe 4: Schwarzer Strahler

Eine schwarze Stahlkugel mit $20\ cm$ Durchmesser und einer sehr rauen Oberfläche strahlt am stärksten bei einer Frequenz f_{max} von $3{,}42 \cdot 10^{13}\ Hz$.

1) Welche Temperatur in K und $°C$ besitzt die Stahlkugel?

2) Welche Energie strahlt die Kugel pro Minute ab?

3) Welche Energie erreicht pro Sekunde eine Fläche von $1\ cm^2$, die $2\ m$ vom Mittelpunkt der schwarzen Kugel entfernt und senkrecht zur ankommenden Strahlung ausgerichtet ist?

Lösung:

zu 1) Wiensches Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{max} \cdot T = \frac{c}{f_{max}} \cdot T = b$$

$$\Rightarrow\ \boldsymbol{T} = \frac{b \cdot f_{max}}{c} = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}\ m \cdot K \cdot 3{,}42 \cdot 10^{13}\ \frac{1}{s}}{3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}} \approx \boldsymbol{330\ K \approx 57°C}$$

zu 2) Gesetz von Stefan und Boltzmann:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

$$\Rightarrow\ \boldsymbol{E} = P \cdot \Delta t = \sigma \cdot 4\pi r^2 \cdot T^4 \cdot \Delta t = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 4\pi \cdot (0{,}10\ m)^2 \cdot (330\ K)^4 \cdot 60\ s \approx \boldsymbol{51\ kJ}$$

zu 3) Strahlungsintensität S (Wir verwenden hier den Buchstaben S statt E, um Verwechslungen mit der Energie E zu vermeiden):

$$\boldsymbol{S} = \frac{P}{A} = \frac{E}{\Delta t \cdot 4\pi r^2} = \frac{51 \cdot 10^3\ J}{60\ s \cdot 4\pi (200\ cm)^2} \approx \boldsymbol{1{,}68 \cdot 10^{-4}\ \frac{J}{cm^2}}$$

Aufgabe 5: Sonnenfinsternis (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 1999)

Sonnenfinsternis

Am 11. August 1999 ereignete sich eine in Deutschland beobachtbare Sonnenfinsternis.

1) Fertige eine Skizze an, mit der prinzipiell die Positionen der beteiligten Gestirne und die Bereiche des Halb- bzw. Kernschattens bei einer Sonnenfinsternis erklärt werden.
Begründe damit, wie die drei wesentlich verschiedenen Erscheinungsformen von Sonnenfinsternissen zustande kommen.

2) Für einen Beobachter in Stuttgart kamen die Mittelpunkte von Sonne und Mond am 11. August auf seiner Sehlinie zu liegen. Zu diesem Zeitpunkt war der Mond $3{,}73 \cdot 10^5\ km$ vom Beobachter entfernt; die Distanz des Beobachters zur Sonne betrug $1{,}52 \cdot 10^8\ km$. Vergleiche die jeweiligen Sehwinkel und prüfe, welche Art Sonnenfinsternis für diesen Beobachter eintritt.

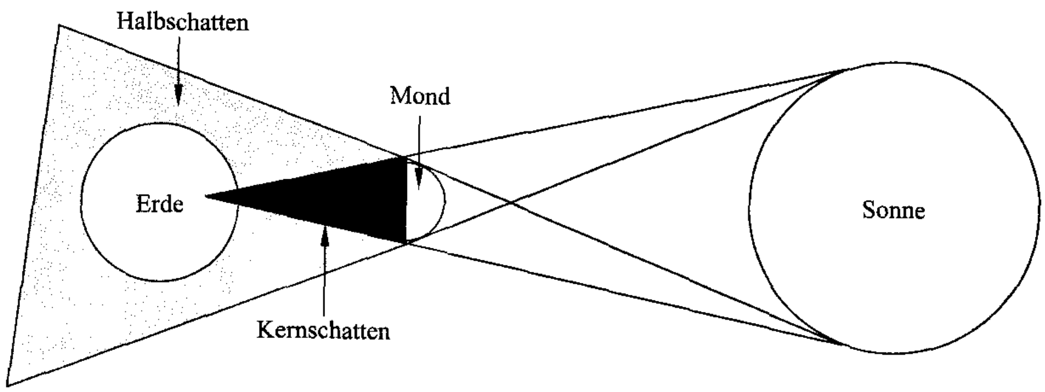
3) Für einen Beobachter an einem festen Ort auf der Erde findet eine totale Sonnenfinsternis wesentlich seltener statt als eine totale Mondfinsternis. Worauf ist dies zurückzuführen?

Bei einer totalen Sonnenfinsternis lässt sich die Korona gut beobachten. Die Korona ist eine sehr heiße und weit ausgedehnte Gashülle von extrem geringer Dichte um die Sonne. Sie reicht mindestens eine Million Kilometer über die sichtbare Sonnenoberfläche hinaus. Von diesem Be reich der Korona geht Röntgenstrahlung aus, deren spektrales Intensitätsmaximum bei der Wellenlänge $1{,}5\ nm$ liegt.

4) Welche Temperatur hätte ein Schwarzer Körper, dessen spektrales Intensitätsmaximum bei dieser Wellenlänge liegt?

Lösung:

zu 1)



Es gibt drei Erscheinungsformen einer Sonnenfinsternis:

- totale Sonnenfinsternis: Der Beobachter befindet sich im Kernschatten, der scheinbare Monddurchmesser ist größer als der von der Sonne.
- de partielle Finsternis: Der Beobachter befindet sich im Halbschatten.
- ringförmige Finsternis: Der Beobachter befindet sich im Kernschatten, aber der scheinbare Monddurchmesser ist kleiner als der der Sonne.

zu 2)

Für den Winkel α, unter dem ein Beobachter von der Erde aus die Sonne bzw. den Mond sieht, gilt:

$$\frac{D}{2\pi r} = \frac{\alpha}{360°}$$

Dabei sind D der tatsächliche Durchmesser von Sonne bzw. Mond und r deren Abstand zur Erde.

Es folgt für den Mond:

$$\alpha_M = \frac{2 \cdot R_M}{2\pi r_M} \cdot 360° = \frac{1737\ km}{\pi \cdot 3{,}73 \cdot 10^5\ km} \cdot 360° \approx 0{,}534°$$

Für die Sonne folgt:

$$\alpha_\odot = \frac{2 \cdot R_\odot}{2\pi r_\odot} \cdot 360° = \frac{6{,}96 \cdot 10^5\ km}{\pi \cdot 1{,}52 \cdot 10^8\ km} \cdot 360° \approx 0{,}525°$$

Wegen $\alpha_M > \alpha_\odot$ handelt es sich um eine totale Sonnenfinsternis.

zu 3)

Der Durchmesser des Kernschattens des Mondes auf der Erde bei einer Sonnenfinsternis beträgt nur etwa $100\ km$. Nur Beobachter. Über die der Kernschatten hinwegzieht, können eine totale Sonnenfinsternis beobachten. Eine Mondfinsternis kann dagegen von der gesamten Halbkugel der Erde aus beobachtet werden, die dem Mond zugewandt ist.

zu 4) Wiensches Verschiebungsgesetz:

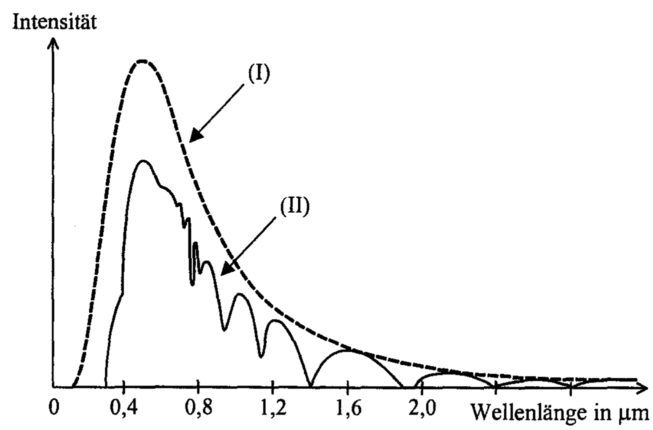
$$\lambda_{max} \cdot T = b \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{T} = \frac{b}{\lambda_{max}} = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}\ m \cdot K}{1{,}5 \cdot 10^{-9}\ m} \approx \boldsymbol{1{,}9 \cdot 10^6\ K}$$

zu 5)

Der Durchmesser des Kernschattens des Mondes auf der Erde bei einer Sonnenfinsternis beträgt nur etwa $100\ km$. Nur Beobachter. Über die der Kernschatten hinwegzieht, können eine totale Sonnenfinsternis beobachten. Eine Mondfinsternis kann dagegen von der gesamten Halbkugel der Erde aus beobachtet werden, die dem Mond zugewandt ist.

Aufgabe 6: Oberflächentemperatur der Sonne

Die Abbildung zeigt die spektrale Intensitätsverteilung eines schwarzen Strahlers von Sonnengröße bei Sonnentemperatur (I) und der Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche (II).



1) Skizziere in ein Diagramm die spektrale Verteilung der Strahlungsleistung von drei gleichen schwarzen Strahlern mit unterschiedlichen Temperaturen.
2) Berechne mit Hilfe des Graphen (I) näherungsweise die Oberflächentemperatur der Sonne.
3) Erläutere die wesentlichen Unterschiede der Spektren (I) und (II).

Lösung:

zu 1) Vgl. S. 186

zu 2)

$$\lambda_{max} \approx 500\,nm \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{T} = \frac{b}{\lambda_{max}} = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}\,m \cdot K}{500 \cdot 10^{-9}\,m} \approx \boldsymbol{6 \cdot 10^3\,K}$$

zu 3) Bei II ist die Intensität generell geringer auf Grund der Absorption und Streuung in der Erdatmosphäre. Bei einzelnen Wellenlängen ist die Intensität auf Grund von Resonanzabsorption der Strahlung durch bestimmte Atome oder Moleküle in der Erdatmosphäre deutlich reduziert.

Aufgabe 7: Oberflächentemperatur des Jupiter

a) Welche Strahlungsleistung nimmt Jupiter von der Sonne auf, wenn 45% der eintreffenden Strahlung schon an der äußeren Jupiteratmosphäre reflektiert werden?
Entnimm die benötigten Jupiter-Daten der Formelsammlung!

b) Welche Oberflächentemperatur ergäbe sich daraus für Jupiter, wenn man Jupiter näherungsweise als Schwarzen Strahler betrachtet und von einem Strahlungsgleichgewicht zwischen aufgenommener und abgestrahlter Leistung ausgeht?

Lösung:

zu 1)

$$\boldsymbol{P_{\mathrm{auf}}} = (1 - \mathrm{Albedo}) \cdot L_{\odot} \cdot \frac{{R_J}^2}{4 \cdot {r_J}^2} = (1 - 0{,}45) \cdot 3{,}82 \cdot 10^{26}\,W \cdot \frac{(69{,}9 \cdot 10^6\,m)^2}{4 \cdot (5{,}20 \cdot 1{,}496 \cdot 10^{11}\,m)^2}$$

$$\approx \boldsymbol{4{,}24 \cdot 10^{17}\,W}$$

(Zu Herleitung und verwendeten Näherungen: vgl. S. 189f)

zu 2)

$$P_{\mathrm{auf}} = P_{\mathrm{ab}} = \sigma \cdot 4\pi \cdot {R_J}^2 \cdot T^4 \quad \Rightarrow$$

$$T^4 = \frac{P_{\mathrm{auf}}}{\sigma \cdot 4\pi \cdot {R_J}^2} = \frac{4{,}24 \cdot 10^{17}\,W}{5{,}67 \cdot 10^{-8}\,\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 4\pi \cdot (69{,}9 \cdot 10^6\,m)^2} \approx 1{,}22 \cdot 10^8\,K^4$$

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{T} \approx \sqrt[4]{1{,}22 \cdot 10^8}\,K \approx \boldsymbol{105\,K \approx -168°C}$$

Aufgabe 8: **Pluto und sein Mond Charon (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2017):**

Beim Vorbeiflug der NASA-Sonde „New Horizons“ an Pluto befanden sich Pluto und New Horizons in einer Erdentfernung von $32\ AE$. Um die gewonnenen Daten von Pluto zur Erde zu senden, verwendete New Horizons einen Sender mit einer Sendeleistung von $12\ W$.

1) Bestimme die Bestrahlungsstärke durch das Signal bei der Ankunft auf der Erde, wenn es gleichmäßig in den Raum abgestrahlt wurde. Gib eine Möglichkeit an, bei gleicher Sendeleistung ein stärkeres Signal zu erhalten.

Die Abbildung zeigt Pluto (rechts) und seinen Mond Charon (links) in einer zusammengesetzten Aufnahme der „New Horizons“-Sonde. Die Größen- und Helligkeitsverhältnisse sind richtig dargestellt, der Abstand zwischen den Himmelskörpern jedoch nicht.

2) Die Oberflächentemperaturen von Pluto und Charon unterscheiden sich deutlich. Vergleiche das Reflexionsvermögen der beiden Himmelskörper anhand der Abbildung. Entscheide, welcher von beiden die kleinere Oberflächentemperatur hat, und begründe deine Entscheidung. Gehe dazu davon aus, dass die beiden Himmelskörper mit ihrer gesamten Oberfläche gleichmäßig abstrahlen und sich im Strahlungsgleichgewicht befinden.

Lösung:

zu 1)

$$\boldsymbol{E} = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{12\ W}{4\pi(32 \cdot 1{,}496 \cdot 10^{11}\ m)^2} \approx \mathbf{4{,}17 \cdot 10^{-26}}\ \boldsymbol{\frac{W}{m^2}}$$

Mithilfe eines großflächigen Parabolspiegels, der die Strahlung in dem Punkt, an dem der Empfänger sich befindet, bündelt, kann man das schwache Signal verstärken.

zu 2)

$$P_{\text{auf}} = P_{\text{ab}} \quad \Longrightarrow \quad (1-\text{Albedo}) \cdot L_\odot \cdot \frac{{R_P}^2}{4 \cdot r^2} = \sigma \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot T^4 \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{T} = \sqrt[4]{\frac{(\mathbf{1}-\mathbf{Albedo}) \cdot \boldsymbol{L_\odot}}{\mathbf{16} \cdot \boldsymbol{\pi} \cdot \boldsymbol{r}^{\mathbf{2}} \cdot \boldsymbol{\sigma}}}$$

(Zu Herleitung und verwendeten Näherungen: vgl. S. 189f)

$r_{Pluto} \approx r_{Charon}$; $A_{Pluto} > A_{Charon}$ (Pluto reflektiert deutlich mehr Licht als Charon)

$\Longrightarrow \quad T_{Charon} > T_{Pluto}$

Quellen und weiterführende Literatur:

Astronomie und Raumfahrt, Erhard Friedrich Verlag:

Die Sonne:
Heft 4/2004: Die Ermittlung der Größe von Sonnenflecken (S. 28 bis 31)
Heft 1/2000: Didaktik der Sonnenatmosphäre (S. 18 bis 21)
Heft 1/1999: Die heißen äußeren Schichten der Sonne (S. 13 bis 15)
Heft 6/2007: Chromosphären, Koronen, Magnetfelder, Sternwinde (S. 28 bis 32)
Heft 6/2009: Der Aktivitätszyklus der Sonne (S. 28 bis 31)
Heft 1/2004: Unsere Sonne – ein aktiver Stern (S. 31 bis 36)
Heft 3_4/2007: Die Rotationsdauer der Sonne (S. 61 bis 62)
Heft 6/2007: Ein Stern als Dynamo (Sonnenmagnetfeld) (S. 15 bis 18)
Heft 3/2001: Magnetfelder der Sonne (S. 16 bis 19)
Heft 6/2007: Die Solarkonstante (S. 11 bis 14)
Heft 5/2000: Bestimmung der Solarkonstanten (S. 29 bis 32)
Heft 6/2016: Ein Demonstrationsversuch zur Bestimmung eingestrahlter Sonnenenergie (S. 34 bis 38)
Heft 3_4/2009: Die Leuchtkraftzunahme der Sonne in elementarer Darstellung (S. 56 bis 60)
Heft 5/2002: Das Weltraumwetter und seine Auswirkungen (S. 15 bis 18)
Heft 6/2009: Gefahr der Sonne (Weltraumwetter) (S. 9 bis 16)
Heft 6/2009: Sonnenstürme und Weltraumwetter (S. 24 bis 27)
Heft 2/2001: Wie lange strahlt die Sonne noch? (S. 15 bis 18)

Sonnenfinsternis und Planetentransits:
Heft 1/1999: Totale Sonnenfinsternis am 11. August 1999 (S. 20 bis 29)
Heft 2/2012: Venusdurchgänge und eine Maßabstimmung (S. 7 bis 8)
Heft 2/2008: Das Projekt „Venustransit 2004“ (S. 23 bis 27)

Methoden der Sonnenbeobachtung und -forschung:
Heft 1/2000: Helioseismologie – ein neues Fenster der Sonnenforschung (S. 4 bis 7)
Heft 1/1999: Ein Blick in das Innere der Sonne (S. 8 bis 12)
Heft 1/2004: Elemente der modernen Sonnenforschung (S. 10 bis 15)
Heft 2/2002: Was uns das Radiospektrum der Sonne verrät (S. 4 bis 7)
Heft 1/1997: Erste Entdeckungen von SOHO (S. 4 bis 6)
Heft 6/2009: Sonnenforschung mit SOHO (S. 4 bis 7)
Heft 2/2010: Die NASA-Stereo-Mission (S. 20 bis 22)
Heft 3_4/2014: Sonnenfotografie – Techniken und Möglichkeiten auch für die Schule (S. 66 bis 70)

Kosmos Himmelsjahr:

Kosmos Himmelsjahr 2014: Die stürmische Sonne (S. 170 bis 175)
Kosmos Himmelsjahr 2010: Das heiße Herz der Sonne (S. 153 bis 161)

Bild der Wissenschaft:

Heft 7/2013 Sonne (S. 42 bis 61)

Sky and Telescope:

February 2001: Today‘s science of the sun (S. 34 – 39)

February 2001: Solareclipse Sience (S. 40 – 47)

Filme:

Lucy Jago u.a.: Die Planeten – Im Mittelpunkt die Sonne, BBC

Themen für Seminararbeiten:

- **Beobachtung und physikalische Beschreibung von Phänomenen in Photosphäre und Korona der Sonne**

→ Sonnenflecken

- **Energetische Aspekte der Sonne (Kernfusion, Energietransport, Leuchtkraft, Bestrahlungsstärke)**

→ Die Solarkonstante und Methoden zur experimentellen Bestimmung

- **Sonnenbeobachtung mit terrestrischen Teleskopen, Weltraumteleskopen und Sonden)**

→ Die Sonnensonde SOHO

- **Spektroskopie des Sonnenlichts**

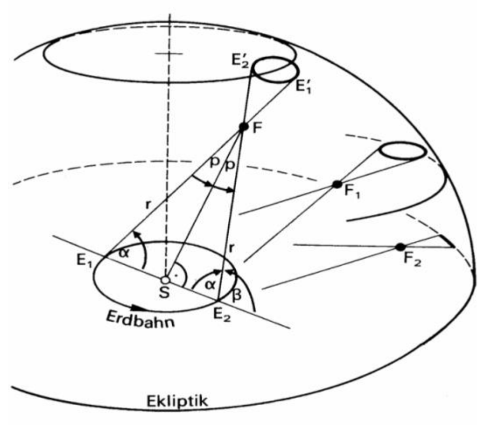
→ Die Fraunhoferlinien im Sonnenspektrum

V. Die Sterne

1) Die Fixsternparallaxe:

Entfernungsbestimmung mit der Fixsternparallaxe:

Während die Erde um die Sonne läuft, ändert sich im Lauf eines Jahres die Blickrichtung zu einem nahen Fixstern geringfügig. Der Stern scheint sich deshalb vor dem Hintergrund der weiter entfernten Fixsterne auf einer Ellipsenbahn zu bewegen.



Dieses Phänomen bezeichnet man als „**Fixsternparallaxe**“.

Je weiter der beobachtete Stern entfernt ist, desto kleiner ist die scheinbare Ellipsenbahn.

Die Hälfte des Winkels, unter dem die scheinbare Ellipsenbahn des Sterns von der Erde aus gesehen wird, heißt **Parallaxenwinkel p** (vgl. Abbildung).

Der Parallaxenwinkel p ist ein Maß für die Entfernung des Sterns:

1 Parsec, ist die Entfernung eines Sterns, bei der der halbe Öffnungswinkel p der Ellipse gerade $1''$ (eine Winkelsekunde) ist. Der Winkel **p** heißt **Parallaxenwinkel**.

Weil Parallaxenwinkel von Sternen sehr klein sind, gilt mit der **Kleinwinkelnäherung $\sin p \approx p$**

$$r = \frac{1\,AE}{\sin p} \approx \frac{1\,AE}{p} \qquad (p \text{ ist der Parallaxenwinkel im Bogenmaß}).$$

$$\Rightarrow \boxed{\mathbf{1\,pc} = \frac{1\,AE}{1''} = \frac{1\,AE}{\frac{\pi}{180\cdot 3600}} \approx \mathbf{2{,}06\cdot 10^5\,AE \approx 3{,}09\cdot 10^{16}\,m \approx 3{,}26\,Lj}} \qquad (FS41)$$

Zur Umrechnung vom Gradmaß ins Bogenmaß:

$$360° \;\hat{=}\; 2\pi$$

$$1° \;\hat{=}\; \frac{2\pi}{360} = \frac{\pi}{180}$$

$$1'' = \frac{1°}{3600} \;\hat{=}\; \frac{\pi}{180\cdot 3600}$$

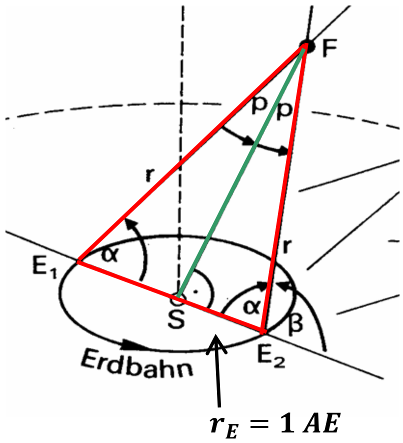
Beachte:

In der Astrophysik ist es üblich, für die im Gradmaß gemessene Winkeleinheit $1'' = 1°/3600$ die Bezeichnung **Bogensekunde** zu verwenden. Eine Bogensekunde ist also ein Winkel im Gradmaß!

Experiment:

Peile bei ausgestrecktem Arm über den Daumen einen festen Punkt an. Wenn du mit dem Kopf wackelst, scheint sich die Position deines Daumens vor dem Hintergrund zu verschieben. Die scheinbare Verschiebung fällt umso größer aus, je näher der angepeilte Punkt ist.

Berechnung der Entfernung des Sterns:



Die Verbindungsstrecke $[SF]$ (Sonne-Fixstern) teilt das gleichschenklige ΔE_1E_2F in zwei rechtwinklige Dreiecke ΔE_1SF und ΔSE_2F.

In diesen beiden Teildreiecken gilt:

$$\sin p = \frac{r_E}{r} \quad \Longrightarrow \quad r = \frac{r_E}{\sin p} = \frac{1\ AE}{\sin p}$$

Dabei sind r_E der Erdbahnradius und r die gesuchte Entfernung des Sterns.

Mit der Parsec-Definition $1\ pc = \frac{1\ AE}{1''}$ folgt für die

Entfernung eines Sterns in der Einheit Parsec: $$\boxed{\boldsymbol{r = \frac{1''}{p}\,pc}} \qquad (FS\ 14)$$

<u>Rechenbeispiel</u>**:**

Welche jährliche trigonometrische Parallaxe hat der 36 Lj entfernte Stern Castor im Sternbild Zwillinge?

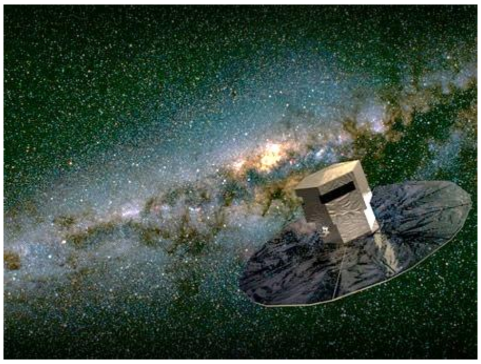
$$p = \frac{1\ AE}{r} = \frac{1\ AE}{36\ Lj} = \frac{1\ AE}{36\ \cdot 6{,}3240 \cdot 10^4\ AE} \approx 4{,}3924 \cdot 10^{-7} \quad (\text{Bogenmaß})$$

$$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{p} \approx 4{,}3924 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{180 \cdot 3600}{\pi}\right)'' \approx \mathbf{0{,}091''} \quad (\text{Gradmaß})$$

Castor scheint also im Lauf eines Jahres eine kleine Ellipsenbahn zu beschreiben, die von der Erde aus unter einem Öffnungswinkel von $2 \cdot p \approx 0{,}18$ Bogensekunden erscheint.

Der europäische **Satellit Hipparcos** (<u>Hi</u>gh <u>P</u>recision <u>Par</u>allax <u>Co</u>llecting <u>S</u>atellite) bestimmte von 1989 bis 1993 mithilfe der Methode der Fixsternparallaxe die Entfernungen von etwa 118 000 Sternen. Der Satellit konnte Parallaxenwinkel auf 0,001 Bogensekunden genau messen.

Seit 2013 umläuft der ESA-Satellit **GAIA** am Lagrange-Punkt L2 (vgl. Kap. IV, S. 175) zusammen mit der Erde die Sonne. Der Satellit misst von etwa 1 Milliarde Sterne in der Milchstraße mit einer bisher unerreichten Genauigkeit Entfernung, Eigenbewegung und Radialgeschwindigkeit relativ zur Erde. Die GAIA-Mission soll einen Beitrag zur Erforschung von Ursprung und Entwicklung der Milchstraße zu leisten.



Bei **erdgebundenen Teleskopen** geht man davon aus, dass Winkel bestenfalls bis auf 0,01“ genau aufgelöst werden können. Daraus ergibt sich für erdgebundene Teleskope als **Obergrenze für Entfernungen, die mithilfe der Fixsternparallaxe gemessen werden können**:

$$r_{max} = \frac{1''}{0{,}01''}\ pc = 100\ pc \approx 330\ Lj$$

GAIA kann Parallaxenwinkel auf bis zu $20 \cdot 10^{-6}$ Bogensekunden genau messen. Damit ist die momentan **größte aus der Fixsternparallaxe messbare Entfernung** festgelegt:

$$r_{max} = \frac{1''}{(20 \cdot 10^{-6})''}\ pc = 50 \cdot 10^{3}\ pc \approx 163\ 000\ Lj$$

2) Leuchtkraft und Helligkeit eines Sterns

Leuchtkraft und Strahlungsintensität eines Sterns:

Wie bei der Sonne wird die Gesamtstrahlungsleistung eines Sterns als **Leuchtkraft $\boldsymbol{L}$** bezeichnet.

Die Leuchtkraft eines Sterns wird häufig als Vielfaches der Leuchtkraft $L_{\odot}$ der Sonne angegeben.

$$\boxed{\boldsymbol{L^* = \frac{L}{L_{\odot}}}}$$ heißt **relative Leuchtkraft**.

<u>Beispiele</u>:

α-Centauri: $L = 1{,}32 \cdot L_{\odot} \implies L^* = 1{,}32$

Sirius: $L^* = 20{,}9$, Atair: $L^* = 8{,}3$, 61 Cygni: $L^* = 0{,}096$, Beteigeuze: $L^* = 10\ 000$ (!)

> Die **Strahlungsintensität E** eines Sterns ist die Strahlungsleistung P, die pro m^2 beim Beobachter ankommt.

Die Strahlungsintensität auf der Erde erhalten wir, wenn wir uns um den Stern eine **Kugel** denken, deren Radius die Entfernung r zum Stern ist. Weil der Stern gleichmäßig in alle Richtungen strahlt, verteilt sich seine Gesamtstrahlungsleistung L gleichmäßig auf die Fläche $A_K = 4\pi r^2$ dieser Kugel.

Für die **Strahlungsintensität E** folgt:

$$\boxed{\boldsymbol{E} = \frac{L}{A_K} = \boldsymbol{\frac{L}{4\pi r^2}}} \qquad (FS\ 14)$$

- Die Strahlungsintensität der Sonne ist die **Solarkonstante**! (Vgl. Kap. IV, S 177)

Beachte:

In der Formelsammlung wird die Strahlungsleistung eines Sterns mit dem Buchstaben Φ bezeichnet.

Scheinbare und absolute Helligkeit:

Die scheinbare Helligkeit m:

Der griechischen Astronomen **Hipparchos von Nicaea** (etwa 190 – 125 v. Chr.) ordnete die mit bloßem Auge sichtbaren Sterne in **6 „Größenklassen"**:

Sterne der Größe 1 erscheinen sehr hell, Sterne mit der Größe 6 sind bei guten Bedingungen mit bloßem Auge gerade noch sichtbar.
Mit bloßem Auge nicht sichtbare Sterne aber auch Sonne, Mond und Planeten wurden nicht berücksichtigt.

Die vom Beobachter auf der Erde wahrgenommene oder gemessene Helligkeit eines Himmelskörpers heißt **scheinbare Helligkeit m**.

In Anlehnung an die Größenklassen von Hipparch werden für die scheinbare Helligkeit auch die Bezeichnungen **„Größe"** oder **„Magnitudo"** verwendet.

Beachte:

- Die **scheinbare Helligkeit m** eines Sterns wird durch Zahlenwerte beschrieben, die **mit abnehmender Helligkeit größer** werden.
- Wir verwenden scheinbare (und absolute) Helligkeit als einheitenlose Größe. In der Literatur stößt man aber immer wieder auf die **Einheit mag** (von „Magnitudo") für Helligkeiten.

Die heute den Sternen zugeordneten Helligkeiten m sind in Anlehnung an das antike System von ***Norman Robert Pogson*** 1857 festgelegte Werte. Sie entsprechen im Wesentlichen den Größenklassen des Hipparchos. Die Größenklassenskala von Hipparchos wurde allerdings nach oben und nach unten so erweitert, dass die scheinbaren Helligkeiten aller Himmelsobjekte durch Zahlenwerte beschrieben werden können; auch Helligkeiten von Objekten, deren scheinbare Helligkeit so gering ist, dass sie nur im Teleskop gesehen werden können und Helligkeiten von Objekten wie die Sonne oder Planeten, die heller erscheinen als die hellsten Sterne.

Kosmische Objekte wie Galaxien sind in der Regel nur im Teleskop sichtbar und haben entsprechend große Werte für die scheinbare Helligkeit.

Umgekehrt bedeutet ein Wert für die scheinbare Helligkeit eines Objekts, der kleiner als 1 oder gar negativ ist, dass das Objekt heller ist als die hellsten sichtbaren Sterne.

Beispiele: Spica (hellster Stern im Sternbild Jungfrau): $m = 1$
Kugelsternhaufen M13 im Herkules: $m = 6$
Neptun: $m_{max} = 7{,}8$
Sombrero-Galaxie: $m = 9$
Sonne: $m = -26{,}8$

Die absolute Helligkeit M:

Die **absolute Helligkeit M ist die scheinbare Helligkeit, die ein Stern hätte, wenn er sich in der Entfernung $10\ pc$ befände**.

3) Entfernungsbestimmung durch Vergleich von scheinbarer und absoluter Helligkeit:

Die Entfernung eines Sterns:

Grundsätzlich gilt:

Je weiter ein Stern entfernt ist, desto weniger hell erscheint er uns bei gleicher wahrer Helligkeit.

Mit den Größen „scheinbare Helligkeit m “ und „absolute Helligkeit M“ folgt die **qualitative Aussage**:

Je stärker sich die scheinbare Helligkeit m von der absoluten Helligkeit M unterscheidet, desto weiter ist der Stern entfernt.

Um eine **quantitative Aussage** über die Entfernung eines Sterns treffen zu können, um also seine Entfernung berechnen zu können, müssen wir verstehen,

- wie man scheinbare und absolute Helligkeiten messen kann und
- welcher formelmäßige Zusammenhang zwischen den beiden Größen besteht.

Das Psychophysische Gesetz:

Damit man die gemessene Strahlungsintensität E in einen Helligkeitswert m auf der Skala nach Hipparchos umrechnen kann, muss man wissen, wie hell unterschiedliche Strahlungsintensitäten vom menschlichen Auge wahrgenommen werden.

Der Physiologe **Ernst Heinrich Weber** erforschte 1834 den **Zusammenhang zwischen einem physikalischen Reiz und der Wahrnehmung dieses Reizes durch den Menschen**. Seine Erkenntnisse lassen sich auf den Tastsinn, auf das Gefühl, wie schwer ein Gegenstand ist, oder eben auf das Helligkeitsempfinden anwenden. Weber stellte fest, dass **zwischen dem Reiz und der Wahrnehmung** kein linearer sondern ein **logarithmischer Zusammenhang** besteht.

Was bedeutet dies für das Helligkeitsempfinden?

Beim Helligkeitsempfinden sind die **Strahlungsintensität E** der **Reiz** und die **scheinbare Helligkeit m** die **Wahrnehmung**.

Weber fand durch Messungen heraus:

Unabhängig vom Wert der Strahlungsintensität bewirkt eine fortgesetzte Verdopplung der Strahlungsintensität immer eine gleichmäßige Zunahme der wahrgenommenen Helligkeit.

Psychophysisches Gesetz (allgemeine Formulierung)

Experiment:

Wir regeln in einem dunklen Raum die Helligkeit einer Glühlampe und messen jeweils Spannung U und Stromstärke I. Wenn wir die Lampe immer aus der gleichen Entfernung betrachten, ist die elektrische Leistung $P = U \cdot I$ proportional zur Strahlungsintensität E. Wir untersuchen, bei welchen Leistungen wir eine gleichmäßige Zunahme der Helligkeit der Lampe wahrnehmen.

Entsprechend dem Psychophysischen Gesetz von Weber beobachten wir folgenden Zusammenhang:

> Wenn wir zum Beispiel mit einer Leistung von 10 Watt beginnen, dann beobachten wir eine gleichmäßige Helligkeitszunahme, wenn wir die Leistung schrittweise verdoppeln, also bei 20 Watt, 40 Watt, 80 Watt usw....

Die Änderung ΔE der Strahlungsintensität ist dabei direkt proportional zum jeweils vorangegangenen Wert E der Strahlungsintensität.

Das heißt: $$\frac{\Delta E}{E} = \text{konstant}$$

In unserem Beispiel:

$$E_0 = 10\,W \qquad E_1 = 20\,W \implies \Delta E = 10W \implies \frac{\Delta E}{E_0} = 1$$

$$E_1 = 20\,W \qquad E_2 = 40\,W \implies \Delta E = 20W \implies \frac{\Delta E}{E_1} = 1$$

$$E_2 = 40\,W \qquad E_3 = 80\,W \implies \Delta E = 40W \implies \frac{\Delta E}{E_2} = 1 \qquad \text{usw.}$$

Die scheinbare Helligkeit m nimmt gleichmäßig zu, wenn die Helligkeitsänderung Δm bei jedem Schritt gleich groß ist. Es gilt also: $\Delta m = konst.$ und $\frac{\Delta E}{E} = konst.$

Damit dürfen sich nach dem Psychophysischen Gesetz Δm und $\frac{\Delta E}{E}$ nur durch einen konstanten Faktor unterscheiden:

Zusammenhang zwischen m und E: $$\boxed{\Delta m = C \cdot \frac{\Delta E}{E}}$$

Dieser Zusammenhang gilt auch für kleine Änderungen dE und dm: $dm = C \cdot \frac{dE}{E}$

Durch Integration erhalten wir daraus den allgemeinen Zusammenhang zwischen scheinbaren Helligkeiten m und Strahlungsintensitäten E:

$$\int_{m_1}^{m_2} dm = C \cdot \int_{E_1}^{E_2} \frac{1}{E} dE \quad \Rightarrow \quad m_2 - m_1 = C \cdot (lnE_2 - lnE_1)$$

$$\Longrightarrow \quad \boxed{m_1 - m_2 = C \cdot (lnE_1 - lnE_2) = C \cdot ln\frac{E_1}{E_2}}$$

In der üblichen Schreibweise für das Psychophysische Gesetz ersetzt man den natürlichen Logarithmus ln durch den Zehnerlogarithmus lg.

Das darf man, denn es gilt

$$lna = log_e a = \frac{log_{10} a}{log_{10} e} = \frac{lga}{lge} = \frac{1}{lge} \cdot lga = konst. \cdot lga$$

In der Formel von oben ändert sich also nur der Wert der Konstanten C um den konstanten Faktor lge und wird zu $C^* = C \cdot lge$.

Es folgt: $$\boxed{m_1 - m_2 = C^* \cdot lg\frac{E_1}{E_2}}$$

Den Wert der Proportionalitätskonstante C^* erhält man, indem man die Strahlungsintensitäten E_1 und E_2 von zwei Sternen bekannter scheinbarer Helligkeiten m_1 und m_2 misst. Man erhält experimentell:

$$C^* = \frac{m_1 - m_2}{lg\,\frac{E_1}{E_2}} \approx -2{,}5$$

Damit folgt: $$\boxed{\boldsymbol{m_1 - m_2 = -2,5 \cdot lg\,\frac{E_1}{E_2}}}$$ *(FS 15)*

Psychophysisches Gesetz

(angewendet auf scheinbare Helligkeit und Strahlungsintensität eines Sterns)

Der Faktor $-2{,}5$ wurde zur ungefähren Anpassung der modernen scheinbaren Helligkeiten an das antike Größenklassensystem festgelegt.

Rechenbeispiele:

Aufgabe 1:

Wievielmal größer ist die Strahlungsintensität eines Sterns der Größe 6 als die eines Sterns der Größe 1?

Lösung:

$$m_1 - m_2 = -2{,}5 \cdot lg\,\frac{E_1}{E_2} \quad \Longrightarrow \quad \frac{E_1}{E_2} = 2{,}5^{m_2 - m_1} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{E_1} = E_2 \cdot 2{,}5^{6-1} \approx \boldsymbol{E_2 \cdot 100}$$

Die Strahlungsintensität eines Sterns der Größe 1 ist also etwa 100-mal größer als die Strahlungsintensität eines Sterns der Größe 6.

Aufgabe 2:

Der Stern Wega in der Leier hat eine Parallaxe von $0{,}123''$ und die scheinbare Helligkeit $m = 0{,}03$. Bestimme die Leuchtkraft und die relative Leuchtkraft der Wega durch Vergleich mit der Sonne!

Lösung:

Wir berechnen zuerst die Strahlungsintensität E_{Wega} der Wega:

Die Sonne hat die scheinbare Helligkeit $m_\odot = -26{,}8$ und die Strahlungsintensität $E_\odot = S = 1{,}36\,\frac{kW}{m^2}$ (Solarkonstante!).

$$\frac{E_{\text{Wega}}}{S} = 2{,}5^{m_\odot - m_{\text{Wega}}} \quad \Longrightarrow \quad E_{\text{Wega}} = 1{,}36\,\frac{kW}{m^2} \cdot 2{,}5^{-26{,}8-0{,}03} \approx 2{,}86 \cdot 10^{-11}\,\frac{kW}{m^2}$$

(Dass die Strahlung, die von einem fernen Stern auf der Erde ankommt sehr klein im Vergleich zur Sonnenstrahlungsleistung ist, war zu erwarten!)

Die Leuchtkraft L hängt mit der Strahlungsintensität über $E(r) = \frac{L}{4\pi r^2}$ zusammen.

Die Entfernung r der Wega berechnen wir aus der Fixsternparallaxe:

$$r = \frac{1''}{p}\,pc = \frac{1''}{0{,}123''}\,pc \approx 8{,}1301\,pc = 8{,}1301 \cdot 3{,}08 \cdot 10^{16}\,m \approx 2{,}504 \cdot 10^{17}\,m$$

Es folgt:

$$\boldsymbol{L} = E \cdot 4\pi r^2 = 2{,}86 \cdot 10^{-11}\,\frac{kW}{m^2} \cdot 4\pi(2{,}504 \cdot 10^{17}\,m)^2 \approx \boldsymbol{2{,}25 \cdot 10^{25}\,kW}$$

relative Leuchtkraft:

$$\boldsymbol{L^*} = \frac{L}{L_\odot} = \frac{2{,}25 \cdot 10^{25}\,kW}{3{,}82 \cdot 10^{23}\,kW} \approx \boldsymbol{59}$$

Die Wega hat also etwa die 59-fache Leuchtkraft der Sonne.

Das Entfernungsmodul:

Wir suchen noch den Zusammenhang zwischen der absoluten Helligkeit $\boldsymbol{M}$ und der scheinbaren Helligkeit $\boldsymbol{m}$:

Die absolute Helligkeit M ist die scheinbare Helligkeit, die ein Stern hätte, wenn er $10\,pc$ entfernt wäre. Wir müssen also berechnen, wie groß die Strahlungsintensität E des Sterns in einer Entfernung von $10\,pc$ wäre.

Den gesuchten Zusammenhang zwischen M, m und r erhalten wir, indem wir in der Formel des Psychophysischen Gesetzes m_1 durch m, m_2 durch M und E_1 und E_2 durch die entsprechenden Formeln für die Strahlungsintensitäten ersetzen:

Mit $m_1 - m_2 = -2{,}5 \cdot lg\frac{E_1}{E_2}$ und $E = \frac{L}{4\pi r^2}$ folgt nach Einsetzungen:

$$m - M = -2{,}5 \cdot lg\left(\frac{\frac{L}{4\pi r^2}}{\frac{L}{4\pi(10\,pc)^2}}\right) = -2{,}5 \cdot \lg\frac{\frac{1}{r^2}}{\frac{1}{(10\,pc)^2}} = -2{,}5 \cdot lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right)^{-2}$$

$$= -2 \cdot (-2{,}5) \cdot lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right) = 5 \cdot lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right)$$

Wir haben einen sehr wichtigen Zusammenhang zwischen scheinbarer Helligkeit m, absoluter Helligkeit M und Entfernung r eines Sterns gefunden:

$$\boxed{\boldsymbol{m - M = 5 \cdot lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right)}}$$ **Entfernungsmodul** *(FS 15)*

Beachte: Manchmal wird auch bereits die Differenz $\boldsymbol{m - M}$ als **Entfernungsmodul** bezeichnet. Ihr Wert ist ein Maß für die Entfernung eines Sterns oder eines anderen leuchtenden kosmischen Objekts.

Löst man das Entfernungsmodul nach r auf, so erhält man

Entfernung r: $$\boxed{\boldsymbol{r = 10^{\frac{m-M}{5}} \cdot 10\, pc}}$$

Rechenbeispiele:

Aufgabe 1:

Der Polarstern ($m = 2{,}12$) ist von uns 470 Lichtjahre entfernt. Berechne seine absolute Helligkeit!

$$\boldsymbol{M} = m - 5 \cdot lg\left(\frac{r}{10\, pc}\right) = 2{,}12 - 5 \cdot \lg\left(\frac{\frac{470}{3{,}26}\, pc}{10\, pc}\right) = 2{,}12 - 5 \cdot \lg 14{,}4 \approx \boldsymbol{-3{,}67}$$

Aufgabe 2:

In welcher Entfernung steht der Stern Spica (α Vir) im Sternbild Jungfrau, wenn seine absolute Helligkeit $-3{,}6$ und seine scheinbare Helligkeit 0,9 beträgt?

$$\boldsymbol{r} = 10^{\frac{m-M}{5}} \cdot 10\, pc = 10^{\frac{0{,}9+3{,}6}{5}} \cdot 10\, pc \approx \boldsymbol{79\, pc}$$

Aufgabe 3:

Der Ringnebel M57 in der Leier (oberes Bild) und Galaxie M82 (unteres Bild) haben **ähnliche scheinbare Helligkeiten**

$$\boldsymbol{m_{M57} = 8{,}8} \text{ und } \boldsymbol{m_{M82} = 8{,}6}$$

aber **stark unterschiedliche absolute Helligkeiten**

$$\boldsymbol{M_{M57} = -0{,}4} \text{ und } \boldsymbol{M_{M82} = -19{,}6}$$

Man erkennt ohne Rechnung, dass die Galaxie M82 viel weiter entfernt sein muss als er Ringnebel, weil das Entfernungsmodul der Galaxie M82 viel größer ist als das Entfernungsmodul des Ringnebels:

$$m_{M82} - M_{M82} = 28{,}2 \quad > \quad m_{M57} - M_{M57} = 9{,}2$$

Berechnet man die Entfernungen, so erhält man

für den **Ringnebel**:

$$\boldsymbol{r_{M57}} = 10^{\frac{8{,}8-(-0{,}4)}{5}} \cdot 10\, pc \approx 690\, pc \approx \boldsymbol{2300\, Lj}$$

für die **Galaxie M82**:

$$\boldsymbol{r_{M82}} = 10^{\frac{8{,}6-(-19{,}6)}{5}} \cdot 10\, pc \approx 4{,}4 \cdot 10^6\, pc \approx \boldsymbol{14 \cdot 10^6\, Lj}$$

Das **Problem** bei der Entfernungsbestimmung mithilfe des Entfernungsmoduls liegt darin, die **absolute Helligkeit** eines Objekts zu bestimmen.

Die Methode eignet sich für Objekte oder Sterne, die bei bestimmten beobachtbaren Eigenschaften stets die gleiche absolute Helligkeit haben. Solche Objekte heißen **Standardkerzen**.

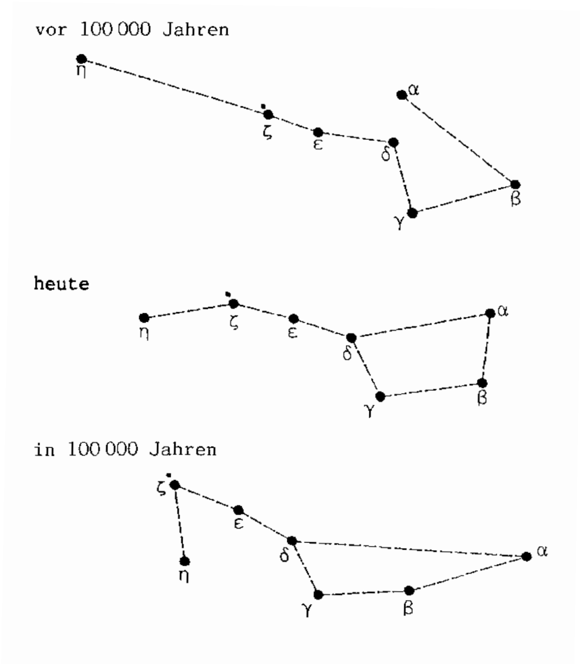
Beispiele für Standardkerzen sind Supernovae vom Typ SN Ia (Vgl. Kap. VI, S. 292) oder Cepheiden (Vgl. Kap. VI, S. 291)

4) Die Bewegung von Sternen:

Die Eigenbewegung eines Sterns:

Die Fixsterne sind nicht ganz „fix“, sondern bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten relativ zueinander. Sternbilder verändern deshalb im Laufe der Jahrtausende ihr Aussehen.

<ins>Beispiel</ins>: Großer Wagen (Abbildung rechts).



Die Tangentialbewegung eines Sterns:

Tangentialbewegungen von Sternen sind Bewegungen, die die Sterne senkrecht zur Blickrichtung und relativ zu den anderen Sternen ausführen. Tangentialbewegungen führen zur Veränderung der Sternbilder im Lauf langer Zeiträume.

Tangentialbewegungen von Sternen sind ohne entsprechende technische Hilfsmittel nicht wahrnehmbar.

Nachweisen lassen sich Tangentialbewegungen von Sternen durch Fotoaufnahmen in großem zeitlichen Abstand oder durch die Analyse historischer Aufzeichnungen wie prähistorischer Höhlenmalereien. Ein berühmtes Beispiel sind die **Höhlenbilder von Lascaux**. Die Abbildung rechts zeigt eine der in der Höhle von Lascaux gefundenen Zeichnungen, die vermutlich die Sternbilder des Sommerdreiecks darstellt.

Beachte:

Die Tangentialbewegung eines Sterns darf nicht verwechselt werden mit der scheinbaren Bewegung der Sterne, die ein irdischer Beobachter infolge der Eigenrotation der Erde wahrnimmt.

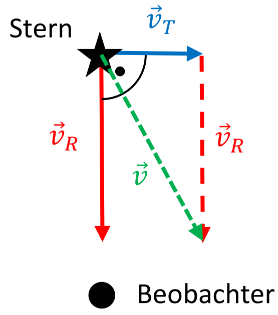
Die Radialbewegung eines Sterns:

Von Radialbewegung spricht man, wenn ein Stern sich von der Erde weg, oder auf die Erde zu bewegt.

Die Radialbewegung eines Sterns wird mithilfe der Dopplerverschiebung von Absorptionslinien im Spektrum des Sterns nachgewiesen. Dieses Verfahren werden wir im folgenden Abschnitt sorgfältig behandeln.

Raumbewegung:

Die Raumbewegung eines Sterns setzt sich in der Regel aus einer radialen und einer tangentialen Komponente zusammen.
Die Raumgeschwindigkeit $\vec{v}$ erhält man als Vektorsumme von Radialgeschwindigkeit $\vec{v}_R$ und Tangentialgeschwindigkeit $\vec{v}_T$:



$$\boxed{\vec{\boldsymbol{v}}_{\boldsymbol{R}} = \vec{\boldsymbol{v}}_{\boldsymbol{T}} + \vec{\boldsymbol{v}}_{\boldsymbol{R}}}$$

Weil Tangentialgeschwindigkeit $\vec{v}_T$ und Radialgeschwindigkeit $\vec{v}_R$ definitionsgemäß aufeinander senkrecht stehen, folgt für den Betrag der Raumgeschwindigkeit mit dem Satz von Pythagoras:

$$\boxed{\boldsymbol{v}^2 = \boldsymbol{v}_{\boldsymbol{T}}{}^2 + \boldsymbol{v}_{\boldsymbol{R}}{}^2}$$

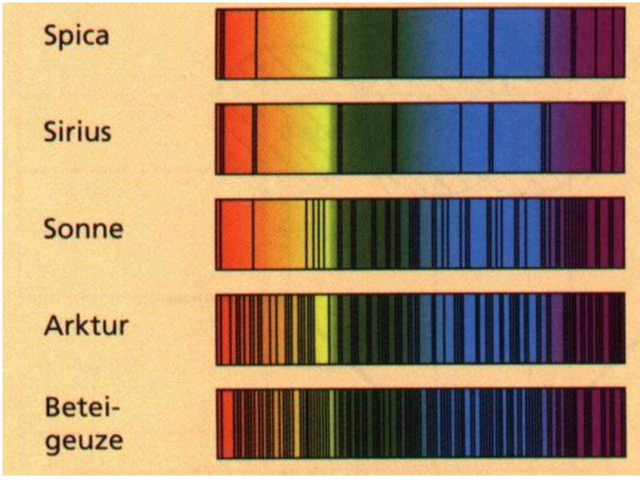
5) Sternspektren:

Wenn man einen Stern oder eine Galaxie im **Teleskop** durch ein **optisches Gitter** betrachtet, erhält man das Spektrum des Sterns. Sternspektren entstehen genauso, wie das Sonnenspektrum und ähneln diesem stark. Sie zeigen ebenfalls dunkle **Absorptionslinien** vor einem kontinuierlichen Hintergrundspektrum.

Rechts ist das Okulargitter unseres Schulteleskops abgebildet.

Die genaue Analyse der Sternspektren zeigt aber einige **charakteristische Unterschiede**: Die Spektren verschiedener Sterne enthalten nicht die gleichen Absorptionslinien Die Linien sind unterschiedlich stark ausgeprägt und unterschiedlich breit.

In der Abbildung rechts sind die Spektren der Sonne und einiger Sterne aufgezeichnet.



Wenn wir verstehen, wodurch diese Unterschiede in den Sternspektren verursacht werden, wird klar, dass die Spektren eine Fülle von **Informationen über Sterne und Galaxien** enthalten. Absorptionsspektren zeigen uns nicht nur, aus welchen chemischen Elementen ein Stern besteht. Aus den Spektren können wir unter anderem auch ablesen, wie heiß ein Stern ist und mit welcher Geschwindigkeit sich ein Stern oder eine Galaxie auf uns zu oder von uns wegbewegt.

Gasnebel in der Milchstraße und Galaxien kann man mit kleineren Teleskopen kaum unterscheiden. Die Spektroskopie deckt allerdings auf, ob es sich um einen Nebel oder um eine Galaxie handelt: **Galaxien** zeigen **Absorptionsspektren**, **Nebel** hingegen **Emissionsspektren**.

In der Kosmologie wird anhand von **Emissionsspektren leuchtender Gase** deren chemische Zusammensetzung und über die Dopplerverschiebung ihre Geschwindigkeit bestimmt.

Dopplerverschiebung von Absorptionslinien:

Aus den Spektren können wir unter anderem ablesen, mit welcher **Geschwindigkeit** sich ein Stern oder eine Galaxie auf uns zu oder von uns wegbewegt. Auch die Rotationsgeschwindigkeit von Galaxien lässt sich aus den Absorptionslinien ablesen.

Die Geschwindigkeitsmessung mithilfe von Sternspektren beruht auf dem **Dopplereffekt**.

Der Dopplereffekt

Jeder kennt das „**Krankenwagenphänomen**“: Im Moment des Vorbeifahrens scheint die Tonhöhe des Martinshorns plötzlich tiefer zu werden. Für das Motorengeräusch eines vorbeifahrenden Rennwagens gilt dasselbe.

Übung: Frequenzanalyse der Tonspur zur Filmaufnahme von einem mit Dauerhupe vorbeifahrenden Autos.

Erklärung: Schall ist eine Longitudinalwelle (periodische Verdichtungen der Luft). Je höher die Frequenz f (bzw. je kleiner die Wellenlänge λ), desto höher der Ton.

Schallwellen breiten sich in Luft (bei der Temperatur $20°C$) mit der Schallgeschwindigkeit $v_s = 344\ \frac{m}{s}$ aus.

Für die Schallwelle gilt:

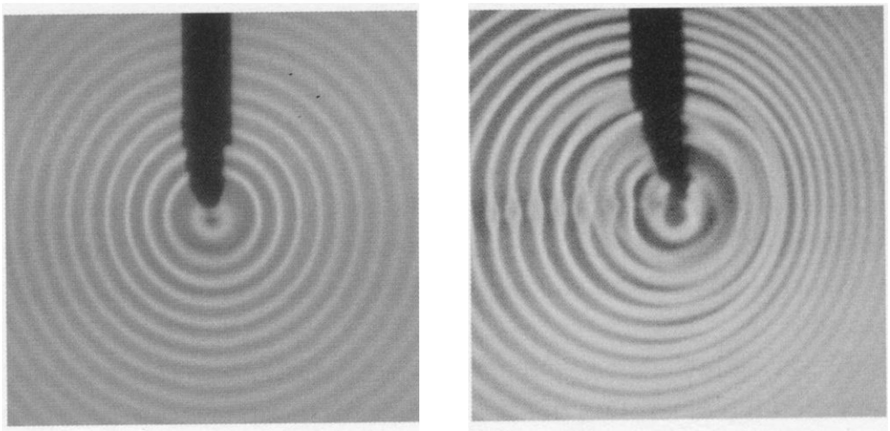
$$v_s = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

Wenn der Krankenwagen (tatsächlich) eine Schallwelle mit der Frequenz f und der Wellenlänge λ_0 aussendet, folgt aus der eingangs beschriebenen Beobachtung:

Krankenwagen fährt auf den Beobachter zu:	$f > f_0$	bzw.	$\lambda < \lambda_0$
Krankenwagen fährt vom Beobachter weg:	$f < f_0$	bzw.	$\lambda > \lambda_0$

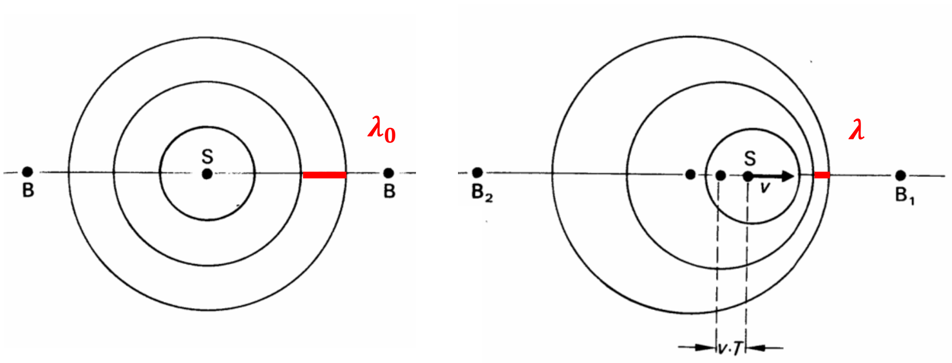
Die vom Beobachter wahrgenommene Wellenlänge nennen wir im Folgenden λ (und entsprechend die Frequenz f).

Eine Metallspitze, die periodisch in eine Wasseroberfläche tupft, erzeugt eine kreisförmige Welle. Wird der Tupfer zusätzlich über die Wasseroberfläche bewegt, entsteht das rechte Bild:


Quelle ruht – konzentrische Kreiswellen   Quelle bewegt sich nach rechts

Auch bei dieser Wasserwelle sieht der Beobachter, auf den der Wellenerreger sich zubewegt, eine Welle mit einer verkürzten Wellenlänge, während der Beobachter, von dem der Wellenerreger sich wegbewegt eine Welle mit vergrößerter Wellenlänge wahrnimmt.

Was man bei Schallwellen hören und bei Wasserwellen sehen kann, lässt sich auf Licht (elektromagnetische Welle) übertragen:



Ein Stern sendet in den Raum Licht mit nach allen Richtungen gleicher Wellenlänge λ_0 aus.

Im rechten Bild bewegt sich der Stern mit konstanter Geschwindigkeit v nach rechts.
Das Bild zeigt die Positionen des Sterns jeweils im zeitlichen Abstand einer Schwingungsdauer T. Während der Zeit T legt der Stern also den Weg $v \cdot T$ zurück.

Wenn sich der Stern auf den Beobachter zu oder von ihm wegbewegt, nimmt der Bobachter eine Wellenlängenverschiebung wahr:

Beobachter B_1, auf den der Stern sich zu bewegt, sieht Licht mit verkürzter Wellenlänge λ:

$\lambda < \lambda_0$ **(Blauverschiebung)** $\quad \Longrightarrow \quad \lambda = \lambda_0 - v \cdot T$

(In der Zeit T läuft der Stern der von ihm erzeugten Wellenfront um $v \cdot T$ hinterher!)

Beobachter B_2, von dem der Stern sich weg bewegt, sieht Licht mit größerer Wellenlänge λ:

$\lambda > \lambda_0$ **(Rotverschiebung)** $\quad \Longrightarrow \quad \lambda = \lambda_0 + v \cdot T$

(In der Zeit T eilt der Stern der von ihm erzeugten Wellenfront um $v \cdot T$ voraus!)

Die Geschwindigkeit bzw. die Geschwindigkeitskomponente längs der Blickrichtung des Beobachters zu einem Stern ist die **Radialgeschwindigkeit** des Sterns. Aus der beobachteten Wellenlängenverschiebung können wir die Radialgeschwindigkeit v des Sterns berechnen:
Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lichtwelle (Lichtgeschwindigkeit):

$$c = \frac{\lambda_0}{T}$$

Radialgeschwindigkeit des Sterns:

$$v = \frac{\Delta\lambda}{T} \quad \text{mit} \quad \Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$$

$$\Longrightarrow \quad v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

relative Wellenlängenverschiebung bei Lichtwellen:

$$\boxed{\boldsymbol{\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \qquad \text{mit} \quad \Delta\lambda = \lambda - \lambda_0}}$$

Die Rotverschiebung:

In der Kosmologie spielt vor allem die Rotverschiebung eine wichtige Rolle. Sie wird definiert als

Rotverschiebung z:

$$\boxed{\boldsymbol{z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}}}$$

Weil bei Rotverschiebung $\Delta\lambda$ positiv ist, ist auch z stets positiv.

Wegen $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$ ist die Rotverschiebung z direkt proportional zur Radialgeschwindigkeit v eines Sterns:

$$\boxed{\boldsymbol{v = z \cdot c}}$$

Die Rotverschiebung z gibt also insbesondere an, mit wieviel Prozent der Lichtgeschwindigkeit ein kosmisches Objekt sich entfernt.

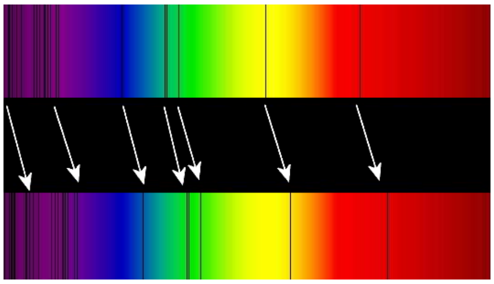
Die Beziehung $v = z \cdot c$ gilt allerdings nicht mehr, wenn sich ein Objekt mit einer Radialgeschwindigkeit entfernt, die größer als 10% der Lichtgeschwindigkeit ist. Dann muss mit der Formel für den **relativistischen Dopplereffekt** gerechnet werden (vgl. Kap. VIII, S. 382):

$$\boldsymbol{z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1}$$

Wie misst man die Rotverschiebung eines Sterns?

Bewegt sich ein Stern auf den Beobachter zu oder von ihm weg, so äußert sich die Rotverschiebung $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ in einer Verschiebung der Absorptionslinien um $\Delta\lambda$ zu kleineren bzw. zu größeren Wellenlängen hin.

Im Bild rechts ist oben das Spektrum eines Sterns dargestellt, der sich relativ zum Beobachter nicht bewegt, unten das Spektrum eines Sterns, der sich vom Beobachter entfernt. Beim Vergleich der beiden Spektren erkennt man die Rotverschiebung der Linien im Spektrum des bewegten Sterns.



Rechenbeispiel 1**:**

Die Radialgeschwindigkeiten von Fixsternen in der Milchstraße liegen im Bereich einiger $\boldsymbol{\frac{km}{s}}$.

Der Stern Aldebaran (Stierauge) bewegt sich mit der Radialgeschwindigkeit $v = 54\ \frac{km}{s}$ von der Erde fort. Die Natrium-Linie hat im Ruhesystem die Wellenlänge $\lambda_0 = 589{,}0\ nm$.

Rotverschiebung:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} = \frac{54 \cdot 10^3\ \frac{m}{s}}{3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}} \approx 1{,}8 \cdot 10^{-4} \implies \boldsymbol{\Delta\lambda} = \lambda_0 \cdot z = 589{,}0\ nm \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-4} \approx \mathbf{0{,}11}\ \boldsymbol{nm}$$

Die Wellenlänge der Natrium-Linie verschiebt sich um $\Delta\lambda = 0{,}11\ nm$ zu einer größeren Wellenlänge λ hin:

$$\boldsymbol{\lambda} = \lambda_0 + \Delta\lambda = 589{,}0\ nm + 0{,}11\ nm \approx \mathbf{589{,}1}\ \boldsymbol{nm}$$

Beachte:

Wegen $\Delta\lambda = z \cdot \lambda_0$ ist die relative Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$ proportional zur unverschobenen Wellenlänge λ_0 einer Absorptionslinie. Das heißt: Im Spektrum des Sterns Aldebaran ist eine Absorptionslinie am roten Ende des sichtbaren Spektrums ($\lambda \approx 800\ nm$) etwa doppelt so stark verschoben, wie eine Absorptionslinie am blauen Ende des sichtbaren Spektrums ($\lambda \approx 400\ nm$).

Rechenbeispiel 2**:**

Spektroskopische Bestimmung der Entfernung der Erde von der Sonne (Astronomische Einheit):

Auf den deutschen Astronomen **Karl Friedrich Küstner** (1856 bis 1936) geht eine Methode zur Bestimmung des mittleren Erdbahnradius r_E zurück, die auf der Beobachtung von Sternspektren beruht:

Vergleicht man mehrere, im Lauf eines Jahres von einem ekliptiknahen Stern (die Erde bewegt sich in der Ekliptikebene!) aufgenommene Spektren, so stellt man fest, dass die Absorptionslinien während einer Hälfte des Jahres zu längeren und während der anderen Hälfte des Jahres zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben sind. Wann der Wechsel zwischen Rot- und Blauverschiebung beobachtet wird, hängt davon ab, wann der Messzeitraum beginnt.
Die Ursache für die Dopplerverschiebungen ist die Relativbewegung der Erde zum Stern während ihres Umlaufs um die Sonne mit der Bahngeschwindigkeit v_E.

Für die Bahngeschwindigkeit der Erde gilt: $v_E = \frac{2\pi \cdot r_E}{T}$ wobei für die Umlaufzeit $T = 1\ a$ ist.

Für die relative Dopplerverschiebung der Wellenlänge λ_0 gilt: $\frac{\Delta\lambda_{max}}{\lambda_0} = \frac{v_E}{c}$

$$\Rightarrow \quad r_E = \frac{v_E \cdot T}{2\pi} = \frac{\Delta\lambda_{max} \cdot c \cdot T}{\lambda_0 \cdot 2\pi}$$

Die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne (1 Astronomische Einheit $= 1\ AE$) beträgt $1\ AE = 1{,}496 \cdot 10^{11}\ m$.

Daraus ergibt sich beispielsweise für die H_α-Linie des Wasserstoffatoms mit der unverschobenen Wellenlänge $\lambda_0 = 656{,}297\ nm$ eine maximale Dopplerverschiebung

$$\boldsymbol{\Delta\lambda_{max}} = \frac{1\ AE \cdot \lambda_0 \cdot 2\pi}{c \cdot 1\ a} = \frac{1{,}496 \cdot 10^{11}\ m \cdot 656{,}297 \cdot 10^{-9}\ m \cdot 2\pi}{3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600\ s} \approx \mathbf{0{,}065\ nm}$$

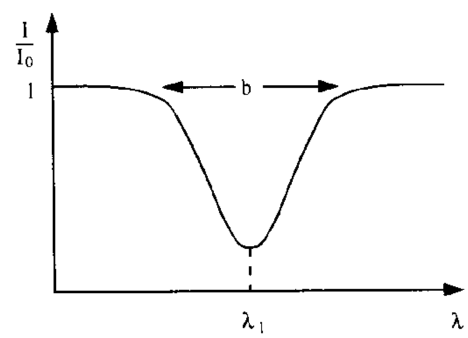
Die Wellenlänge der H_α-Linie im Spektrum des Sterns schwankt im Lauf eines Jahres also zwischen

$\lambda_1 = \lambda_0 - \Delta\lambda_{max} = 656{,}232\ nm$ und $\lambda_2 = \lambda_0 + \Delta\lambda_{max} = 656{,}362\ nm$.

Rechenbeispiel 3**:**

Im Spektrum einer Galaxie führt die **Eigenrotation der Galaxie** zu einer **Dopplerverbreiterung von Absorptionslinien**.

Eine 42 Millionen *Lj* von uns entfernte Galaxie ist im Raum so orientiert, dass ihre Rotationsachse senkrecht auf der Sichtlinie Erde-Galaxie steht. Die H_α-Linie des Wasserstoffs – im Labor eine scharfe Linie bei $\lambda_0 = 656{,}297\ nm$ – wird auch in der Strahlung beobachtet, die von der gesamten Galaxie stammt. Sie taucht allerdings im Spektrum verschoben bei der Wellenlänge $\lambda_1 = 658{,}003\ nm$ auf und ist verbreitert auf den Wert $b = 0{,}438\ nm$ (vgl. Skizze).



Wir gehen davon aus, dass die Wellenlängenverschiebung von λ_0 nach λ_1 allein durch die Radialbewegung der Galaxie gegenüber unserem Sonnensystem hervorgerufen wird.

Für die Linienverbreiterung nehmen wir als Hauptursache die Rotation der Sterne um das Zentrum der beobachteten Galaxie gegenüber unserem Sonnensystem an.

- Mit welcher Geschwindigkeit und in welche radiale Richtung bewegt sich die Galaxie von unserem Sonnensystem aus gesehen?
- Welche maximale Bahngeschwindigkeit erreichen die Sterne in der Galaxie?

Rotverschiebung durch Radialbewegung der Galaxie als Ganzes: $z_0 = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_0}$

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{v} = z_0 \cdot c = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_0} \cdot c = \frac{658{,}003\ nm - 656{,}297\ nm}{656{,}297\ nm} \cdot 3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s} \approx \mathbf{780\ \frac{km}{s}}$$

Wegen $\lambda_1 > \lambda_0$ (Rotverschiebung!) bewegt sich die Galaxie mit der Geschwindigkeit 780 $\frac{km}{s}$ vom Sonnensystem weg.

Zur Berechnung der **relativen Rotverschiebung z_1 der Sterne an einander gegenüberliegenden Rändern der rotierenden Galaxie** verwenden wir die Formel für den Dopplereffekt und beachten, dass für die Linienverbreiterung die Ausgangswellenlänge $\lambda_1 = 658{,}003\ nm$ beträgt. Die relative Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$ ist $\frac{b}{2}$:

$$z_1 = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} = \frac{v_{max}}{c}$$

$$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{v_{max}} = z_1 \cdot c = \frac{b}{2 \cdot \lambda_1} \cdot c = \frac{0{,}438\ nm}{2 \cdot 658{,}003\ nm} \cdot 3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s} \approx \mathbf{100}\ \boldsymbol{\frac{km}{s}}$$

Die Sterne am Rand der rotierenden Galaxie erreichen eine maximale Bahngeschwindigkeit von etwa $100\ \frac{km}{s}$.

Beachte:

Die Rotverschiebung von Linien in Spektren kosmischer Objekte kann außer der Dopplerverschiebung auch noch zwei andere Ursachen haben:

- Die **kosmologische Rotverschiebung**, bei der es sich um eine Dehnung der Wellenlänge jeder Strahlung aufgrund der Expansion des Universums - also der Ausdehnung des Raums - handelt. Leuchtende kosmische Objekte bewegen sich dabei nicht im Universum sondern sie bewegen sich mit dem expandierenden Universum mit. (Vgl. Kapitel VI, S. 307)
- Die **Gravitationsrotverschiebung**, ein Effekt der Allgemeinen Relativitätstheorie, der zur Dehnung der Wellenlänge des Lichts in der Nähe von Massen führt. (Vgl. Kap. VIII, S. 452)

6) Doppelsternsysteme:

Beobachtung von Dopplesternsystemen:

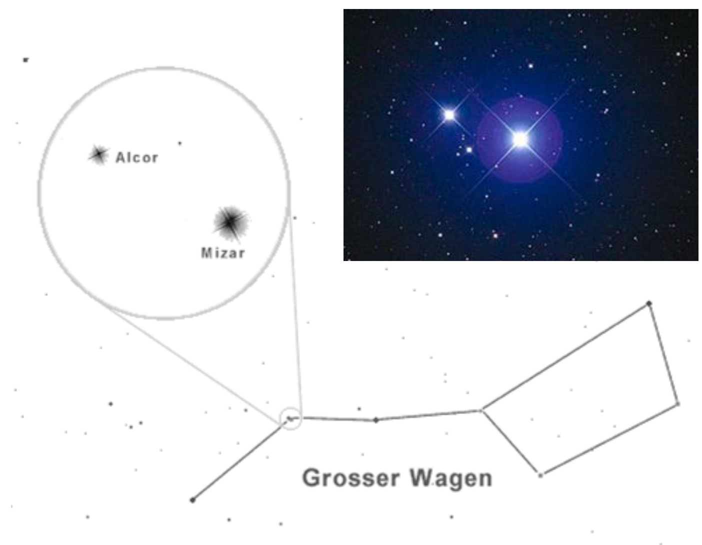
Mehr als 50% aller bekannten Sterne gehören zu Doppel- oder Mehrfachsternsystemen.

Sterne, die zufällig für den Beobachter auf der Erde in der gleichen Blickrichtung liegen und deshalb nahe beisammen zu liegen scheinen, tatsächlich aber weit voneinander entfernt sind, werden manchmal als **unechte oder optische Doppelsterne** bezeichnet.

Bei **echten oder physischen Doppelsternen** sind die Komponenten durch Gravitationskräfte aneinander gebunden und bewegen sich jeweils auf Ellipsenbahnen um den gemeinsamen Schwerpunkt.

<u>Beispiele</u>:

Das wohl bekannteste Doppelsternsystem bilden Mizar, der mittlere Deichselstern des großen Wagens, und Alcor. **Mizar und Alkor** sind mit bloßem Auge gerade noch getrennt wahrnehmbar. Alkor ist für den irdischen Beobachter der kleine Begleiter von Mizar und trägt auch den Namen „Reiterlein“. Ob es sich bei Mizar und Alcor tatsächlich um ein physisches Doppelsternsystem handelt, ist bis heute umstritten.



Die beiden hellsten Sterne des Sternbildes Kentaur, **α-Centauri und β-Centauri** wirken wie ein Doppelsternsystem. Tatsächlich ist aber α-Centauri $4{,}3\ Lj$ entfernt und β-Centauri $530\ Lj$.

Der sonnennächste Stern α-Centauri selbst ist allerdings ein Dreifachsternsystem. Einer der Sterne dieses Systems, Proxima Centauri oder α-Centauri C, ist im Bild rechts durch einen kleinen roten Kreis markiert.

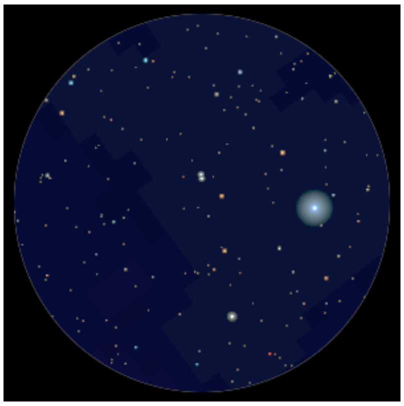
Je nach der Methode, mit der sie als Doppelsternsysteme identifiziert werden können, lassen sich die echten Doppelsternsysteme in **4 Klassen** einteilen. Dabei können Doppelsternsysteme durchaus auch mehreren Klassen angehören.

1) visuelle Doppelsternsysteme:

Nur bei diesem Typ eines Doppelsternsystems sind beide Komponenten (mit dem Teleskop) getrennt wahrnehmbar.

<u>Beispiel</u>:

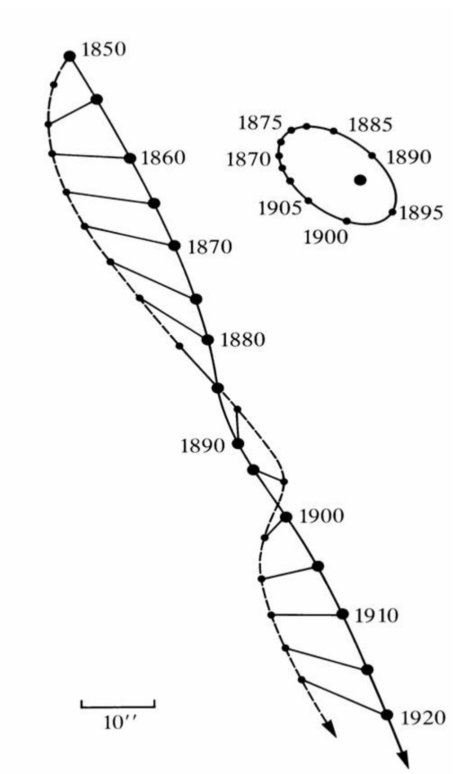
ε Lyrae, der vierthellste Stern im Sternbild Leier, ist ein Vierfachsternsystem, von dem im Teleskop zwei Komponenten wahrnehmbar sind. Im Bild rechts ist ε Lyrae oberhalb der Mitte sichtbar. Rechts ist Wega, der hellste Stern im Sternbild Leier zu sehen.



2) Astrometrische Doppelsternsysteme:

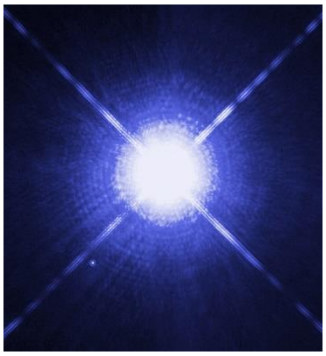
Bei diesem Typ eines Doppelsternsystems ist häufig nur der hellere der beiden Sterne sichtbar. Bei Beobachtung über einen langen Zeitraum zeigt dieser Hauptstern periodisch sich wiederholende Positionsveränderungen, die durch die Gravitationskraft des unter Umständen nicht sichtbaren Begleiters verursacht werden.

<u>Beispiel</u>: Sirius A und B



In der Abbildung ist rechts oben die Ellipsenbahn des Begleiters Sirus B in einem Koordinatensystem, in dem Sirius A ruht, dargestellt. Die Blickrichtung wurde so gewählt, dass der Beobachter senkrecht auf die Bahnebene von Sirius B blickt.
Der linke Teil der Skizze zeigt, was der irdische Beobachter tatsächlich sieht, wenn er das Doppelsternsystem über einen langen Zeitraum von 70 Jahren alle 5 Jahre beobachtet: Die Tangentialbewegungen von Sirius A und Sirius B zeigen periodische Unregelmäßigkeiten, die durch die Gravitationswirkung zwischen den beiden Komponenten verursacht werden.

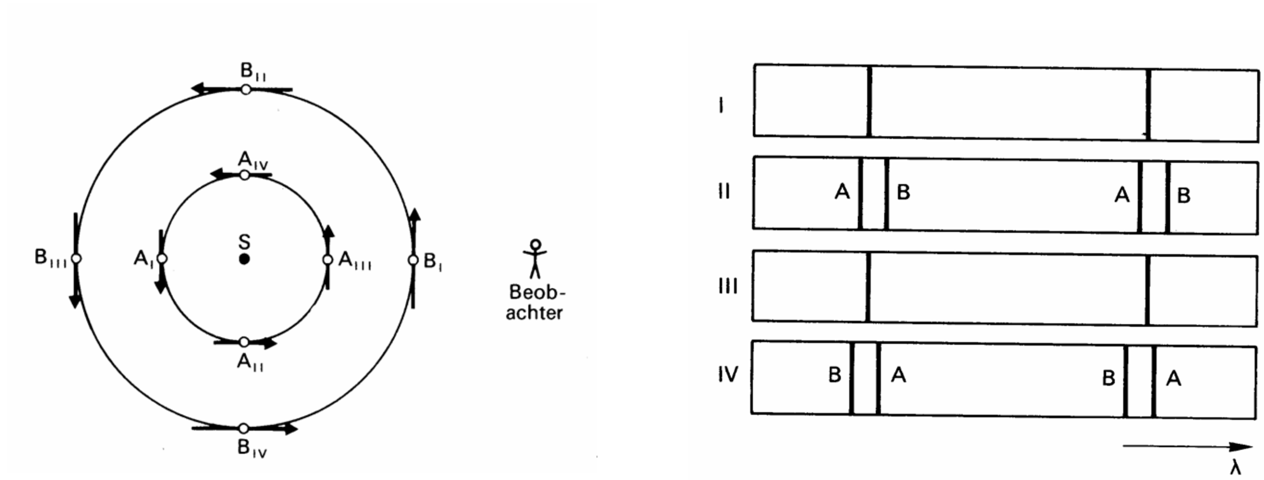
- Sirius A und B bilden zusätzlich ein visuelles Doppelsternsystem. Im Foto rechts ist der Begleiter Sirius B als kleiner weißer Punkt links unterhalb des Sterns Sirius A sichtbar.



3) spektroskopische Doppelsternsysteme:

Auch bei diesem Typ eines Doppelsternsystems ist häufig nur der Hauptstern sichtbar. Charakteristisch ist eine sich periodisch ändernde Dopplerverschiebung im Spektrum der Komponenten bzw. des Hauptsterns.

Beispiele: Polarstern, Capella (Fuhrmann), Spika (Jungfrau), Algol (Perseus)



Der linke Teil der Abbildung zeigt die näherungsweise als Kreisbahnen dargestellten Umlaufbahnen der Komponenten A und B des Doppelsternsystems um den gemeinsamen Schwerpunkt S. Der rechte Teil der Abbildung zeigt die Dopplerverschiebungen zweier ausgewählter Spektrallinien je nach momentaner Radialgeschwindigkeit.

Der zeitliche Abstand zweier maximaler Dopplerverschiebungen ist die halbe Umlaufdauer der beiden Komponenten um den gemeinsamen Schwerpunkt.

Ist $\Delta\lambda$ die maximale Dopplerverschiebung gegenüber der unverschobenen Spektrallinie(λ_0), so gilt für die maximale Radialgeschwindigkeit v_R und damit für die Bahngeschwindigkeit v:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad \Rightarrow \quad v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

Rechenbeispiel:

Der Stern Algol im Sternbild Perseus war schon im Altertum ein „prominenter“ Stern. Algol galt als „Teufelsstern“. Algol ist ein Doppelsternsystem mit den Komponenten A und B, die sich jeweils auf Kreisbahnen um den gemeinsamen Schwerpunkt bewegen.

Genaue Untersuchungen liefern für die Komponente A eine periodische Schwankung der Wellenlänge einer ausgewählten Absorptionslinie im UV-Bereich zwischen $241{,}9516\ nm$ und $242{,}0484\ nm$.

a) Wie lässt sich diese periodische Schwankung der Wellenlänge erklären?

b) Berechne die Bahngeschwindigkeit der A-Komponente von Algol!

zu a): Auf ihrer Ellipsenbahn bewegt sich die Komponente A abwechselnd vom Beobachter weg und auf den Beobachter zu. Der Dopplereffekt führt zu einer Rotverschiebung ($\lambda_{max} = 242{,}0484\ nm > \lambda_0$) bei Wegbewegung und zu einer Blauverschiebung ($\lambda_{max} = 241{,}9516\ nm < \lambda_0$) bei Bewegung auf den Beobachter zu.

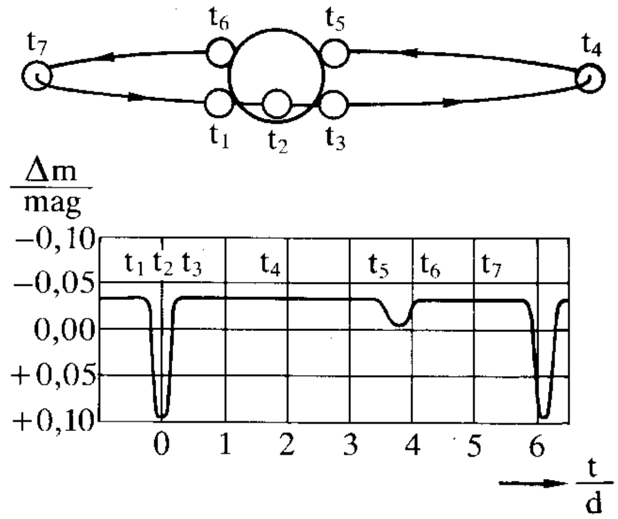
zu b): $\Delta\lambda = (242{,}0484\ nm - 241{,}9516\ nm) : 2 \approx 0{,}0484\ nm$

$\lambda_0 = 242{,}0484\ nm - \Delta\lambda = 242{,}000\ nm$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{v} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c = \frac{0{,}0484\ nm}{242{,}000\ nm} \cdot 3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s} \approx \mathbf{60}\ \boldsymbol{\frac{km}{s}}$$

4) Fotometrische Doppelsternsysteme (Bedeckungsveränderliche):

Wenn die gemeinsame Bahnebene der Komponenten des Doppelsternsystems parallel zur Beobachtungsrichtung liegen, misst der Beobachter jedes Mal, wenn eine Komponente vor der anderen vorbeiwandert („Bedeckung“) eine Abnahme der scheinbaren Helligkeit des Gesamtsystems. Die Helligkeitsabnahme fällt stärker aus, wenn die schwächere Komponente die stärkere verdeckt.



Bei manchen fotometrischen Doppelsternen ist vom Gesamtsystem nur ein Stern mit periodisch veränderlicher scheinbarer Helligkeit sichtbar.

<u>Beispiel</u>: Algol im Perseus ist ein spektroskopisches und, wegen der Ausrichtung seiner Bahnebene zur Erde hin, außerdem ein fotometrisches Doppelsternsystem.

Massenbestimmung bei Doppelsternsystemen:

Die Masse eines Planeten kann mithilfe des 3. Keplerschen Gesetzes berechnet werden, wenn von einem Mond des Planeten Umlaufdauer und Bahnradius bekannt sind (vgl. Kap. III, S. 117)

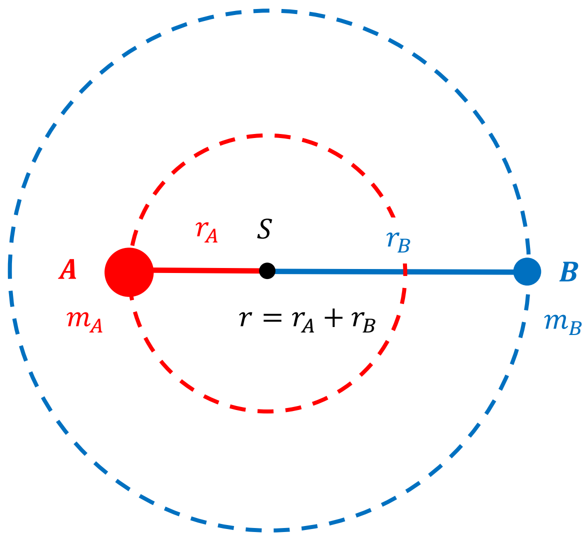
Weil bei fast allen Planeten die Monde viel leichter als der Planet sind, wird dort meist näherungsweise von einer Kreisbewegung des Mondes um den <u>ruhenden</u> Planeten ausgegangen.
Die Kreisbahnnäherung können wir auch bei den Doppelsternsystemen anwenden, die zweite Näherung wäre aber zu grob. Wir betrachten Doppelsternsysteme als <u>Zweikörpersysteme</u>, die sich auf konzentrischen Kreisen um den gemeinsamen Schwerpunkt bewegen (vgl. Kap. III, S. 87f).

Für das **Zweikörpersystem** der beiden Doppelstern-Komponenten A und B gilt:

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot (m_A + m_B)}$$

mit $T_A = T_B = T$ und $r = r_A + r_B$

(Vgl. Kap. III, S. 88) und *(FS 13)*



Mit dem **Schwerpunktsatz** folgt:

$$m_A \cdot r_A = m_B \cdot r_B$$

Wir setzen $m_B = m_A \cdot \frac{r_A}{r_B}$ in

$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot (m_A + m_B)}$ ein:

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot \left(m_A + m_A \cdot \frac{r_A}{r_B}\right)} = \frac{4\pi^2}{G \cdot m_A} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{r_A}{r_B}\right)}$$

Für die **Masse m_A des Sterns A** folgt:

$$\boldsymbol{m_A = \frac{4\pi^2}{G \cdot T^2} \cdot \frac{r^3}{\left(1 + \frac{r_A}{r_B}\right)}}$$

Die **Masse m_B des Sterns B** folgt dann aus dem Schwerpunktsatz:

$$\boldsymbol{m_B = m_A \cdot \frac{r_A}{r_B}}$$

Die **Gesamtmasse des Doppelsternsystems** ist $\boldsymbol{m = m_A + m_B}$.

Rechenbeispiel:

Von einem spektroskopischen Doppelsternsystem wird bei der A-Komponente eine relative Wellenlängenverschiebung $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 10^{-4}$ und bei der B-Komponente eine relative Wellenlängenverschiebung von $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 2 \cdot 10^{-4}$ gemessen. In regelmäßigen Abständen aufgenommene Spektren lassen eine Periodizität erkennen, aus der eine Umlaufdauer von 40 Tagen ablesbar ist. Da der Doppelstern auch als Bedeckungsveränderlicher in Erscheinung tritt, kann auf einen Inklinationswinkel von ca. 90° geschlossen werden. Das heißt: Der Beobachter blickt auf die „Kante" der Ebene, in der die Komponenten des Doppelsterns kreisen.

Berechne die Massen der beiden Doppelsternkomponenten unter der Voraussetzung, dass sich diese auf Kreisbahnen bewegen!

Lösung:

Wir benötigen für die Massenberechnung die Bahnradien r_A und r_B der beiden Komponenten.

Dazu berechnen wir aus den Dopplerverschiebungen die Bahngeschwindigkeiten v_A und v_B.

$v = \frac{2\pi r}{T}$ liefert dann die Bahnradien.

Geschwindigkeiten v_A und v_B:

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{v_A} = 10^{-4} \cdot 3{,}0 \cdot 10^8 \ \frac{m}{s} = \boldsymbol{3{,}0 \cdot 10^4 \ \frac{m}{s}} \ \text{und} \ \boldsymbol{v_B = 2 \cdot v_A} = 6{,}0 \cdot 10^4 \ \frac{m}{s}$$

Bahnradien r_A und r_B:

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{r_A} = \frac{v_A \cdot T}{2\pi} = \frac{3{,}0 \cdot 10^4 \ \frac{m}{s} \cdot 40 \cdot 24 \cdot 3600 \ s}{2\pi} \approx \boldsymbol{1{,}6501 \cdot 10^{10} \ m} \ \text{und} \ \boldsymbol{r_B} = \frac{v_B \cdot T}{2\pi} = \boldsymbol{2 \cdot r_A}$$

Masse des Sterns A:

$$\boldsymbol{m_A} = \frac{4\pi^2}{G \cdot T^2} \cdot \frac{r^3}{\left(1 + \frac{r_A}{r_B}\right)} = \frac{4\pi^2}{G \cdot T^2} \cdot \frac{(3 \cdot r_A)^3}{1{,}5} =$$

$$= \frac{4\pi^2}{6{,}62 \cdot 10^{-11} \ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot (40 \cdot 24 \cdot 3600 \ s)^2} \cdot \frac{(3 \cdot 1{,}6501 \cdot 10^{10} \ m)^3}{1{,}5} \approx \boldsymbol{4{,}0 \cdot 10^{30} \ kg}$$

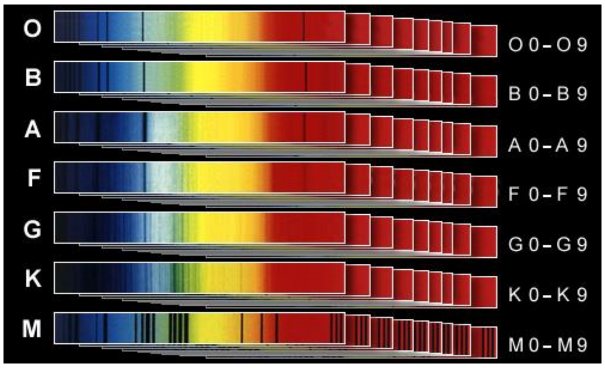
Masse der Komponente B:

$$\boldsymbol{m_B} = m_A \cdot \frac{r_A}{r_B} \approx 4{,}0 \cdot 10^{30} \ kg \cdot \frac{1}{2} = \boldsymbol{2{,}0 \cdot 10^{30} \ kg}$$

7) Das Hertzsprung-Russel-Diagramm

Spektralklassen und Sterntemperatur:

Zerlegt man das Licht eines Sterns mithilfe eines optischen Gitters oder eines Prismas in die Spektralfarben, so erhält man ein dem Sonnenspektrum ähnliches Absorptionsspektrum mit schwarzen Fraunhoferlinien (vgl. Kap. II, S. 34). Die Spektren verschiedener Sterne unterscheiden sich allerdings:



Je nachdem, welche Absorptionslinien auftreten und wie intensiv diese sind, werden Sternspektren in die **Spektralklassen** O, B, A, F, G, K, M eingeteilt.

Zur genaueren Abstufung haben die Spektralklassen **Unterklassen**: O hat 5, B bis M haben je 10 Unterklassen.

Beispielweise ist **Sirius**, der hellste, am nördlichen Himmel sichtbare Stern im Sternbild „Großer Hund", ein **A1-Stern**, also ein Stern der 2. Unterklasse der Spektralklasse A mit einer Oberflächentemperatur von etwa $25000\ K$.

Unsere **Sonne** ist ein **G2 Stern**, was einer Oberflächentemperatur von ca. $6000\ K$ entspricht.

Die **Spektralsequenz O-B-A-F-G-K-M** stellt eine Ordnung nach **abnehmender Oberflächentemperatur** dar:

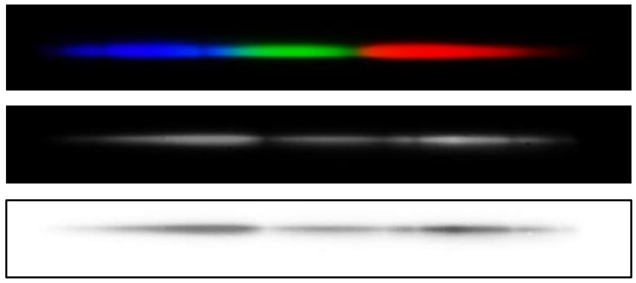
Spektralklasse	O	B	A	F	G	K	M
Oberflächentemperatur in 10^3 K	50 – 30	25 – 15	12 – 8	8 – 6	6 – 5	4	3,5
Farbe	blau weiß	bläulich weiß	weiß	gelb weiß	gelb	gelb rötlich	rot

Mit einer der beiden **Eselsbrücken** kann man sich die Reihenfolge der Spektralklassen in der Spektralsequenz leichter merken:

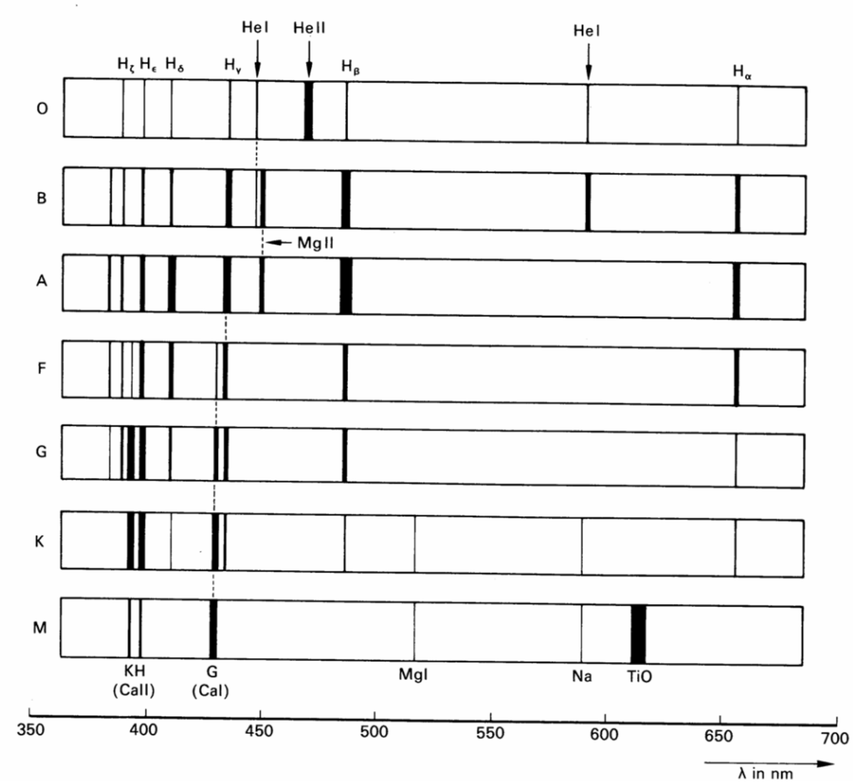
„Oh Be A Fine Girl Kiss Me!" oder **"Ohne Bier aus'm Fass gibts koa Mass!"**

Übung:
Aufnahme und Vergleich von Sternspektren mithilfe des Schulteleskops und einem Okulargitter

Die Bilderfolge rechts zeigt ein mit dem Schulteleskop aufgenommenes Spektrum des Sirius. Das Sternspektrum wurde mit einem Okulargitter erzeugt. Wenn man das Spektrum in Graustufen und unter Umständen noch als Negativbild darstellt, werden ausgeprägte Absorptionslinien als Einschnürungen im Spektrum erkennbar.

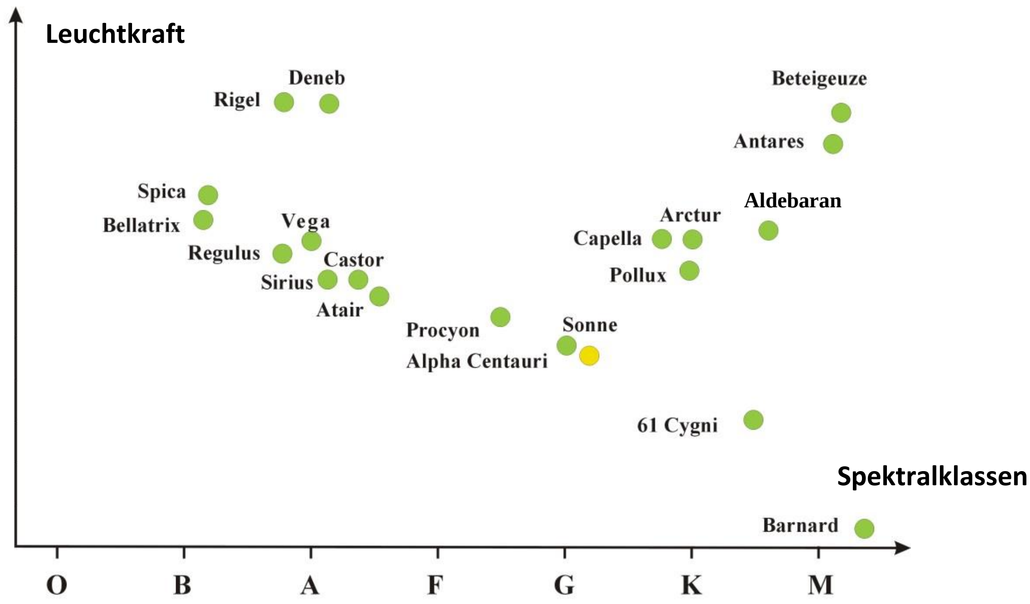


Wie kann man aus dem Spektrum auf die Sterntemperatur schließen?



- Die Balmerlinien H_α, H_β, H_γ und H_δ des Wasserstoffs können nur in ausreichend heißen Sternatmosphären entstehen. (Vgl. Kap. II, S. 41)
  Deshalb sind die Linien H_α, H_β, H_γ und H_δ in den „heißen" Spektralklassen B, A und F am stärksten ausgeprägt.
- Mit zunehmender Temperatur werden zunächst Moleküle in ihre Bestandteile (Atome) aufgespalten und dann die Atome ionisiert (d.h.: die Atome verlieren Hüllenelektronen). Je höher die Temperatur, desto höher der Ionisierungsgrad.
  $He\ I$ ist die Linie des neutralen Heliumatoms He.
  $He\ II$ ist die Linie des einfach ionisierten Heliumatoms He^+.
- Ionenlinien treten erst bei sehr hohen Temperaturen auf.
  Beispielsweise tritt die $He\ II$ -Linie erst in der heißesten Spektralklasse O auf.
- Moleküle kommen in Sternatmosphären nur bei relativ niedrigen Temperaturen vor. Bei höheren Temperaturen zerfallen sie in die Atome. Moleküle erzeugen nicht die für Atome und Ionen charakteristischen Linienspektren, sondern Ausschnitte aus dem kontinuierlichen Spektrum, sogenannte Molekülbanden. Molekülbanden (z.B. TiO (Titanoxid)) werden nur in Spektren von Sternen der „kühlsten" Spektralklasse M beobachtet.

Das Herzsprung-Russel-Diagramm:



In ein **Hertzsprung-Russel-Diagramm (HRD)** werden Sterne entsprechend ihrer **Spektralklasse** und ihrer **Strahlungsleistung bzw. Leuchtkraft** eingetragen.

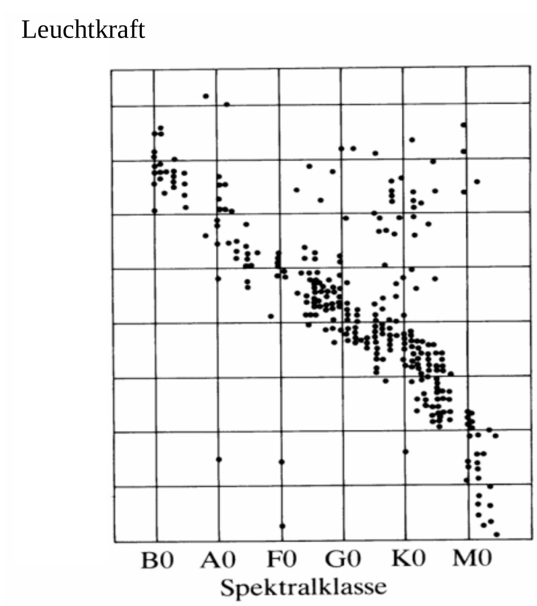
Beachte:

- Die Oberflächentemperatur der Sterne nimmt nach rechts ab.
- Leuchtkraft ist eine andere Bezeichnung für die Strahlungsleistung. Die Einheiten auf der Hochwertachse lassen wir vorerst noch weg. Welche Werte hier eingetragen werden müssen, lernen wir auf S. 227. Dort werden wir auch sehen, dass häufig auf der Hochwertachse anstelle der Leuchtkraft die absolute Helligkeit der Sterne aufgetragen wird.

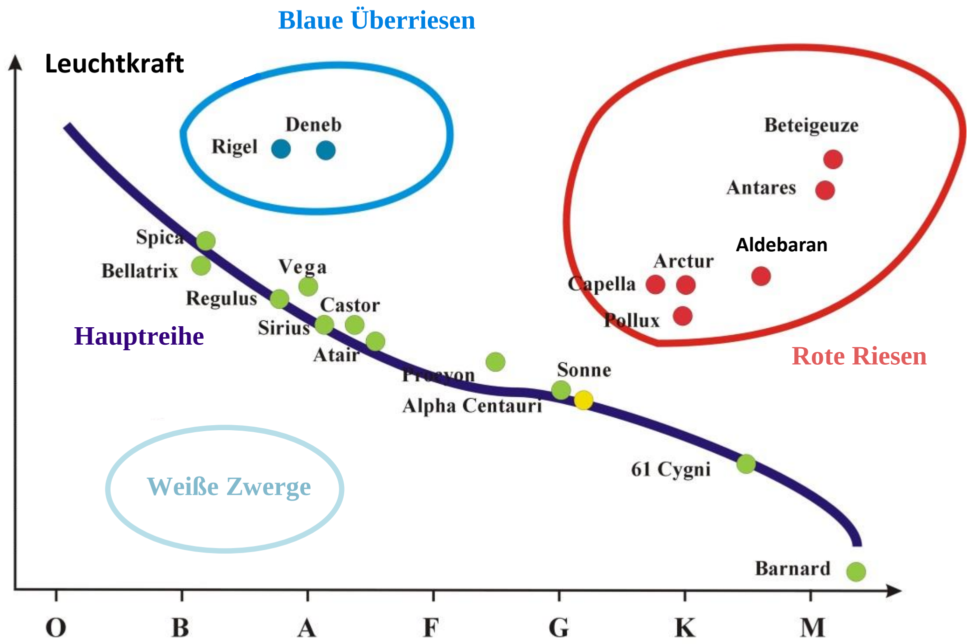
Das oben gezeichnete HRD enthält bekannte Sterne des nördlichen Sternhimmels, die Sonne, Alpha Centauri, den Nachbarstern der Sonne, den Stern 61 Cygni, von dem Friedrich Bessel als erster eine Fixsternparallaxe messen konnte (vgl. S. 202, Aufgabe 2 auf S. 262), und den Barnardschen Pfeilstern, der für seine relativ starke Eigenbewegung bekannt ist.

Der Diagrammtyp ist nach dem dänische Astronomen **Ejnar Hertzsprung** und dem amerikanischen Astronomen **Henry Norris Russel** benannt, die **1911** bzw. **1913** als Erste entsprechende Diagramme zeichneten. Sie verwendeten als repräsentative Sternauswahl die Plejaden und Hyaden (offene Sternhaufen im Sternbild Stier) bzw. die sonnennächsten sichtbaren Sterne.

Die Abbildung rechts zeigt das Originaldiagramm von Russel.



Auffällig ist, dass die Sterne im HRD nicht gleichmäßig verteilt sind, sondern sich auf unterschiedliche Bereiche konzentrieren:



Die meisten Sterne finden sich in der „**Hauptreihe**“.

Rote Riesen sind Sterne mit relativ niedriger Temperatur aber großer absoluter Helligkeit und Leuchtkraft. Sie liegen rechts oben im HRD.

Links von den Roten Riesen aber oberhalb der Hauptreihe befinden sich heiße und leuchtkräftige **Blaue Überriesen.**

Links unten im Diagramm finden sich einzelne **Weiße Zwerge**, die sehr heiß sind, aber nur eine geringe Leuchtkraft haben.

Beschriftung der Hochwertachse des HRD:

Auf der Hochwertachse des HRD kann entweder die Leuchtkraft L des Sterns bzw. seine **relative Leuchtkraft L^*** bezogen auf die Leuchtkraft der Sonne $\left(L^* = \frac{L}{L_\odot}\right)$ aufgetragen werden **oder** die **absolute Helligkeit M**.

Den **Zusammenhang zwischen L^* und M** erhalten wir aus dem Psychophysischen Gesetz

$$m_1 - m_2 = -2{,}5 \cdot lg\,\frac{E_1}{E_2} \qquad (\text{vgl. S. } 207\ \ )$$

Wir wenden das Psychophysische Gesetz auf einen Stern und die Sonne an.

Die Strahlungsintensitäten schreiben wir in Abhängigkeit von den Leuchtkräften. Dabei verwenden wir den Zusammenhang

$$E = \frac{L}{4\pi r^2} \qquad (\text{vgl. S. } 203)$$

An die Stelle der relativen Helligkeiten m_1 und m_2 setzen wir die absolute Helligkeit M des Sterns und die absolute Helligkeit $M_\odot$ der Sonne. Deshalb setzen wir bei Stern und Sonne die Entfernung auf $r = 10\,pc$.

$$M - M_\odot = -2{,}5 \cdot lg\left(\frac{\frac{L}{4\pi(10\,pc)^2}}{\frac{L_\odot}{4\pi(10\,pc)^2}}\right) = -2{,}5 \cdot \lg L^*$$

Mit der absoluten Helligkeit der Sonne $M_\odot = 4{,}83$ *(FS 43)* folgt:

$$\boxed{\boldsymbol{M = 4{,}83 - 2{,}5 \cdot \lg L^*} \quad \text{bzw.} \quad \boldsymbol{L^* = 10^{\frac{4{,}83 - M}{2{,}5}}}}$$

Die Werte für die absoluten Helligkeiten (oder relativen Leuchtkräfte) auf der Hochwertachse des HRD findet man mit dem Entfernungsmodul $m - M = 5 \cdot lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right)$. Dazu bestimmt man für nahe Sterne die scheinbare Helligkeit m und mit der Fixsternparallaxe die Entfernung r.

Rechenbeispiel: Welche relative Leuchtkraft entspricht welcher absoluten Helligkeit?

Wie berechnen die relative Leuchtkraft der Sterne Spika (α-Vir) in der Jungfrau und des Barnardschen Pfeilsterns:

Die Sonne hat die absolute Helligkeit $M_\odot = 4{,}83$

Spika hat die absolute Helligkeit $\boldsymbol{M = -3{,}5} \quad \Rightarrow \qquad \boldsymbol{L^*} = 10^{\frac{4{,}83+3{,}5}{2{,}5}} \approx \mathbf{2148}$

Der **Barnardsche Pfeilstern** hat die absolute Helligkeit $\boldsymbol{M = 13{,}2} \quad \Rightarrow \qquad \boldsymbol{L^*} = 10^{\frac{4{,}83-13{,}2}{2{,}5}} \approx \mathbf{4{,}5 \cdot 10^{-4}}$

So zeichnet man ein HRD:

1) Die absoluten Helligkeiten werden auf der Hochwertachse in gleichen Schritten etwa von $M = 15$ bis $M = -8$ aufgetragen. (Auswendig merken!)

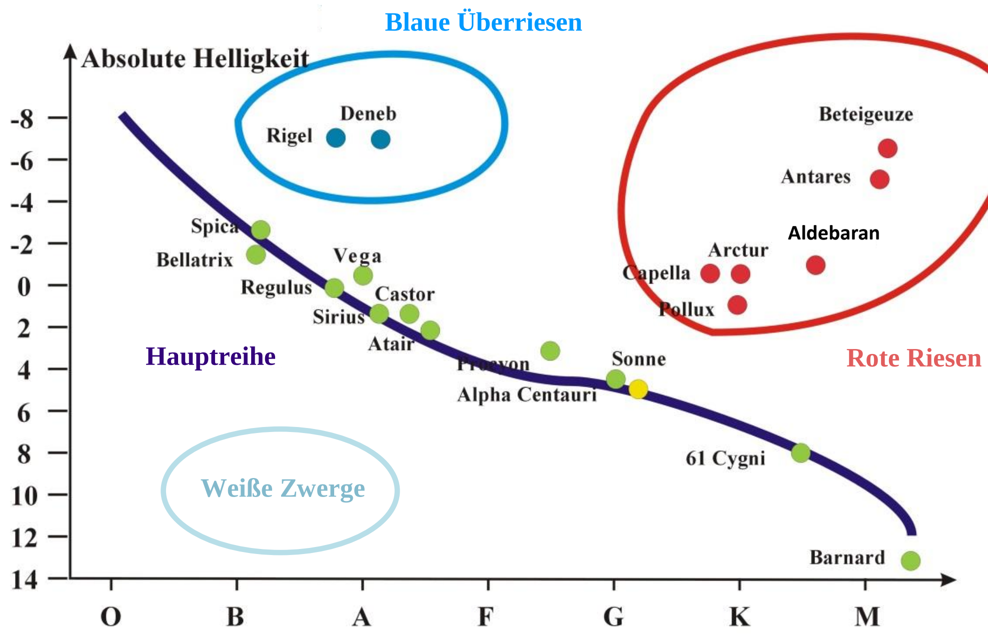
2) Auf der Rechtswertachse werden die Spektralklassen O-B-A-F-G-K-M (Merkregel!) aufgetragen. Die Abstände können auch hier gleich gewählt werden.

3) Trage die Sonne ins HRD ein. Die Sonne ist ein G2 Stern und hat die absolute Helligkeit $M_\odot = 4{,}83$ (Formelsammlung).

4) Skizziere die Hauptreihe in das HRD (geschwungene Linie von links oben nach rechts unten durch die Sonne).

5) Trage nun ungefähr die Lage der Roten Riesen und Weißen Zwerge ein.

Wenn anstelle der absoluten Helligkeit M an der Hochwertachse des HRD die relative Leuchtkraft L^* auftragen werden soll, muss man $L^* = 10^{\frac{4{,}83-M}{2{,}5}}$ die den absoluten Helligkeiten M entsprechenden relativen Leuchtkräfte L^* berechnen.



Die Spektren von Hauptreihensternen und Roten Riesen, Überriesen oder Weißen Zwergen unterscheiden sich hinsichtlich der Schärfe der Absorptionslinien in ihren Spektren.

Um die Position eines beliebigen Sterns im HRD zu finden, muss man also nur noch aus dem Sternspektrum die Spektralklasse bestimmen.

Spektroskopische Entfernungsmessung:

Das HRD ist insbesondere ein wichtiges **Hilfsmittel zur Entfernungsbestimmung**:

- Die **absolute Helligkeit M** eines Sterns kann, wenn Spektralklasse und Zugehörigkeit des Sterns zu einer Sterngruppe im HRD (Hauptreihensterne, Rote Riesen, …) bekannt sind, direkt aus dem HRD abgelesen werden.
- Die **scheinbare Helligkeit m** des Sterns wird durch Vergleich mit Sternen bekannter scheinbarer Helligkeit oder über die Strahlungsintensität gemessen (vgl. S. 203).

$\Longrightarrow$ Die **Entfernung des Sterns** kann mit dem **Entfernungsmodul** $\boldsymbol{m - M = 5 \cdot lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right)}$ berechnet werden.

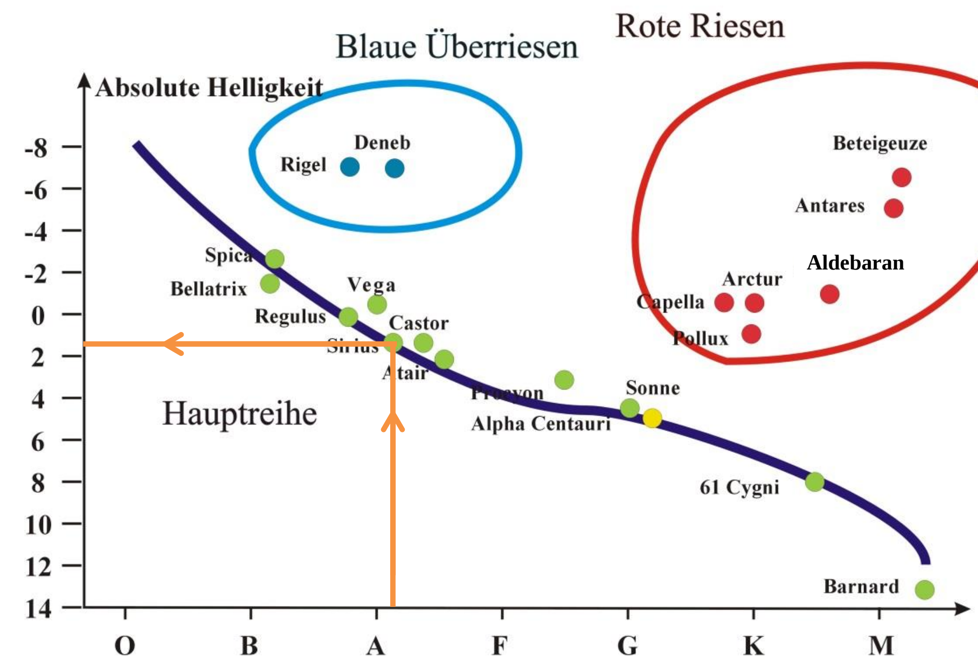
Diese Methode, die Entfernung eines Sterns zu bestimmen, nennt man **spektroskopische Entfernungsmessung**.

Wenn sich das Spektrum eines Sterns so genau analysieren lässt, dass der Ort des Sterns im HRD eindeutig festgelegt werden kann, dann lässt sich die absolute Helligkeit M des Sterns aus dem HRD ablesen.

Der Stern wird zur **Standardkerze** (vgl. S. 210).

Rechenbeispiel: Die Entfernung des Sirius

Die sorgfältige Auswertung des Sternspektrums von Sirius ergibt: Sirius ist ein Hauptreihenstern der Spektralklasse A1.



Die Position des Sirius auf der Hauptreihe erlaubt es, die absolute Helligkeit des Sirius abzulesen (vgl. orange Pfeile im HRD!): $M_{\text{Sirius}} \approx 1{,}4$

Das Entfernungsmodul liefert nun mit der gemessenen scheinbaren Helligkeit $m_{\text{Sirius}} = -1{,}46$ die Entfernung des Sirius:

$$m - M = 5 \cdot lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right) \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{r} = 10^{\frac{m-M}{5}} \cdot 10\,pc = 10^{\frac{-1{,}46-1{,}4}{5}} \cdot 10\,pc \approx 2{,}68\,pc \approx \mathbf{8{,}7\ Lj}$$

Grenze der spektroskopischen Entfernungsmessung:

Um die Spektralklasse bestimmen zu können, muss die scheinbare Helligkeit eines Sterns ausreichen. Erfahrungsgemäß muss gelten: $m \leq 14$.

Die größte Leuchtkraft und damit die kleinsten Werte der absoluten Helligkeit M haben in der Hauptreihe die O-Sterne. Ihre absolute Helligkeit liegt bei $M \approx -6$.

Damit folgt: $\boldsymbol{r_{max}} = 10^{\frac{14+6}{5}} \cdot 10\,pc = 10^5\,pc \approx \mathbf{330\,000\ \boldsymbol{Lj}}$

Die „Reichweite“ der „spektroskopischen Parallaxe“ ist also größer als die Reichweite der Fixsternparallaxe (vgl. S. 201f). (Dafür ist dieses Verfahren weniger genau.)

Bestimmung von Sternradien:

Die Bezeichnung „Roter Riese" und „Weißer Zwerg" weisen auch auf die Größe eines Sterns hin. Gibt das HRD Auskunft über die Größe eines Sterns?

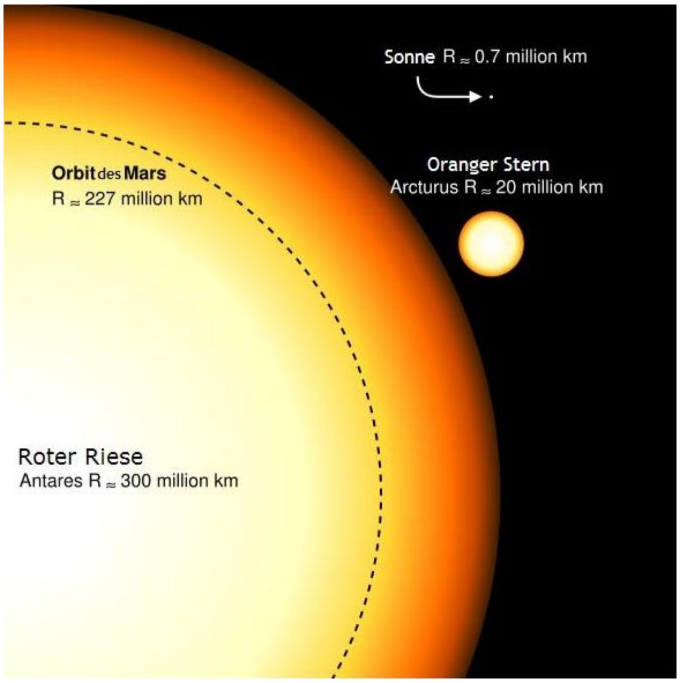
Ist der **Ort eines Sterns im HRD** bekannt, so kennt man mit der Spektralklasse seine **Temperatur** $\boldsymbol{T}$ und mit der absoluten Helligkeit seine relative **Leuchtkraft** $\boldsymbol{L}^*$.

Mit dem **Gesetz von Stefan und Boltzmann** $\boldsymbol{L = \sigma \cdot A \cdot T^4 = \sigma \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot T^4}$ kann man den **Sternradius** $\boldsymbol{R}$ abschätzen:

$$\boldsymbol{L}^* = \frac{L}{L_\odot} = \frac{\sigma \cdot A \cdot T^4}{\sigma \cdot A_\odot \cdot T_\odot{}^4} = \frac{R^2 \cdot T^4}{R_\odot{}^2 \cdot T_\odot{}^4} = \boldsymbol{R^{*2} \cdot T^{*4}}$$

$\Longrightarrow$ **relativer Sternradius** (verglichern mit der Sonne):

$$\boxed{\boldsymbol{R^* = \frac{\sqrt{L^*}}{T^{*2}}}}$$



Die Größen bekannter Fixsterne im Vergleich:

Wie stark Sterne beim Übergang in das Rote-Riesen-Stadium anwachsen können, zeigt sich, wenn man deren Größe mit der Größe der Sonne vergleicht. Die Sonne nimmt sich gegen Sterne wie **Beteigeuze** ($R^* = 950 \text{ bis } 1200$), **Antares** ($R^* = 820$) oder **Deneb** ($R^* = 100 \text{ bis } 200$) wie ein Zwerg aus.

Zu den größten bekannten Sternen gehören **KY Cygni** und **NML Cygni** im Sternbild Schwan mit bis zu 2850 bzw. 2775 Sonnenradien. Einer der größten Sterne in der Milchstraße, deren Radius relativ genau bestimmt werden konnte, ist der Stern **VY Canis maioris** im Sternbild Großer Hund. Er ist etwa 1420-mal so groß wie die Sonne. Das Volumen der Sonne würde etwa 2,9 Milliarden mal in das Volumen des Sterns VY Canis maioris passen.

Rechenbeispiel:

Bestimme den Durchmesser des Roten Riesen Arctur (α Boo) im Sternbild Bootes und vergleiche ihn mit dem Sonnendurchmesser.
Unter welchem Winkel sieht man den Stern, wenn er 36,7 Lj entfernt ist?

Lösung:

Dem HRD (z.B. auf S. 230) entnimmt man für Arctur die absolute Helligkeit $M \approx -0{,}5$ und die Spektralklasse K bis M

(Tabellenwerte: $M = -0{,}3$, Spektralklasse K2).

relative Leuchtkraft:

$$L^* = 10^{\frac{M_\odot - M}{2{,}5}} = 10^{\frac{4{,}83+0{,}3}{2{,}5}} \approx 1{,}13 \cdot 10^2 \approx 100$$

Oberflächentemperatur: $T = 4290\ K$ (Tabellenwert)

relative Oberflächentemperatur:

$$T^* = \frac{T}{T_\odot} = \frac{4290\ K}{5800\ K} \approx 0{,}74$$

relativer Sternradius:

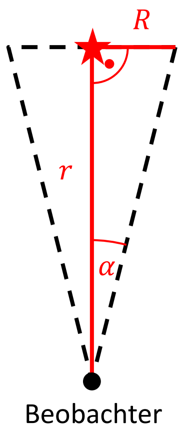
$$\boldsymbol{R^*} = \frac{\sqrt{L^*}}{T^{*2}} \approx \frac{\sqrt{100}}{0{,}74^2} \approx \mathbf{18{,}3}$$

tatsächlicher Sternradius: $\boldsymbol{R} = R^* \cdot R_\odot = 18{,}3 \cdot 6{,}96 \cdot 10^5\ km \approx \mathbf{12{,}2 \cdot 10^6}\ \boldsymbol{km}$

Winkel, unter dem der Stern erscheint:

$$\tan\alpha = \frac{R}{r} = \frac{12{,}2 \cdot 10^9\ m}{36{,}7 \cdot 9{,}46 \cdot 10^{15}\ m} \approx 35{,}1 \cdot 10^{-9}$$

$$\Longrightarrow \quad \alpha \approx (2{,}01 \cdot 10^{-6})^\circ \approx 0{,}0072''$$



Der Stern erscheint also unter dem Winkel $\mathbf{2 \cdot \boldsymbol{\alpha} \approx 0{,}014}$ **Bogensekunden**.

Die Masse-Leuchtkraft-Beziehung:

Sir Arthur Stanley Eddington (1882 – 1944) untersuchte den Zusammenhang zwischen Masse und Leuchtkraft bei Doppelsternen. 1924 veröffentlichte er eine wichtige Erkenntnis:

Für **Hauptreihensterne** gilt näherungsweise $\boxed{\boldsymbol{L \sim m^3}}$ *(FS 14)*

(empirische Masse-Leuchtkraft-Beziehung)

Der Exponent schwankt für die verschiedenen Sterne zwischen 2,7 und 3,5 und ist im Mittel 3.

Weil auch die Sonne ein Hauptreihenstern ist, gilt für die relative Leuchtkraft L^* und die relative Masse m^*:

$$\boldsymbol{L^*} = \frac{L}{L_\odot} = \frac{k \cdot m^3}{k \cdot m_\odot{}^3} = \frac{m^3}{m_\odot{}^3} = \boldsymbol{(m^*)^3}$$

Dabei ist k der für Stern und Sonne gleiche Proportionalitätsfaktor aus $L \sim m^3$.

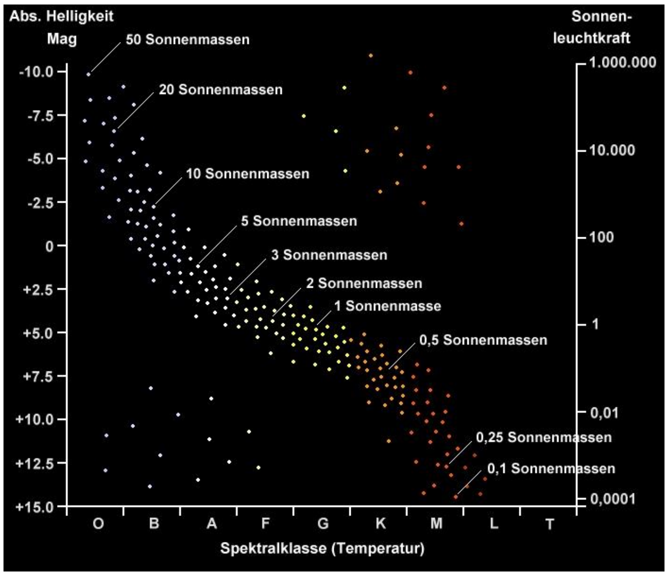
Beachte:

- Zum Lösen von Aufgaben benötigt man die **Gleichung $\boldsymbol{L^* = (m^*)^3}$**. Mit der direkten Proportionalität $L \sim m^3$ kann man nichts berechnen!
- Die empirische Masse-Leuchtkraft-Beziehung gilt näherungsweise auch für Hauptreihensterne, die keine Doppelsterne sind. **Für Weiße Zwerge und Rote Riesen gilt die Beziehung nicht**!

<u>Folgerung aus der Masse-Leuchtkraft-Beziehung</u>:

Im HRD nehmen auf der Hauptreihe die Massen der Sterne von rechts unten nach links oben zu.

Größere Masse führt also zu größerer Leuchtkraft.



Rechenbeispiel:

Der Barnardsche Pfeilstern ist ein Hauptreihenstern der Spektralklasse M5.
Schätze mithilfe des HRD seine relative Masse ab!

Lösung:

Im HRD hat ein Hauptreihenstern der Spektralklasse M5 eine absolute Helligkeit von etwa 13.
Der Barnardsche Pfeilstern hat die absolute Helligkeit $M = 13{,}3$.

relative Leuchtkraft: $L^* = 10^{\frac{M_\odot - M}{2{,}5}} = 10^{\frac{4{,}83 - 13{,}3}{2{,}5}} \approx 4{,}1 \cdot 10^{-4}$

Masse-Leuchtkraft-Beziehung: $\boldsymbol{m^*} = \sqrt[3]{L^*} = \sqrt[3]{4{,}1 \cdot 10^{-4}} \approx \mathbf{0{,}074}$

Die Masse des Barnardschen Pfeilsterns beträgt also etwa die 7,4% der Sonnenmasse.

8) Die Entwicklung von Sternen:

Die Entstehung eines Sterns:

Die Entstehung eines Sterns in einer Galaxie beginnt mit der **Verdichtung einer Wolke aus interstellarer Materie**. Interstellare Materie besteht hauptsächlich aus Wasserstoff. Solche Materieverdichtungen treten bei Wechselwirkungen zwischen Galaxien, im Extremfall Kollisionen oder Verschmelzungen von Galaxien, auf. Man spricht in diesem Zusammenhang von „**Starburst-Galaxien**". Starburst-Galaxien enthalten in der Regel große Mengen kosmischen Staubs, der die Strahlungsleistung der jungen Sterne absorbiert und als Infrarotstrahlung wieder abgibt. Deshalb lassen sich Sternentstehungsgebiete in Starburst-Galaxien besonders gut mit Infrarot-Teleskopen identifizieren (vgl. Kapitel I, S. 58f).

Ein Beispiel für eine Starburst-Galkaxie ist die **Galaxie M82** im Sternbild „Großer Bär". Die beiden Bilder zeigen eine HST-Aufnahme der Galaxie (links) und eine Überlagerung von Bildern des HST (sichtbares Licht), Spitzer (Infrarot) und Chandra (Röntgenstrahlung) (rechts). Im rechten Bild wird interstellare Materie sichtbar, die im otpischen Wellenlängenbereich verborgen bleibt.

Auch Dichtwellen in den Spiralarmen einer Galaxie oder Schockwellen infolge einer Sternexplosion (Supernova) in einer Galaxie führen zu Verdichtungen der interstellaren Materie.

Solche Materieverdichtungen sind vor leuchtendem Hintergrund als **Dunkelwolken** oder **Globulen** beobachtbar (Bild: Dunkelwolken im Adlernebel).

Je mehr Masse eine Globule hat, desto mehr interstellares Gas zieht sie aus der Umgebung durch Gravitation an (**Akkretionsphase**). Dabei wächst im Zentrum der Globule der Gravitationsdruck und damit die Temperatur.

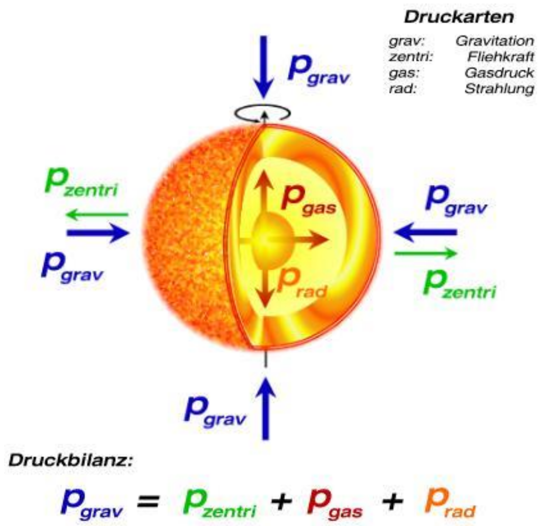
Wenn die Masse einer komprimierten Gaswolke ausreichend groß ist (mehr als 0,07 Sonnenmassen), so dass im Zentrum einer Globule eine Temperatur von etwa 3 Millionen Grad erreicht wird, zündet dort **Kernfusion**. Wasserstoffkerne verschmelzen zu Heliumkernen. Dabei wird Energie freigesetzt. Mit dem Einsetzen der Kernfusion ist ein (leuchtender) Stern geboren.

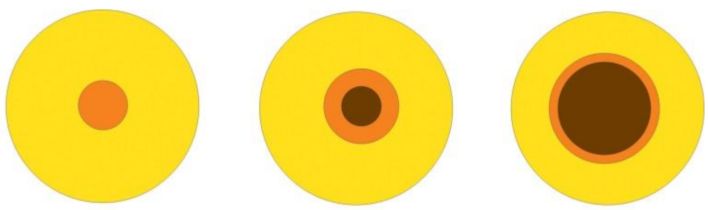
2013 fotografierte das HST im Sternbild Schwan einen $4500\,Lj$ entfernten **Porotostern**, dessen Staubhülle durch die UV-Strahlung einer nur $15\,Lj$ entfernten Sternansammlung wie ein Kometenschweif zur Seite geblasen wird.

Die Fusion von Wasserstoff zu Helium erfolgt in mehreren Schritten (vgl. Kap IV, S. 181). Gaswolken, deren Masse mit mindestens der 13-fachen Jupitermasse bzw. der 0,012-Fachen Sonnenmasse gerade ausreicht, um den ersten Schritt der Proton-Proton-Reaktion (vgl. Kap. VI, S. 81), die Fusion von Wasserstoffkerne zu Deuteriumkernen, zu ermöglichen, führen zu einer Entwicklungsstufe, die zwischen einem großen Planeten und einem Stern anzusiedeln ist. Man bezeichnet solche Objekte als **Braune Zwerge**. Weil auch in Braunen Zwergen Fusionsprozesse ablaufen, wurden sie auch „hustende Sterne" genannt (vgl. S. 252).

Die Entwicklungszeit eines Sterns:

Während annähernd der gesamten Lebenszeit eines Sterns fusioniert im Kern des Sterns Wasserstoff zu Helium. Dabei nimmt der Wasserstoffgehalt im Kern des Sterns ab, bis der Kern fast komplett aus Helium besteht. Diese stabile Phase im Leben eine Sterns nennt man „**Entwicklungszeit**“ $\boldsymbol{\tau}$. Sie ist gekennzeichnet durch das „**hydrostatische Gleichgewicht**“ zwischen dem Gravitationsdruck nach innen und dem Strahlungsdruck sowie dem durch die Zentrifugalkraft des rotierenden Sterns und dem Gasdruck des heißen Plasmas im Kern des Sterns verursachten Druck nach außen. Die Entwichlungszeit eines Sterns dauert, abhängig von der Masse des Sterns, zwischen mehreren Millionen Jahren bei schweren Sternen und etlichen Milliarden Jahren bei leichten Sternen.





Wasserstoff-Kern | Bildung eines Helium-Kerns | Wachstum des Helium-Kerns

Abschätzung der Dauer des Hauptreihenstadiums:

> Die Entwicklungszeit hängt vom Vorrat an Kernbrennstoff ab und von der Geschwindigkeit, mit der dieser verbraucht wird.

Der Vorrat an Kernbrennstoff ist direkt proportional zur Sternmasse m: $\tau \sim m$.

Die Geschwindigkeit des Verbrauchs ist direkt proportional zur Leuchtkraft L $\tau \sim \frac{1}{L}$

$$\Rightarrow \quad \tau \sim \frac{m}{L}$$

Mit der Masse-Leuchtkraft-Beziehung $L \sim m^3$ folgt: $\boxed{\boldsymbol{\tau \sim \frac{1}{m^2}}}$

Es gilt also: **Je massereicher ein Stern ist, desto kürzer ist seine Lebenserwartung.**

$$\text{Aus } \tau \sim \frac{1}{m^2} \text{ folgt } \tau = k \cdot \frac{1}{m^2} \quad \Rightarrow \quad \tau^* = \frac{\tau}{\tau_\odot} = \frac{k \cdot \frac{1}{m^2}}{k \cdot \frac{1}{{m_\odot}^2}} = \frac{1}{(m^*)^2} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\boldsymbol{\tau = \frac{\tau_\odot}{(m^*)^2}}}$$

Die **Entwicklungszeit der Sonne** beträgt etwa $\boldsymbol{\tau_\odot = 7,0 \cdot 10^9\ a}$.

Weil der Wasserstoffvorrat in den Kernen der Sterne begrenzt ist, ist auch ihre Entwicklungszeit τ begrenzt. Sterne mit der größten bekannten Leuchtkraft von etwa der 10^6-fachen der Leuchtkraft der Sonne können wegen ihrer extrem großen Abstrahlung nur ein paar Millionen Jahre als Hauptreihensterne existieren. Wären sie – wie die Sonne – vor ein paar Milliarden Jahren entstanden, so wären sie längst von der Hauptreihe des HRD verschwunden.

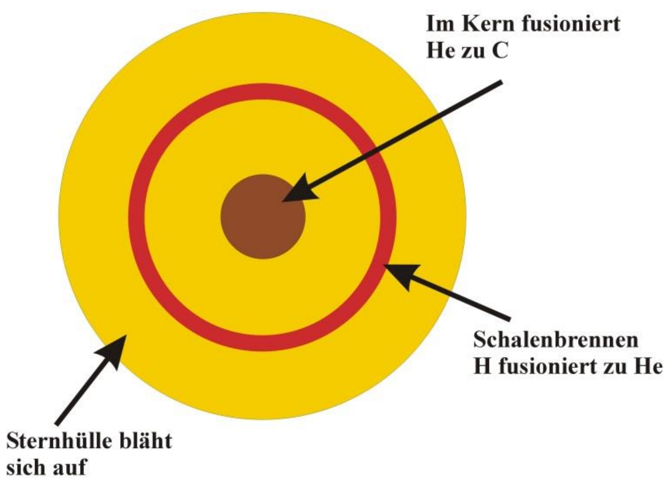
Rechenbeispiel:

Wie lang dauert bei einem Stern mit 50-facher Sonnenmasse das Hauptreihenstadium, also die Zeit, während derer im Kern des Sterns Kernfusion von Wasserstoff zu Helium stattfindet?

Lösung: Entwicklungszeit: $$\tau = \frac{\tau_\odot}{(m^*)^2} = \frac{7{,}0 \cdot 10^9\ a}{50^2} \approx 2{,}8 \cdot 10^6\ a$$

Bei einem Stern von 50 Sonnenmassen würde die Entwicklungszeit also nur einige Millionen Jahre betragen, bei einem Stern mit halber Sonnenmasse 4-mal so lang wie bei der Sonne.

Das Rote-Riesen-Stadium:



Wenn der Kern eines Sterns kaum noch Wasserstoff enthält, erlischt die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium. Da nun der Strahlungsdruck wegfällt, kontrahiert der Gravitationsdruck der Sternhülle den nun aus Helium bestehenden Kern. Die dabei freiwerdende Gravitationsenergie führt zu einer starken Erwärmung des Kerns bis schließlich bei einer Temperatur von etwa 600 Millionen Grad im Kern die **Fusion von Helium zu Kohlenstoff** einsetzt. Durch Gravitationsdruck und Energieabstrahlung aus dem Kern heizt sich auch die Sternmaterie außerhalb des Kerns auf. In den innersten Bereichen der Sternhülle setzt Fusion von Wasserstoff zu Helium ein (**Schalenbrennen**). Die Fusionszone in der Sternhülle wandert allmählich von innen nach außen.

Der thermische Druck von innen nach außen führt zu einem **Aufblähen des Sterns**.
An der vergrößerten Oberfläche kühlt der Stern ab. Der Stern wird zum **Roten Riesen**.

Durch einen **Sternwind**, der etwa 10 000-mal so stark ist, wie der Sonnenwind verliert der Rote Riese erheblich an Masse. Allerdings bewirkt dieser Massenverlust im Roten-Riesen-Stadium noch keine strukturelle Veränderung.

Beispiele für Rote Riesen: **Beteigeuze** im Orion, **Aldebaran** im Stier, **Capella** im Fuhrmann, **Arctur** im Bootes, **Antares** im Skorpion

Rote Riesen sind am Nachthimmel mit bloßem Auge an ihrer rötlichen Farbe erkennbar.

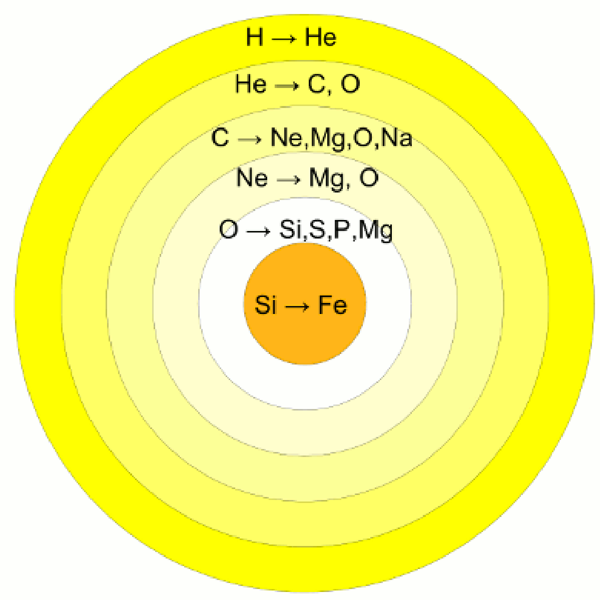
Beteigeuze ist der (vom Sternbild aus gesehen) rechte Schulterstern des Orion. Der Radius von Beteigeuze ist etwa 1000-mal so groß wie der Sonnenradius und ihre Strahlungsleistung ist etwa 135 000-mal so groß, wie die der Sonne.

9) Kernfusion: Energieerzeugung und Nukleosynthese

Synthese chemischer Elemente in Sternen:

Falls die Masse des Kerns groß genug ist, kann der Kreislauf „Kontraktion → Aufheizung → Zünden einer neuen Kernfusion → Erschöpfung der Kernbrennstoffe → Kontraktion …“ mehrmals durchlaufen werden: **H-Brennen, He-Brennen, C-Brennen, Ne-Brennen, O-Brennen, Si-Brennen**.

Beim Si-Brennen werden Siliziumkerne zu Eisenkernen verschmolzen. Je schwerer die an einer Fusionsreaktion beteiligten Atomkerne sind, desto höher ist die für das Zünden der Fusionsreaktion nötige Temperatur und desto kürzer dauert der Fusionsprozess im Sternkern. Bei einem Stern mit 25 Sonnenmassen dauert beispielsweise im Sternkern das H-Brennen bei einer Zündtemperatur von etwa 15 Millionen Grad 7 Millionen Jahre. Das Si-Brennen erfordert hingegen eine Zündtemperatur von 2,7 Milliarden Grad, dauert aber nur noch etwa einen Tag!

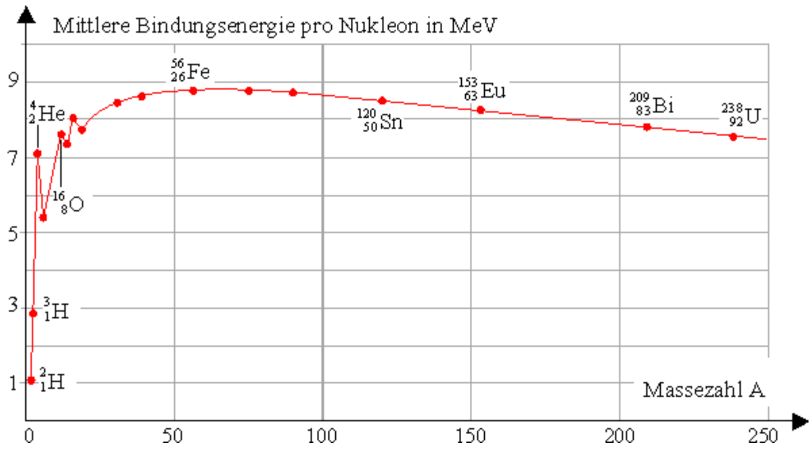


Im Lauf der Zeit nimmt der Aufbau eines Roten Riesen mit großer Masse eine **zwiebelschalenartige Struktur** an: Von außen nach innen nimmt die Temperatur zu und damit finden in den Hüllenbereichen zum Kern hin Fusionsreaktionen immer höherer Ordnung statt.

Die Energiefreisetzung bei der Verschmelzung zweier leichterer Atomkerne zu einem schwereren Atomkern beruht auf der für unterschiedliche Elemente **unterschiedlich großen mittleren Kernbindungsenergie pro Nukleon** (vgl. S. 238). Als Nukleonen bezeichnet man die Kernbausteine, also Protonen und Neutronen. Die Kernbindungsenergie gibt an, wie viel Energie frei wird, wenn ein Atomkern aus seinen Bestandteilen zusammengebaut wird bzw. wie viel Energie aufgewendet werden muss, um den Atomkern in seine Bestandteile zu zerlegen. Sie ist somit ein **Maß für die Stabilität des Kerns**. Weil bei der Fusion von Helium zu Kohlenstoff Energie frei wird, muss also ein Kohlenstoffkern stabiler sein als ein Heliumkern. Mit anderen Worten: Die mittlere Kernbindungsenergie pro Nukleon muss für Kohlenstoff einen größeren Betrag haben als für Helium.

Die Energiedifferenz ΔE wird bei der Kernfusion frei. Nach der relativistischen Masse-Energie-Beziehung $\boldsymbol{\Delta E = \Delta m \cdot c^2}$ von Einstein äußert sich die freigesetzte Reaktionsenergie in einem **Massendefekt $\boldsymbol{\Delta m}$**: Die Masse eines Kohlenstoffkerns ist kleiner als die Summe der Massen der Betsandteile, aus denen er fusioniert wurde. (Vgl. Kap. VIII, S. 413)

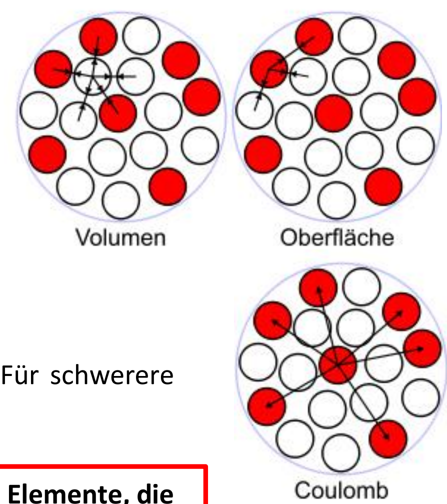
Die mittlere Kernbindungsenergie pro Nukleon:



Die **mittlere Kernbindungsenergie pro Nukleon** nimmt bis zum Eisen (Fe) zu und dann ab. Deshalb ist eine Kernfusion nur bis zum Eisen mit einer Energieabgabe verbunden. Man nennt Reaktionen, bei denen Energie frei wird, **exotherm**. Nur solche Reaktionen laufen selbständig ab.

Wenn ein Stern genügend Masse enthält, können im Kern des Sterns chemische Elemente bis hin zum **Eisen** fusionieren; dann ist allerdings bei weiterer Kontraktion des Kerns kein Energiegewinn durch Fusion mehr möglich. Die Fusionsreaktion im Kern kommt zum Erliegen. Bei weniger schweren Sternen enden die Fusionszyklen bereits mit entsprechend leichteren Elementen im Kern.

Warum die mittlere Kernbindungsenergie pro Nukleon bis zum Eisen ansteigt und dann wieder abfällt, kann man mithilfe des **Tröpfchenmodells** für Atomkerne plausibel machen: Die Nukleonen eines Kerns werden durch Kernkräfte (starke Wechselwirkung) zusammengehalten. Diese Kernkräfte sind stark, haben aber eine sehr geringe Reichweite, die nur bis zum benachbarten Nukleon reicht (vgl. Kap. IX, S. 509).



Je mehr unmittelbare Nachbarn ein Nukleon im Kern hat, desto stärker ist es gebunden. Nukleonen im Inneren des Kerns sind also stärker gebunden als Nukleonen an der Kernoberfläche. Die Stabilität eines Kerns nimmt mit seiner Nukleonenzahl und damit mit seinem Volumen zu, weil mehr Nukleonen im Inneren des Kerns liegen und damit viele Nachbarn haben.

Gleichzeitig führt eine zunehmende Protonenzahl im Kern zu Instabilität. Die positiv geladenen Protonen stoßen sich durch Coulombkräfte gegenseitig ab, was den Zerfall des Kerns begünstigt.

Bis zum Eisen überwiegt der zuerst beschriebene Volumeneffekt. Für schwerere Kerne als Eisen der Coulombeffekt.

In den Sternkernen entstehen durch Kernfusion alle chemischen Elemente, die nicht schwerer als Eisen sind.

Bereits die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium kann in unterschiedlichen Prozessen ablaufen (vgl. Kap. II, S. 70). Mit welcher Wahrscheinlichkeit welcher Prozess stattfindet, hängt von der Temperatur und damit von der Masse des Sterns ab. In Kap IV wurde auf S. 181 die **Proton-Proton-Reaktion** erläutert. Sie ist mit 98% die wichtigste Fusionsreaktion von Wasserstoff zu Helium in der Sonne. Für die p-p-Reaktion sind Temperaturen von mindestens 5 Millionen Grad notwendig.

Eine weitere wichtige Fusionsreaktion ist der **CNO- oder Bethe-Weizsäcker-Zyklus**, bei dem Protonen zu Kohlenstoff-Kernen ($C12$ und $C13$) und Stickstoffkernen ($N14$ und $N15$) verschmelzen. Als Zwischenprodukte treten dabei auch Stickstoff-Kerne ($N13$) und Sauerstoff-Kerne ($O15$) auf. Der CNO-Zyklus zündet bei Temperaturen von mindestens 14 Millionen Grad. Die Sonne erzeugt nur etwa 1,6% ihrer Energie über den CNO-Zyklus. Bei schweren Sternen, in deren aufgrund des Gravitationsdrucks Temperaturen von mehr als 30 Millionen Grad herrschen, ist der CNO-Zyklus die dominante Fusionsreaktion.

10) Endstadien von Sternen:

Massenabhängigkeit der Sternentwicklung:

Im Roten-Riesen-Stadium hat der Stern noch nahezu seine gesamte Anfangsmasse. Von ihr hängt es ab, wie er sich am Ende dieses Stadiums weiterentwickelt, wenn im Kern keine Fusionen höherer Ordnung mehr zünden können:

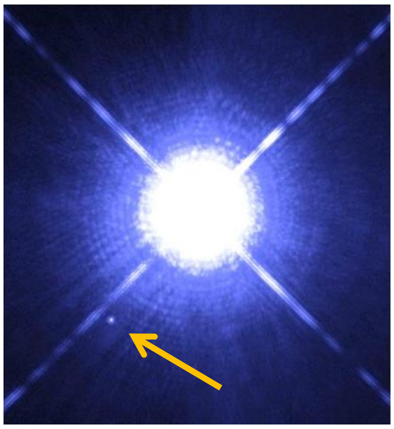
Ausgangsmasse	Massenabstoßung	Restmasse	Endstadium
$m \leq 8 \cdot m_\odot$	**Planetarischer Nebel**	$m < 1{,}4 \cdot m_\odot$	**Weißer Zwerg**
$8 \cdot m_\odot < m < 15 \cdot m_\odot$	**Supernova**	$1{,}4 \cdot m_\odot < m < 3 \cdot m_\odot$	**Neutronenstern**
$m > 15 \cdot m_\odot$	**Supernova**	$m > 3 \cdot m_\odot$	**Schwarzes Loch**

In jedem Fall versucht der Stern einem Gravitationskollaps entgegenzuwirken, in dem er die Sternhülle abstößt.

Planetarische Nebel und Weiße Zwerge:

Bei **leichten Sternen** erfolgt diese Massenabstoßung relativ langsam. Die Sternhülle wird in Form eines starken Sternwindes im Lauf von etwa 10 000 Jahren „weggeblasen“. Man beobachtet ein häufig farbenfrohes, leuchtendes Gebilde, einen **Planetarischen Nebel**
(Bild: Ringnebel im Sternbild Leier).

Der verbleibende Reststern wird durch seine eigene Gravitation weiter kontrahiert, bis er etwa Erdgröße hat. Seine Dichte beträgt dann etwa 1 Tonne pro cm^3 (ein Pkw auf die Größe eines Würfelzuckerstücks zusammengedrückt!) Die Oberflächentemperatur ist hoch (bis zu mehreren 10 000 Grad). Als Reststern bleibt ein **Weißer Zwerg** übrig, der bläulich weißes Licht abstrahlt und langsam auskühlt.



Weiße Zwerge sind häufig die kleineren Komponenten in Doppelsternsystemen (vgl. S. 218ff). Der erste beobachtete Weiße Zwerg ist **Sirius B** der Begleiter des Sirius. Das Bild zeigt Sirius A, den hellsten von der Nordhalbkugel aus sichtbaren Stern, und links unten seinen Partner Sirius B.

Das farbige Leuchten Planetarischer Nebel entsteht infolge von **Photoionisation und Rekombination**: Der heiße Reststern sendet energiereiche UV-Strahlung aus, die Atome der abgestoßenen Sternhülle ionisiert. Dabei entstehen positive Ionen und energiereiche freie Elektronen. Die Ionen fangen die Elektronen ein, befinden sich dann aber in einem hochangeregten energetischen Zustand. Die Energiedifferenz zum Grundzustand geben die Atome schrittweise in Form von elektromagnetischer Strahlung, die teilweise im Bereich des sichtbaren Lichts liegt, ab.

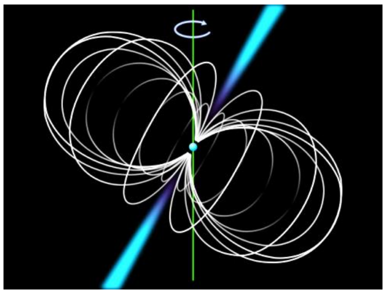
Neutronensterne und Pulsare:

Mittelschwere und schwere Sterne kollabieren aufgrund der enormen Gravitationskräfte so dramatisch, dass bei dem sich aufbauenden außerordentlich hohen Druck die Elektronen in die Atomkerne „gequetscht“ werden. Protonen und Elektronen vereinigen sich dabei zu Neutronen. Ein **Neutronenstern** entsteht. Sein Radius beträgt bei 1,4 bis 3 Sonnenmassen nur 10 bis 20 km. Die Dichte eines solchen Gebildes liegt bei 10^8 t pro cm^3.

➢ Ein würfelzuckergroßes Stück Materie von einem Neutronenstern wiegt etwa 100 Millionen Tonnen!

Das **Pauliprinzip**, eine Regel der Quantenphysik, besagt, dass Fermionen, zu denen unter anderem Neutronen gehören, sich einander nur bis zu einem Mindestabstand annähern können. Die Materie eines Neutronensterns ist so stark komprimiert, dass sie aufgrund des Pauliprinzips nicht mehr weiter zusammengedrückt werden kann. Man spricht von einem „**entarteten Neutronengas**“, das dem Gravitationsdruck einen „**Entartungsdruck**“ entgegensetzt.

Die **Erhaltung des Drehimpulses** $\boldsymbol{D = r \cdot m \cdot v = r^2 \cdot m \cdot \omega}$ mit der Winkelgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}$ führt zu einer starken **Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit** $\boldsymbol{\omega}$ des Sterns, wenn er zu einem Neutronenstern zusammengedrückt wird.

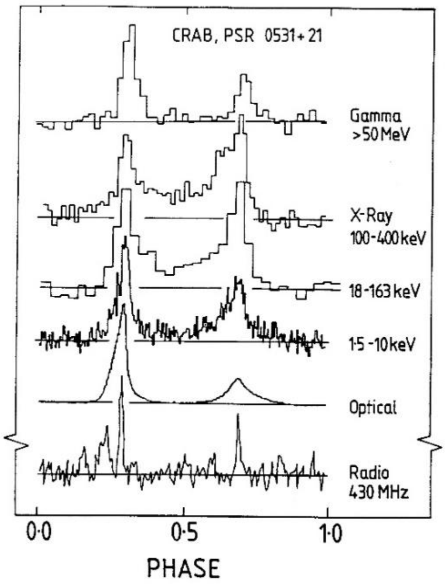


Bei der starken Komprimierung der Materie des Reststerns zu einem Neutronenstern wird auch das Magnetfeld des Sterns zusammengestaucht. Dabei nimmt die Flussdichte des Magnetfelds so stark zu, dass das vom Neutronenstern abgestrahlte Licht sich nicht mehr in alle Richtungen ausbreiten kann, sondern durch das Magnetfeld zu zwei **Jets** gebündelt wird. In der Grafik links ist in der Mitte der rotierende Neutronenstern dargestellt. Die magnetischen Feldlinien sind weiß und die Jets blau eingezeichnet.

Wenn einer der Jets die Erde überstreicht, nimmt der Beobachter auf der Erde eine periodische Helligkeitsänderung wahr. Deshalb heißen solche Neutronensterne **Pulsare**.

Dem Röntgenteleskop Chandra gelangen spektakuläre Aufnahmen vom **Crab-Pulsar** im Crabnebel, einem Supernova-Überrest im Sternbild „Stier“.

Das Bild rechts zeigt eine Überlagerung eines HST-Bildes (sichtbares Licht, rot) und eines Bildes von Chandra (Röntgenstrahlung, blau) vom Crab-Pulsar. Gut erkennbar ist der Jet.



In allen Wellenlängenbereichen variiert wegen der schnellen Rotation die Helligkeit des Crab-Pulsars periodisch mit einer Periodendauer von 33 ms. (vgl. Bild links)

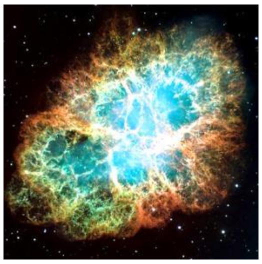
11) Supernovae

Supernova als Kollaps eines schweren Sterns (Typ SN II):

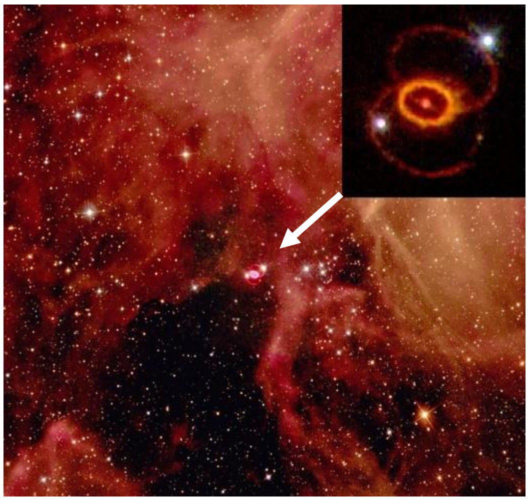
Unmittelbar nach der Kontraktion des Sternkerns zum Neutronenstern explodiert die Hülle des Sterns mit großer Wucht. Diese Erscheinung heißt **Supernova** (Typ SN II).

Wenn der Sternkern vollständig zu Eisen fusioniert ist, kommt die Kernfusion im Kern des Sterns zum Erliegen und der Strahlungsdruck von innen nach außen fällt weg.
Damit wird der Stern instabil: Ein Sternkern von Erdgröße kollabiert unter der eigenen Gravitationskraft auf eine Kugel mit etwa $10\ km$ Radius. Der Sternhülle wird sozusagen der Boden unter den Füßen weggezogen. Sie stürzt aufgrund ihrer Gravitationskraft mit ca. $70\,000\ \frac{km}{s}$ auf den extrem dichten, zu einem Neutronenstern kollabierten Sternkern und wird von diesem zurückgestoßen. Eine Schockwelle wandert von innen nach außen durch den Stern und schleudert die Hüllenmaterie nach außen weg. Die Gasmassen fliegen dabei mit Geschwindigkeiten in der Größenordnung $10\,000\ \frac{km}{s}$ vom Sternkern weg; alles spielt sich innerhalb von Sekunden ab. Während der Explosion strahlt die Supernova heller als eine Galaxie mit 10 Billionen Sternen. Eine Supernova ist das Ereignis im nahen Kosmos, das die größte bekannte Leistung freisetzt.

Der **Crabnebel** im Sternbild Stier ist der Überrest einer im Jahr 1054 beobachteten Supernova. Chinesischen Aufzeichnungen zufolge konnte die Supernova 23 Tage lang am Taghimmel so hell wie der Vollmond beobachtet werden.
Der $6300\ Lj$ entfernte Supernova-Überrest dehnt sich noch heute mit einer Geschwindigkeit von $1700\ \frac{km}{s}$ aus. (Vgl. Aufgabe 17 auf S. 278)

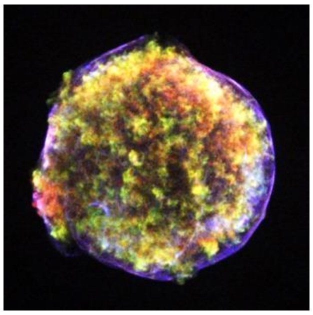


Supernovae erhalten als **Bezeichnung** grundsätzlich SN für Supernova, worauf das Beobachtungsjahr folgt. Der Buchstabe gibt in alphabetischer Reihenfolge an, um die wievielte katalogisierte Supernova es sich im jeweiligen Jahr handelte. Bei Bedarf werden auch Kombinationen aus zwei Buchstaben verwendet.



Supernovae in anderen Galaxien werden relativ häufig beobachtet. Eine der bekanntesten ist die Supernova **SN1987A** in der Großen Magellanschen Wolke. (Bild des HST auf der linken Seite)

In der Milchstraße wurde bisher über die Beobachtung von nur drei Supernovae berichtet: Die oben beschriebene **SN1054**, die von Tycho von Brahe beobachtete Supernova **SN1572** im Sternbild Kassiopeia (Röntgen-Aufnahme von Chandra auf der rechten Seite) und die von Johannes Kepler beobachtete Supernova **SN1604** im Sternbild Schlangenträger. Die Kepler-Supernova **SN1604** ist allerdings nicht der Kollaps eines sterbenden Sterns, sondern entstand bei der Akkretion eines Begleitsterns durch einen Weißen Zwerg (Supernova vom Typ Ia, siehe Kap. VI, S. 292).



Ein „heißer“ Supernovakandidat in der Milchstraße ist **Beteigeuze**. Manche Astronomen rechnen damit, dass Beteigeuze innerhalb der nächsten tausend Jahre explodiert. Die Strahlungsleistung sollte dann um einen Faktor 16 000 zunehmen, so dass Beteigeuze bzw. ihre Explosion am Taghimmel hell zu sehen wäre.

Hat der Reststern nach der Supernova eine Masse von weniger als 3 Sonnenmassen, so endet er als **Neutronenstern**, der auskühlt.

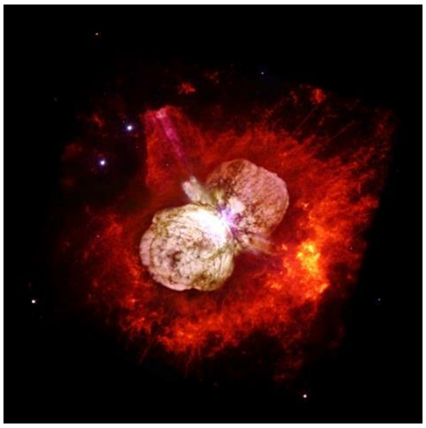
Ist der Reststern aber immer noch schwerer als 3 Sonnenmassen, so kontrahiert ihn seine eigene Gravitationskraft zu einem supermassiven, kompakten Objekt, das noch dichter ist als ein Neutronenstern. Von ihm kann keine Strahlung entweichen; das Objekt ist also unsichtbar. Man bezeichnet es als **Schwarzes Loch**. (Vgl. S. 244)

Hypernovae:

Bei extrem massereichen Sternen mit 80 bis 120 Sonnenmassen sind Druck und Temperatur im Sternkern so hoch, dass die Fusionszyklen viel schneller ablaufen als in normalen Sternen. Dadurch wird der Stern instabil. Es bilden sich Schwingungen aus, die zur Explosion des Sterns führen. Eine solche **Hypernova** setzt etwa 100-mal so viel Energie frei, wie eine Supernova. Bei Hypernovae entstehen **Gammastrahlungsblitze**. (Vgl. Kap. II, S. 67)

Die Quelle des hellsten bisher beobachteten Gammablitzes ist etwa 8 Milliarden Lichtjahre entfernt. Als im Jahr 2000 der **Gamma Ray Burst GRB 991216** beobachtet wurde, beobachteten die Astronomen vermutlich indirekt die Entstehung eines Schwarzen Lochs.

Ein Hypernova-Kandidat ist das etwa $7500\ Lj$ entfernte Doppelsternsystem **Eta Carinae** im Sternbild „Schiffskiel“. Eta Carinae ist ungefähr 100- bis 120-mal so schwer wie die Sonne und hat eine 4 bis 5 Millionen-mal größere Leuchtkraft. Im HST-Bild von Eta Carina ist außerdem der auffällige Homunkulus-Nebel zu sehen.



Die Entstehung der schweren chemischen Elemente:

Eisen hat die Ordnungszahl $Z = 26$. Die Erde und sogar wir selbst enthalten viele **chemische Elemente, die schwerer als Eisen sind**, das heißt: höhere Ordnungszahlen haben (z.B.: Kupfer ($Z = 29$), Silber ($Z = 47$), Gold ($Z = 79$),…).

Diese chemischen Elemente können nicht durch Kernfusion in Sternen erzeugt werden (vgl. S. 238). Dennoch kann man in der Atmosphäre von **Roten Riesen** chemische Elemente bis hin zu Wismut $Bi209$ spektroskopisch nachweisen. **1952** gelang es dem amerikanischen Astronomen **Paul W. Merrill**, in Roten Riesen das chemische Element **Technecium** mit der Ordnungszahl 43 nachzuweisen. Technecium kann nicht durch Kernfusion entstehen. Es muss aber trotzdem vom Stern produziert worden sein, denn Technecium ist radioaktiv und zerfällt, je nach Isotop, in wenigen Stunden bis Millionen Jahren. Rote Riesen sind wesentlich älter, so dass man Technecium, das bereits bei der Entstehung des Sterns im Stern enthalten gewesen wäre, nicht mehr nachweisen könnte.

Die Bildung neuer Atomkerne nennt man **Nukleosynthese**.

Der s-Prozess in Roten Riesen:

Bei der Fusion von Helium zu Kohlenstoff entstehen unter anderem Neutronen. Die **Neutronendichte in Roten Riesen** erreicht Werte von **bis zu $3 \cdot 10^8$ Neutronen pro cm^3**. Neutronen haben keine elektrische Ladung und werden deshalb von Atomkernen nicht abgestoßen. Wenn ein Neutron einem Atomkern nahe genug kommt, wird die starke Wechselwirkung wirksam und das Neutron lagert sich an den Atomkern an. Dadurch erhöht sich die Neutronenzahl des Kerns um 1. Kernumwandlungen, bei denen sich ein Neutron an einen Atomkern anlagert, nennt man **Neutroneneinfang**. Das entstandene Isotop baut seinen Neutronenüberschuss über einen β^--Zerfall, bei dem ein Neutron in ein Proton umgewandelt wird (vgl. Kap VII, S. 415), ab. Dabei entsteht ein neuer Atomkern, der eine um 1 höhere Ordnungszahl hat als der Ausgangskern.

Bei der in Roten Riesen herrschenden Neutronendichte ist die Wahrscheinlichkeit für Neutroneneinfänge relativ gering. Es kann mehrere tausend Jahre dauern, bis ein Atomkern nach einem Neutroneneinfang ein weiteres Neutron anlagert. **Der β^--Zerfall erfolgt bei diesem langsam (slow) ablaufenden s-Prozess vor dem nächsten Neutroneneinfang.**

Durch eine abwechselnde Folge von Neutroneneinfängen und β^--Zerfällen entstehen chemische Elemente mit immer größeren Ordnungszahlen. Der Prozess endet allerdings bei **Wismut $Bi209$**.

$Bi209$ wandelt sich beim β^--Zerfall in Polonium $Po210$ um. $Po210$ zerfällt aber über einen α-Zerfall in einen ${}^4_2He$-Kern und das stabile Bleiisotop $Pb206$. $Pb206$ wandelt sich durch drei Neutroneneinfänge in die ebenfalls stabilen Isotope $Pb207$ und $Pb208$ sowie in das radioaktive $Pb209$ um, das sich über einen β^--Zerfall wieder in das ursprüngliche $Bi209$ umwandelt. Deshalb wird die Abfolge von Neutroneneinfängen und β^--Zerfällen mit $Bi209$ beendet.

Der r-Prozess in Supernovae:

Unter dem bei einer Sternexplosion herrschenden extrem hohen Druck werden Elektronen in Protonen gepresst, wodurch Protonen in Neutronen umgewandelt werden. Es entstehen also viele neue Neutronen. Die **Neutronendichte in Supernovae erreicht Werte in der Größenordnung von 10^{22} Neutronen pro cm^3**. Bei derart hohen Neutronendichten wird der **schnelle (rapid) r-Prozess** wirksam: Innerhalb von Sekundenbruchteilen lagern sich an Atomkerne Neutronen an. **Die Zeiten bis zum nächsten Neutroneneinfang sind viel kürzer als die Zeiten bis zum β^--Zerfall**. Die Anlagerung weiterer Neutronen wird lediglich durch quantenphysikalische Regeln, die die Maximalzahl der Neutronen in Atomkernen begrenzen oder durch spontan einsetzende Kernspaltungen beendet. Es entstehen sehr schwere Isotope mit großem Neutronenüberschuss, die sich allmählich über β^--Zerfälle in Kerne mit zunehmende Protonen- bzw. Ordnungszahlen umwandeln.

Über den s-Prozess können in Roten Riesen Atomkerne mit Ordnungszahlen bis 83 (Wismut) und damit etwa die Hälfte der chemischen Elemente, die schwerer als Eisen sind, erzeugt werden.

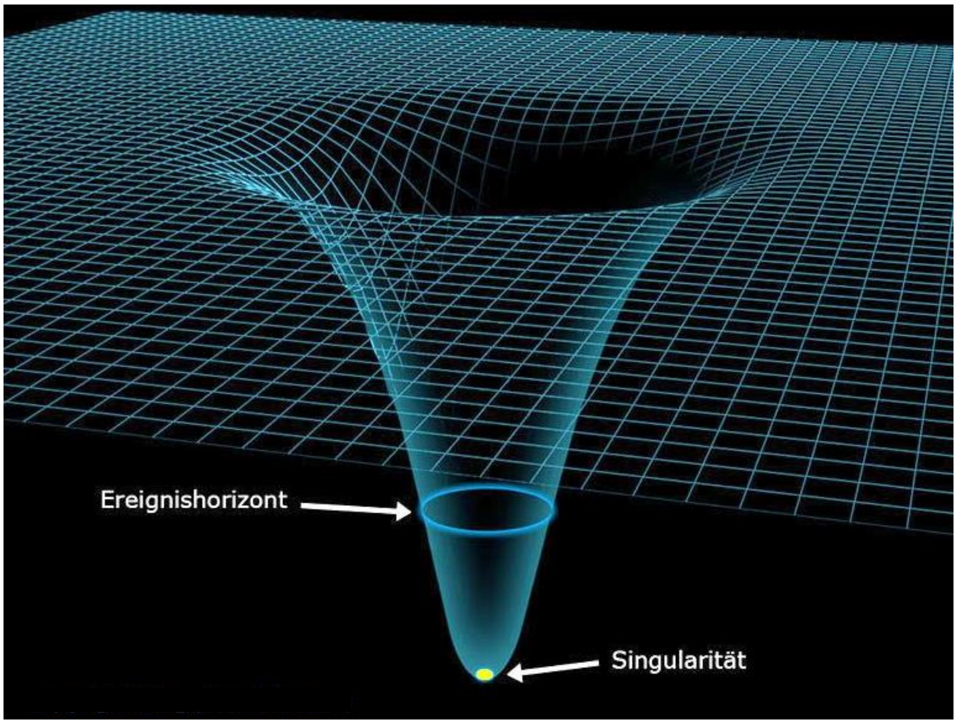
Atomkerne, die noch schwerer als Wismut sind, entstehen bei Supernova-Explosionen über den r-Prozess.

12) Schwarze Löcher

Schwarze Löcher als Singularitäten der Raumzeit:

Nach der **Allgemeinen Relativitätstheorie krümmt Masse aufgrund ihrer Gravitationswirkung die Raumzeit** (vgl. Kapitel VIII, S. 436).

Ein Schwarzes Loch ist ein kosmisches Objekt, dessen extreme Massendichte den umgebenden Raum unendlich stark krümmt. Das Schwarze Loch erzeugt eine **Singularität der Raumzeit** oder, anschaulicher formuliert, einen „Raumzeit-Trichter". In der **Schwarzschild-Metrik**, der Raumzeit eines nicht rotierenden Schwarzen Lochs, legt man in Gedanken um das Schwarze Loch eine Kugel mit dem **Schwarzschildradius** $\boldsymbol{R_S}$. Diese Kugel heißt **Ereignishorizont** des Schwarzen Lochs. Wenn Licht sich dem Schwarzen Loch bis auf den Ereignishorizont nähert, kann es dem Schwarzen Loch nicht mehr entweichen.



Körper mit Masse bewegen auf **Geodäten**. Das sind die kürzesten Verbindungsstrecken zweier Raumzeit-Punkte durch die Raumzeit. Auch **Licht** breitet sich auf Geodäten aus. Die Geodäten des Lichts heißen **Nullgeodäten**. Dies hat insbesondere zur Folge, dass das Licht sich in der Nähe einer großen Massendichte nicht geradlinig ausbreitet, wie wir es aus unserer Alltagserfahrung gewohnt sind.

Zusammenhang zwischen der Masse des Schwarzen Lochs und dem Schwarzschildradius:

Wie groß der Schwarzschildradius R_S ist, hängt von der Masse M des Schwarzen Lochs ab. Den Zusammenhang erhalten wir mithilfe des Energieerhaltungssatzes:

Wir stellen uns eine Rakete (Masse m) vor, die von einem kugelförmigen Himmelskörper mit dem Radius R und der Masse M starten und den Anziehungsbereich des Himmelskörpers verlassen soll. Die dafür nötige Startgeschwindigkeit heißt Fluchtgeschwindigkeit v_F. (Vgl. Kap. III, S. 95)

Nach dem **Energieerhaltungssatz** wird die Bewegungsenergie der Rakete beim Start vollständig in potentielle Energie umgewandelt. Dabei wird Arbeit gegen die Gravitationskraft F_G verrichtet. Die Gravitationskraft nimmt aber mit dem Abstand r vom Massenmittelpunkt ab:

$$F_G = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

Für $r \to \infty$ verschwindet die Gravitationswirkung.

Weil die Gravitationskraft F_G keine konstante Kraft ist, sondern mit zunehmendem Abstand vom Massenmittelpunkt immer kleiner wird, müssen wir die Arbeit über das Integral $W = \int_R^\infty F_G \, dr$ berechnen.

Wir leiten nun die **Formel für die Fluchtgeschwindigkeit v_F** her:

$$E_{kin} = E_{pot} \;\; \Rightarrow \;\; \frac{1}{2} m {v_F}^2 = \int\limits_R^\infty F_G \, dr = \int_R^\infty G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \, dr = G \cdot m \cdot M \left[-\frac{1}{r} \right]_R^\infty = G \cdot \frac{m \cdot M}{R}$$

$$\Rightarrow \;\; \frac{1}{2} \cdot {v_F}^2 = G \cdot \frac{M}{R} \;\; \Rightarrow \;\; v_F = \sqrt{2 \cdot G \cdot \frac{M}{R}}$$

Stellen wir uns die Masse M im Mittelpunkt des Himmelskörpers konzentriert vor, so startet die Rakete in der Entfernung R vom Massenmittelpunkt.

Jetzt übertragen wir unser „Raketenmodell" auf das Licht:

Die feste Fluchtgeschwindigkeit des Lichts ist die Lichtgeschwindigkeit c. Es folgt: $c = \sqrt{2 \cdot \frac{G \cdot M}{R}}$

Wir suchen die Entfernung R vom Massenmittelpunkt des Schwarzen Lochs mit der Masse M, in der das Licht das Schwarze Loch gerade noch verlassen kann. Diese Entfernung ist der Schwarzschildradius R_S.

$$\boxed{\boldsymbol{R_S = 2 \cdot \frac{G \cdot M}{c^2}}}$$ **Schwarzschildradius**

Das **Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße** hat vermutlich eine Masse von 4,3 Millionen Sonnenmassen. Für seinen Schwarzschildradius erhalten wir

$$R_S = 2 \cdot \frac{G \cdot M}{c^2} = 2 \cdot \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot 4{,}3 \cdot 10^6 \cdot 1{,}99 \cdot 10^{30} kg}{\left(3{,}0 \cdot 10^8 \, \frac{m}{s}\right)^2} \approx 1{,}27 \cdot 10^{10} m$$

Das ist ungefähr ein Zehntel der Entfernung von der Sonne zur Erde. (Vgl. Aufgabe 18. auf S. 279!)

Das Schwarze Loch selbst, die eigentliche **Singularität**, ist wesentlich kleiner als sein Ereignishorizont.

Vermutlich **rotieren Schwarze Löcher**. Dann muss die vom Schwarzen Loch verursachte Raumzeitkrümmung durch die **Kerr-Metrik** beschrieben werden. Dies hat unter anderem zur Folge, dass der Ereignishorizont etwas größer wird. (Vgl. Kap. VIII, S. 455)

Die Gravitationswirkung eines Schwarzen Lochs bzw. die von der Masse des Schwarzen Loches verursachte Raumzeitkrümmung führt zu einer **Gravitationsrotverschiebung** (vgl. Kap. VIII, S. 452). Strahlung, die aus der Umgebung des Schwarzen Lochs kommt, erscheint rotverschoben und seine Intensität wird geschwächt. Am Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs verschwindet die Intensität des Lichts. Deshalb erscheint der Bereich innerhalb des Ereignishorizonts schwarz.

„**Stellare Schwarze Löcher**" entstehen als Endstadien massereicher Sterne. Es gibt aber vermutlich auch Schwarze Löcher, die kurz nach dem Urknall und lange vor der Entstehung der ersten Sterne im Universum bildeten (**primordiale Schwarze Löcher**).

Gravitationswellen können den Nachweis zur Existenz Schwarzer Löcher und neue Erkenntnisse über die Eigenschaften Schwarzer Löcher liefern. Deshalb ist man auch im Zusammenhang mit Schwarzen Löchern gespannt auf weitere Messergebnisse des LIGO-Interferometers. (Vgl. Kap. VIII, S. 441ff)

Woran erkennt man ein Schwarzes Loch?

Weil von einem Schwarzen Loch kein Licht entweichen kann, kann man es nicht sehen. Es gibt aber mehrere Möglichkeiten, Schwarze Löcher aufgrund ihrer Gravitationswirkung **indirekt** zu **beobachten**:

- **Sterne oder Galaxien kreisen um ein unsichtbares Massezentrum.**

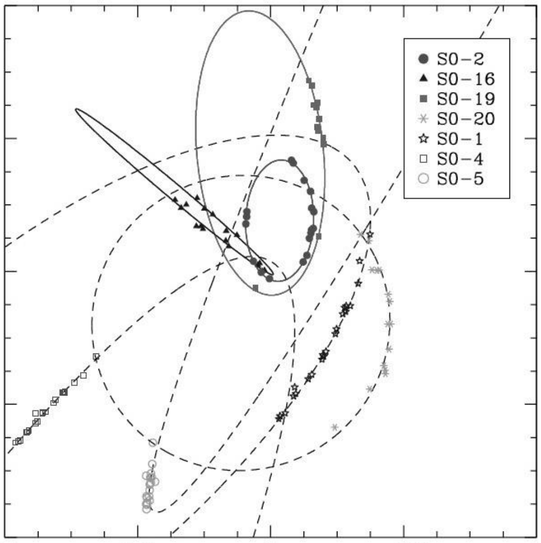
  Damit sich ein Körper auf einer Kreis- oder Ellipsenbahn bewegen kann, muss auf den Körper eine **Zentripetalkraft** wirken, die zum Mittelpunkt der Kreisbewegung gerichtet ist.

  Experiment: Hantelversuch zur Zentripetalkraft

  Die Rolle dieser Zentripetalkraft übernimmt bei der Bewegung von Himmelskörpern immer die **Gravitationskraft** zwischen der Masse des umlaufenden Himmelskörpers und der Masse, die er umläuft. Im Mittelpunkt einer kreisförmigen bzw. in einem Brennpunkt einer ellipsenförmigen Sternbahn muss sich also eine zweite Masse befinden. Wenn diese nicht sichtbar ist, kann es sich um ein Schwarzes Loch handeln.

  In der Abbildung sind die Bahnen einiger Sterne dargestellt, die die starke Radio- und Röntgenquelle **Sagittarius A**, möglicherweise das zentrale Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße, in geringem Abstand umlaufen. Diese Sterne nennt man **S-Sterne**.

  Der **Stern SO-2** umläuft das nicht sichtbare Gravitationszentrum mit einer Geschwindigkeit von bis zu 18 Millionen $\frac{km}{s}$ in einem mittleren Abstand von 17 Lichtstunden und in einer Zeit von nur 15,2 Jahren. 2012 wurde der Stern **SO-102** entdeckt, der in lediglich 11,5 Jahren Sagittarius A umläuft.

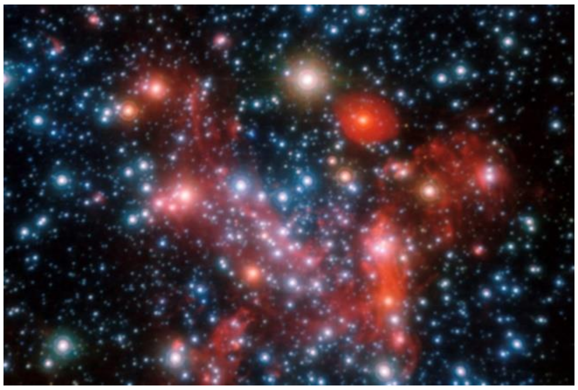


  Gemessen werden für S-Sterne die Umlaufzeit T und der Bahnradius r (Kreisbahnnäherung!). Aus dem Kraftansatz

$$\text{Zentripetalkraft } F_Z = \text{Gravitationskraft } F_G$$

$$\Rightarrow \quad m_{Stern} \cdot \frac{v^2}{r} = G \cdot \frac{m_{Stern} \cdot M}{r^2} \qquad \text{mit } v = \frac{2\pi r}{T}$$

  lässt sich die Masse M des (unsichtbaren) schwarzen Lochs berechnen.



  Die VLT-Aufnahme links zeigt einen 25 Bogensekunden großen Ausschnitt des zentralen Bereichs um das Zentrum der Milchstraße. Die Beobachteten S-Sterne befinden sich in dem etwa 1 Bogensekunde großen Zentrum des Bildes.

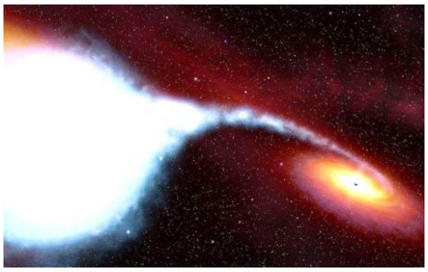
  Auch Gaswolken rotieren um Schwarze Löcher.

- **Röntgenstrahlung aus einer nicht sichtbaren Quelle wird registriert.**

  Wenn Materie (Sterne, Galaxien, Interstellares Gas) einem Schwarzen Loch genügend nahe kommt, stürzt sie auf einer spiralförmigen Bahn in das Schwarze Loch (**Akkretion**). Dabei werden unterschiedliche energiereiche Strahlungsarten ausgesandt; insbesondere **Synchrotronstrahlung**, die auch Wellenlängen im Bereich der **Röntgenstrahlung** enthält.

  Wenn elektrisch geladene Teilchen in einem das Schwarze Loch umgebenden elektromagnetischen Feld abgebremst werden, entsteht **Bremsstrahlung**. Auch die Wellenlänge dieser Bremsstrahlung liegt im Bereich der Röntgenstrahlung.

  Wie in einem Ringbeschleuniger entstehen **Zyklotronstrahlung** und **Synchrotronstrahlung**, wenn schnelle geladene Teilchen durch starke Magnetfelder abgelenkt werden. (Vgl. Kap. IX, S. 524)

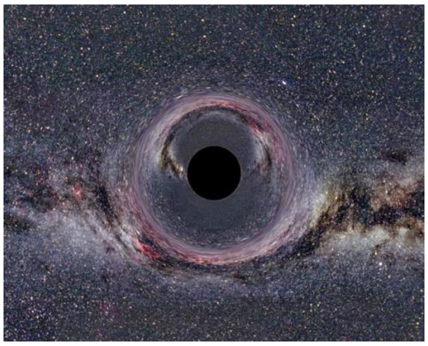
  Weil das Material in der Umgebung des Schwarzen Lochs bei der Akkretion sehr stark beschleunigt und extrem heiß wird, werden die Atome ionisiert. Die Materie befindet sich im Zustand eines **Plasmas**, das nur noch aus geladenen Teilchen besteht (vgl. Kap. IV, S. 169). Deshalb werden bei der Akkretion von Materie durch ein Schwarzes Loch alle der genannten Strahlungsarten emittiert.

  Die Akkretion von Materie durch ein Schwarzes Loch ist der effizienteste Prozess, bei dem Gravitationsenergie in Strahlungsenergie umgewandelt wird: Während bei der Kernfusion in Sternen lediglich etwa 0,7% der Ruheenergie in Strahlungsenergie umgewandelt werden, sind es bei der Akkretion 42%!

  <u>Beispiel</u>:

  Cygnus X-1 ist eine starke Röntgenquelle im Sternbild Schwan. Es handelt sich bei dem Objekt vermutlich um ein Doppelsternsystem, in dem ein Blauer Überriese um ein kleines Schwarzes Loch mit ca. 21 Sonnenmassen und einem Schwarzschildradius von $26\ km$ rotiert. Ein Umlauf dauert nur 5,6 Tage. Das Schwarze Loch saugt ständig Materie aus seinem Begleitstern ab. Durch die Reibungshitze entsteht Röntgenstrahlung. Mit dem Hubble-Teleskop und Chandra konnte der Massenverlust nachgewiesen werden, den der Stern durch Akkretion erleidet. Chandra und XMM-Newton beobachteten die ausgestrahlte Röntgenstrahlung.

- **Gravitationslinseneffekt:**

  Schwarze Löcher wirken als Gravitationslinsen. Im Bild rechts wurde der von einem vor der galaktischen Scheibe der Milchstraße vorbeilaufenden Schwarzen Loch bewirkte Gravitationslinseneffekt simuliert. So deutlich wie im Bild wird der Effekt tatsächlich nicht beobachtet. Aber auch Schwarze Löcher wirken aufgrund ihrer extremen Massendichte als Gravitationslinsen und erzeugen ein verzerrtes virtuelles Bild von sichtbaren kosmischen Objekten im Hintergrund. Näheres zum Gravitationslinseneffekt: Kapitel VIII „Relativitätstheorie“ auf S. 447f.

- **Gamma-Blitze:**

  Wahrscheinlich ist die Entstehung eines Schwarzen Lochs beim Kollaps eines Neutronensterns oder der Verschmelzung zweier Neutronensterne zu einem Schwarzen Loch mit einem Gamma Ray Burst verbunden.

- **Gravitationswellen:**

  Die 2015 mit dem LIGO-Interferometer gemessenen Gravitationswellen haben ihre Ursache vermutlich in der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher. (Vgl. Kap. VIII, S. 442)

Die Hawking-Strahlung:

Vermutlich können Schwarze Löcher durch die sogenannte „**Hawking-Strahlung**" über einen sehr langen Zeitraum hinweg Masse verlieren.

Im **Quantenvakuum am Ereignishorizont des Schwarzen Lochs** entstehen aus Strahlung ständig Teilchen-Antiteilchen-Paare, die normalerweise sofort wieder zerstrahlen. Die für den Paarerzeugungsprozess (vgl. Kap. VIII, S. 422) notwendige Energie stammt aus elektromagnetischen Feldern, die auch im Quantenvakuum existieren müssen, weil sie aufgrund der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation, einem der grundlegenden Konzepte der Quantenmechanik, keinen festen Wert, also auch nicht den Wert Null, haben dürfen.

Durch die starke Gravitationswirkung des Schwarzen Loches kann es passieren, dass diese Teilchen-Antiteilchen-Paare getrennt werden und ein Teilchen ins Schwarze Loch fällt, während sein Partnerteilchen ins All entkommt. Stammt die Energie, aus der das Teilchen-Antiteilchen-Paar im Quantenvakuum entstand, dem Schwarzen Loch, so wird dem Schwarzen Loch auf diese Weise Energie entzogen. Dieser quantenmechanische Prozess könnte über viele Milliarden Jahre zur Auflösung von Schwarzen Löchern führen.

Die Lebensdauer eines Schwarzen Lochs ist nach der Theorie von Steven Hawking proportional zur dritten Potenz seiner Masse. Das bedeutet, dass <u>leichte</u> primordiale Schwarze Löcher, die nicht durch einen Sternkollaps entstanden sind, sondern bereits vor der Entstehung der ersten Sterne im Universum vorhanden waren, seit dem Urknall möglicherweise bereits zerstrahlt sind.

Bei den Kollisionsexperimenten am **CERN** können unter Umständen **Schwarze Mikrolöcher** entstehen. Die Sorge um bedrohliche Auswirkungen solcher Mikrolöcher in Genf führte dazu, dass Prozesse geführt wurden, die den Start des Large Hadron Colliders (LHC) verhindern sollten. In diesem Zusammenhang ist es von Bedeutung, ob die Theorie von Steven Hawking stimmt. Schwarze Löcher mit extrem kleiner Masse müssten nämlich innerhalb extrem kurzer Zeit in Hawking-Strahlung zerstrahlen.

13) Altersbestimmung bei Sternen und Sternhaufen

Lebenswege von Sternen im HRD:

Das **Hauptreihenstadium** bzw. die **Entwicklungszeit τ** ist der längste Abschnitt im Leben eines Sterns. Wo ein Stern auf der Hauptreihe im HRD sitzt, hängt nach der Masse-Leuchtkraft-Beziehung $L \sim m^3$ von seiner Masse ab. Je schwerer der Stern ist, desto weiter links befindet er sich auf der Hauptreihe (vgl. S. 233).

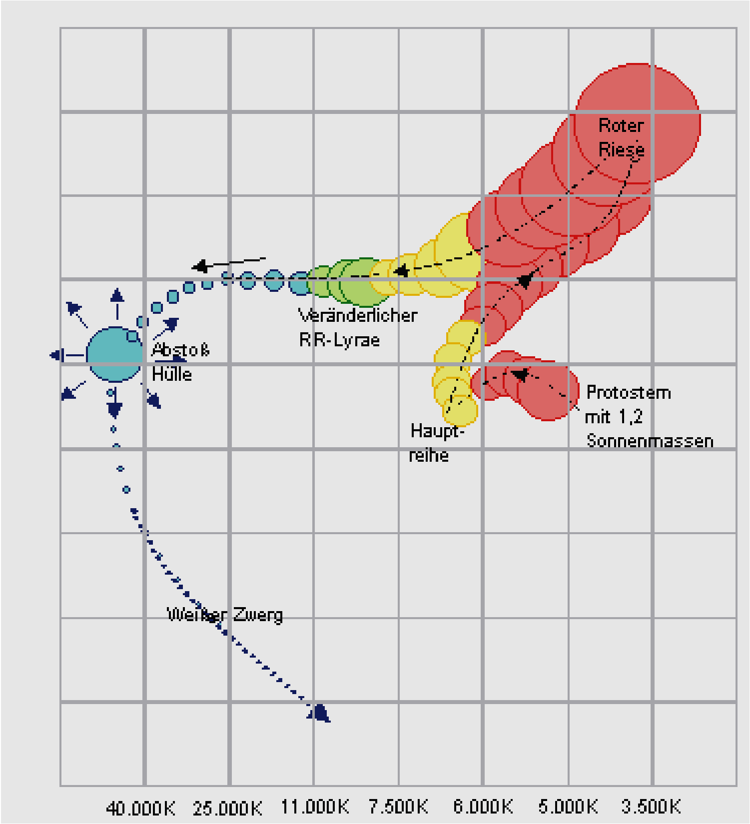
Seinen Platz auf der Hauptreihe nimmt ein Stern nach seiner Entstehung ein und behält ihn bei. Sterne wandern nicht auf der Hauptreihe!

Das „**Rote-Riesen-Stadium**" ist das Übergangsstadium zwischen dem Hauptreihenstadium und dem Übergang zum Planetarischen Nebel oder Neutronenstern. Wenn sich der Stern zu einem Roten Riesen aufbläht, nimmt seine Oberfläche zu. Damit sind eine Erhöhung der Leuchtkraft und eine Abkühlung verbunden. Im HRD wandert ein Stern am Ende seiner Entwicklungszeit von der Hauptreihe zu den Roten Riesen. Die Lage der Roten Riesen im HRD zeigt, dass Sterne in diesem Entwicklungsstadium über eine enorme Leuchtkraft verfügen, aber eine relativ niedrige Oberflächentemperatur haben.

Blaue Überriesen sind extrem massereiche Sterne, die bereits während ihrer Entwicklungszeit die Ausdehnung eines Roten Riesen erreichen. Ihr extrem hoher Gravitationsdruck führt zu einer besonders hohen Fusionsleistung und damit zu einer sehr hohen Oberflächentemperatur (30 000 bis 40 000 K).

Weiße Zwerge sind Endstadien relativ leichter Sterne. (Vgl. S. 239). Sterne mit Massen bis zur 8-fachen Sonnenmasse wandern nach ihrem Rote-Riesen-Stadium im HRD zu den Weißen Zwergen. Wie man im HRD erkennt, haben Weiße Zwerge eine geringe Leuchtkraft, sind aber sehr heiß.

In dem unten abgebildeten HRD wird der angenommene **Lebensweg der Sonne** von ihrer Entstehung über das gegenwärtige Hauptreihenstadium zum Roten Riesen und über das Stadium des Planetarischen Nebels, in dem sie ihre Hülle abstößt, zu einem Weißen Zweg dargestellt.



Altersbestimmung bei Sternhaufen:

Man unterscheidet zwei Typen von Sternhaufen:

- <u>**Offene Sternhaufen**</u>:

  Offene Sternhaufen bestehen aus einigen Hundert Sternen, die 10- bis 100-mal dichter beieinanderstehen, als die Sterne in der Sonnenumgebung. Viele offene Sternhaufen sind relativ jung. Die gegenseitigen Abstände der Sterne in offenen Sternhaufen sind relativ groß. Deshalb sind die zwischen den Sternen wirkenden Gravitationskräfte eher gering. Offene Sternhaufen lösen sich deshalb nach einigen hundert Millionen Jahren auf.

  Die Sonne war früher vermutlich auch Mitglied eines offenen Sternhaufens, der sich aber seit der Entstehung der Sonne vor 4,6 Milliarden Jahren aufgelöst hat.

  Das Bild auf der rechten Seite zeigt die **Plejaden**, ein bekanntes Beispiel für einen offenen Sternhaufen im Sternbild Stier. Die Plejaden tragen auch den Namen **Siebengestirn**, weil mit bloßem Auge von dem Sternhaufen 6 bis 7 Sterne sichtbar sind. Im Teleskop wird allerdings deutlich, dass der Sternhaufen aus weit mehr Sternen besteht. Zu den Plejaden zählen mindestens 1200 Sterne.

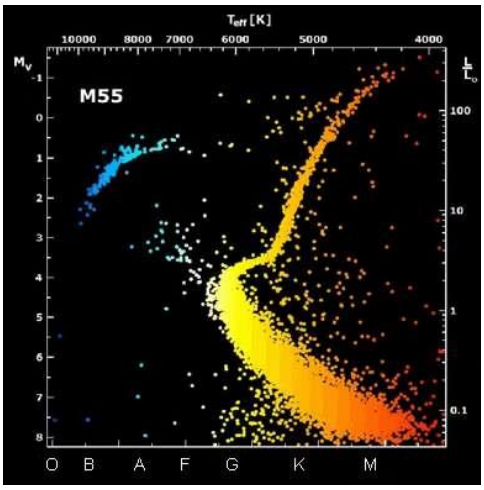
- **<u>Kugelsternhaufen</u>:**

  Kugelsternhaufen enthalten einige Zehnttausend bis 10 Millionen Sterne, die rund 10 000-mal dichter beieinanderstehen als in der Sonnenumgebung. Sie sind nahezu kugelsymmetrisch aufgebaut und zeigen zum Mittelpunkt hin eine starke Zunahme der Sterndichte. Wegen ihres geringen Abstandes sind die Sterne in Kugelsternhaufen durch starke Gravitationskräfte aneinander gebunden. Kugelsternhaufen gehören zu den ältesten Objekten der Milchstraße.

  M31 im Sternbild Herkules ist der hellste am Nordhimmel beobachtbare Kugelsternhaufen. Er besitzt eine Leuchtkraft, die etwa 300 000-mal so groß ist, wie die Leuchtkraft der Sonne. Entdeckt wurde der Kugelsternhaufen 1714 von Edmond Halley. In besonders klaren Nächten ist M13 sogar mit bloßem Auge als schwach schimmerndes Fleckchen im Sternbild Herkules zu erkennen. Mit dem Teleskop lässt er sich leicht in Einzelsterne auflösen.
  1974 wurde mithilfe des Arecibo-Radioteleskops eine Botschaft in Richtung des Kugelsternhaufens M13 geschickt. Mit der **Arecibo-Botschaft** sollte untersucht werden, ob es möglich ist, mit Zivilisationen auf extrasolaren Planeten Kontakt aufzunehmen (vgl. Kap. II, S. 63).

Altersbestimmung bei Sternhaufen:



Die **Hertzsprung-Russel-Diagramme, von alten Sternhaufen** zeigen eine Form, die deutlich von der Form der HRDs abweicht, die man erhält, wenn man beispielsweise die hellsten Sterne in der Umgebung der Sonne oder die Sterne eines jungen offenen Sternhaufens zeichnet: **Die Hauptreihe knickt nach rechts oben in den Bereich der Roten Riesen ab**. Im Bild links ist das HRD des Kugelsternhaufens M55 im Sternbild Schütze abgebildet.

Diese charakteristische Eigenschaft von HRDs alter Sternhaufen ermöglicht es, das Alter des Sternhaufens abzuschätzen. Wie man dabei vorgeht, soll im Folgenden erläutert werden.

Auf das Hauptreihenstadium eines Sterns folgt das Rote-Riesen-Stadium. Das bedeutet, dass die Sterne am Ende ihrer Entwicklungszeit im HRD die Hauptreihe verlassen und in den Bereich der Roten Riesen abwandern.

Je schwerer ein Stern ist, desto weiter links oben auf der Hauptreihe sitzt er nach der Masse-Leuchtkraft-Beziehung $L \sim m^3$ während seiner Entwicklungszeit.

Die Sterne eines Sternhaufens entstehen annähernd gleichzeitig aus einer Wolke interstellarer Materie. Sie sind also <u>gleich alt</u>. Die massereicheren Sterne beenden aber ihr Hauptreihenstadium früher als die masseärmeren. Nach der Beziehung $\tau \sim \frac{1}{m^2}$ nimmt ihre Entwicklungszeit τ mit zunehmender Masse m ab.

Deshalb entleert sich im Lauf der Zeit die Hauptreihe von links oben nach rechts unten.

Die **Sterne an der Knickstelle im HRD** sind die massereichsten Hauptreihensterne des Sternhaufens und stehen unmittelbar vor ihrem Übergang ins Rote-Riesen-Stadium. Ihre **Entwicklungszeit $\boldsymbol{\tau_K}$ ist also das Alter des Sternhaufens**.

Berechnung des Alters eines Sternhaufens:

Der Knick des HRD des Sternhaufens liegt bei der relativen Leuchtkraft $L^*{}_K$ bzw. bei der absoluten Helligkeit M_K. Wenn im HRD auf der Hochwertachse die absolute Helligkeit M aufgetragen wurde, lesen wir M_K ab und berechnen L_K^* mit

$$L_K^* = 10^{\frac{M_\odot - M_K}{2,5}} \qquad \text{(vgl. S. 228)}$$

Entwicklungszeit eines Sterns an der Knickstelle:

Mit der Beziehung $\tau_K^* = \frac{1}{(m_K^*)^2}$ und der Masse-Leuchtkraft-Beziehung $m_K^* = \sqrt[3]{L_K^*}$ folgt (vgl. S. 233ff):

$$\boldsymbol{\tau_K} = \tau_K^* \cdot \tau_\odot = \frac{\tau_\odot}{(m_K^*)^2} = \frac{\boldsymbol{\tau_\odot}}{(\boldsymbol{L_K^*})^{\frac{2}{3}}}$$

Rechenbeispiel: **Alter des Kugelsternhaufens M 55 im Schützen:**

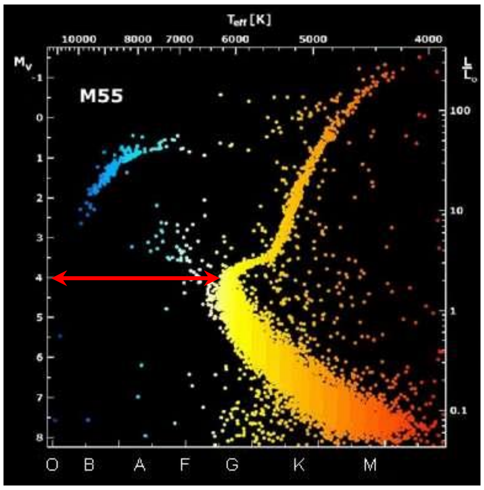
Der Knick des HRD von M 55 ist deutlich erkennbar und liegt etwa bei $M_K = 4$.

$$L_K^* = 10^{\frac{M_\odot - M_K}{2,5}} = 10^{\frac{4,83-4}{2,5}} \approx 2,14$$

$$m_K^* = \sqrt[3]{L_K^*} = \sqrt[3]{2,14} \approx 1,29$$

$$\tau_K^* = \frac{1}{(m_K^*)^2} = \frac{1}{(1,29)^2} \approx 0,60$$

$$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{\tau_K} = \tau_K^* \cdot \tau_\odot = 0,60 \cdot 7,0 \cdot 10^9 a \approx \boldsymbol{4,2 \cdot 10^9\ a}$$



Der Sternhaufen Kugelsternhaufen M55 ist also etwa 4 Milliarden Jahre alt.

Beachte:

In den HRDs von Sternhaufen wird häufig an der Hochwertachse nicht die absolute Helligkeit M sondern die scheinbare Helligkeit m aufgetragen. Das ist zulässig, weil alle Sterne des Sternhaufens näherungsweise denselben Abstand von der Sonne haben. Bei bekannter Entfernung r des Kugelsternhaufens kann man mit dem Entfernungsmodul $m - M = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right)$ die den scheinbaren Helligkeiten entsprechenden absoluten Helligkeiten berechnen.

14) Exoplaneten:

Planeten außerhalb des Sonnensystems:

Die Suche nach **extrasolaren Planeten**, kurz **Exoplaneten**, und deren Erforschung ist ein sehr junges Teilebiet der Astrophysik. Es entwickelte sich in den vergangenen 30 Jahren zu einem ausgesprochen erfolgreichen Forschungsgebiet. Großteleskope wie das VLT, der Einsatz von auf die Suche nach Exoplaneten spezialisierten Satellitenteleskopen wie CoRoT und Kepler sowie die Entwicklung hochpräziser Messmethoden führten zu einer raschen Zunahme der Entdeckungen von Exoplaneten.

In den Jahren 1988 bis 2000 wurden 56 Exoplaneten gefunden. In den Jahren 2001 bis 2009 waren es noch unter 100 pro Jahr. Alleine im Jahr 2016 wurden 1465 Exoplaneten nachgewiesen. Insgesamt lag die Zahl der entdeckten Exoplaneten am 28. September 2017 bei 3671. Auf der Internetseite http://exoplanet.eu/ findet man neben zahlreichen Informationen und Daten zu Exoplaneten aktuelle Kataloge mit allen bisher entdeckten Exoplaneten.

Grundlegende Fragen in der Exoplaneten-Forschung sind:

- Befinden sich auch in extrasolaren Planetensystemen Gesteinsplaneten auf sternnahen Umlaufbahnen und Gasplaneten auf Umlaufbahnen mit großen Radien?
- Wie wirkt sich die Masse des Zentralsterns auf die Entstehung von Exoplaneten aus?
- Wie beeinflussen das gemeinsame Gravitationsfeld und die Gezeitenkräfte in Mehrfachsternsystemen die Entstehung von Planeten?
- Welche chemische Zusammensetzung haben die Atmosphären von Exoplaneten?

Am spannendsten ist aber die Frage, ob es Exoplaneten gibt, auf denen **Leben** entstanden ist oder entstehen kann.

Exoplaneten sind Himmelskörper, die außerhalb des Gravitationsbereichs der Sonne auf Ellipsenbahnen um Sterne laufen. Die Planetendefinition der Internationalen Astronomischen Union (IAU) (vgl. Kap. III, S. 105), lässt sich auf Exoplaneten kaum anwenden, denn es ist bisher nicht möglich, zu überprüfen, ob entdeckte Exoplaneten-Kandidaten kugelförmig sind und ob sie ihre Umlaufbahnen von interplanetarem Schutt freigeräumt haben. Relevant ist hingegen die Unterscheidung zwischen Exoplaneten und Braunen Zwergen.

Braune Zwerge sind Vorstufen von Sternen. Sie entstehen wie Sterne durch den gravitativen Kollaps von Gaswolken. Ihre Masse von 13 bis 80 Jupitermassen ist aber nicht groß genug, um die Kerntemperatur zu erzeugen, bei der die Fusion von Wasserstoff zu Helium zündet. Ab einer Temperatur von etwa 200 000 K im Kern eines Braunen Zwergs findet aber Fusion von Wasserstoff zu Deuterium statt. In schweren Braunen Zwergen wird sogar Lithium durch Kernfusion erzeugt.

Explaneten sind feste Körper, die vermutlich aus Staub in zirkumstellaren Scheiben entstehen und dann eine Atmosphäre einfangen. Ihre Masse sollte unterhalb von 20 Jupitermassen liegen.

Man unterscheidet

- **erdähnliche Exoplaneten**. (Gesteinsplaneten mit Massen, die im Bereich der Erdmasse liegen und einer dünnen Atmosphäre)
- **jupiterähnliche Exoplaneten** (große Gasplaneten mit mittleren Bahnradien)
- **„Hot Jupiters“** (große Gasplaneten auf engen Umlaufbahnen um den Zentralstern) und
- **neptunähnliche Exoplaneten** (kleinere Gasplaneten, die ihren Zentralstern auf Bahnen mit großen Radien umlaufen)

Exoplaneten werden mit dem Namen ihres Zentralsterns bezeichnet, an den in der Reihenfolge der Entdeckung der Exoplaneten die Kleinbuchstaben b, c, d, … angehängt werden.

Beispiele:

51 Pegasi b ist ein 1995 entdeckter Exoplanet um den Stern 51 Pegasi im Sternbild Pegasus.

Kepler 186f ist der 2014 von dem Kepler-Teleskop als fünfter Exoplanet um den Stern Kepler 186 im Sternbild Schwan entdeckte Exoplanet.

Entdeckung und Erforschung von Exoplaneten:

Obwohl Ende der 1980-er Jahre erste Exoplaneten-Kandidaten entdeckt wurden, von denen später bestätigt wurde, dass es sich tatsächlich um Exoplaneten handelt, beginnt die Entwicklung der Exoplaneten-Forschung eigentlich **1992** mit der Entdeckung von drei Exoplaneten um den $2300\ Lj$ entfernten **Pulsar PSR 1257 + 12** im Sternbild Jungfrau. Die Helligkeitsschwankungen des Pulsars aufgrund von dessen Eigenrotation (vgl. S. 240) werden von periodischen Abweichungen überlagert, die auf die umlaufenden Himmelskörper zurückzuführen sind. Diese indirekte Nachweismethode für Exoplaneten, die Pulsare umlaufen, nennt man **Pulsar Timing**.

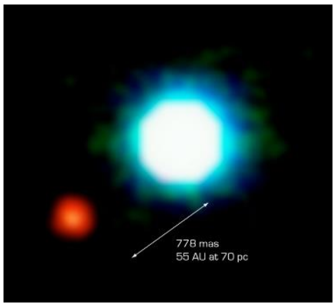
Direkte Beobachtung von Exoplaneten:

Die **direkte Beobachtung** von Exoplaneten ist sehr schwierig, weil die lichtschwachen Exoplaneten einen kleinen Winkelabstand vom Zentralstern haben und in der Regel vom Zentralstern überstrahlt werden.

Trotzdem ist die direkte Beobachtung von Exoplaneten sehr wichtig, weil bei dieser Beobachtungsmethode die Atmosphäre des Planeten spektroskopisch auf organische Bestandteile, die als Hinweise auf die Existenz von Leben gewertet werden, spektroskopisch untersucht werden kann.

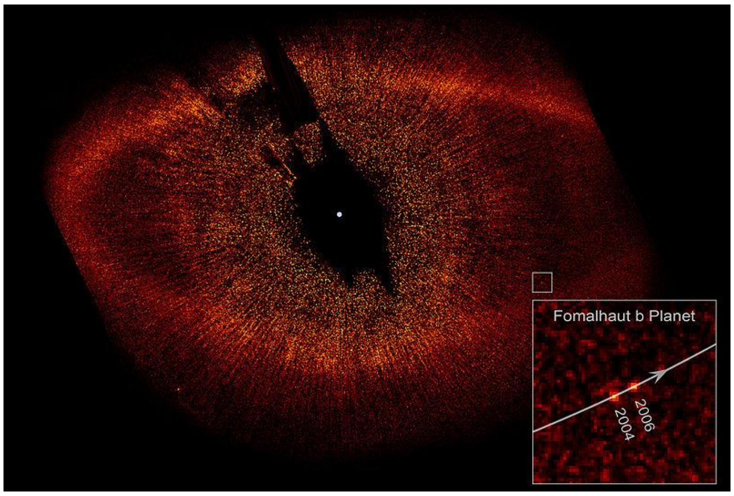
Großteleskope mit adaptiver Optik, hochauflösende Spektrografen und Koronografen, die die Helligkeit des Zentralsterns unterdrücken, ermöglichten in den letzten Jahren die direkte Beobachtung von Gasriesen.

2004 veröffentlichte die ESO das am VLT aufgenommene Bild des Exoplaneten **2M1207b**, der den Braunen Zwerg 2M1207 als Zentralstern umläuft (Bild rechts).



2005 wurde am VLT der Exoplanet **CQ Lupi b** mit seinem sonnenähnlichen Zentralstern CQ Lupi beobachtet.

2008 wurde eine Aufnahme des Exoplaneten **EP Formalhaut b** vom Hubble Space Teleskop veröffentlicht. (Bild unten)

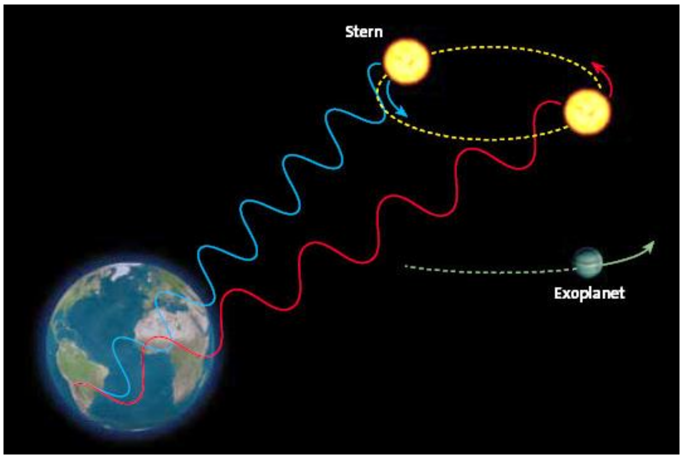


2016 wurde am VLT der Exoplanet **HD 131399Ab** nachgewiesen, der einen Stern in einem Dreifachsternsystem umläuft.

Indirekte Methoden zur Beobachtung von Exoplaneten:

Bei indirekten Beobachtungsmethoden werden nie die Exoplaneten selbst beobachtet. Man analysiert, je nach Methode **Spektrum, Helligkeit oder Position des Zentralsterns**. Umlaufende Exoplaneten bewirken Unregelmäßigkeiten in diesen Eigenschaften der Sterne. Über diese Unregelmäßigkeiten versucht man Exoplaneten zu entdecken und Informationen über deren physikalische Eigenschaften zu gewinnen.

Die Radialgeschwindigkeitsmethode:



Ein Exoplanet und sein Zentralstern bewegen sich, ähnlich wie Mond und Erde (vgl. Kap. III, S. 86f), als **Zweikörpersystem** auf Ellipsenbahnen um den gemeinsamen Schwerpunkt. Die radiale **Komponente der Bewegung des Zentralsterns** in Blickrichtung von der Erde zum Stern muss man sich als ein hin und her Wackeln des Sterns parallel zur Blickrichtung vorstellen. Diese Radialbewegung führt zu einer abwechselnden Rot- und Blauverschiebung der Absorptionslinien im Sternspektrum. Aus dieser **periodischen Dopplerverschiebung im Spektrum des Zentralsterns** schließt man auf einen nicht sichtbaren Himmelskörper, der um den Zentralstern läuft.

Die Radialgeschwindigkeiten der „Wackelbewegungen“ der Zentralsterne liegen im Bereich weniger $\frac{m}{s}$.

Im **Zweikörpersystem Sonne-Erde** bewegt sich der Schwerpunkt der Sonne auf seiner Bahn um den gemeinsamen Schwerpunkt von Erde und Sonne mit einer mittleren Geschwindigkeit von $12\ \frac{m}{s}$. Ein weit entfernter Beobachter würde im Spektrum der Sonne beispielsweise für die H_α-Linie mit der Laborwellenlänge $\lambda_0 = 686{,}281\ nm$ folgende Dopplerverschiebung $\Delta\lambda$ messen:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad (\text{vgl. S. } 214) \Rightarrow \quad \boldsymbol{\Delta\lambda} = \frac{v}{c}\cdot\lambda_0 = \frac{12\ \frac{m}{s}}{3{,}0\cdot 10^8\ \frac{m}{s}}\cdot 686{,}281\cdot 10^{-9}\ m \approx \boldsymbol{2,7\cdot 10^{-14}\ m}$$

Um derart kleine Wellenlängenverschiebungen $\Delta\lambda$ im Sternspektrum messen zu können, wird das Spektrum gedehnt. Um bei einer Radialgeschwindigkeit von $12\ \frac{m}{s}$ eine (gedehnte) Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda' = 1\ mm$ zu erhalten, müsste das Spektrum um den Faktor $k = \frac{1\ mm}{2{,}7\cdot 10^{-11}\ mm} \approx 3{,}6\cdot 10^{10}$ gedehnt werden. Das $400\ nm$ breite Spektrum des sichtbaren Lichts wäre dann fast *15 km* breit.

Bei der Suche nach Exoplaneten kommen Spektrografen zum Einsatz, die Radialgeschwindigkeiten bis zu $1\ \frac{m}{s}$ genau messen können.

- Das gleiche Verfahren wird auch bei der **Beobachtung spektroskopischer Doppelsternsysteme** verwendet (vgl. S. 220). Bei Doppelsternsystemen sind die Radialgeschwindigkeiten und damit die Dopplerverschiebungen allerdings wesentlich größer als bei der Wackelbewegung eines Zentralsterns, der von einem Exoplaneten umlaufen wird Der Zentralstern ist in der Regel viel schwerer als sein Exoplanet. Deshalb liegt der gemeinsame Schwerpunkt in der Nähe des Mittelpunkts des Zentralsterns.

Für die Bewegung des Zweikörpersystems aus Zentralstern und Exoplanet gilt:

$$\frac{T^2}{r^3} = G \cdot \frac{4\pi^2}{m_{\text{Stern}} + m_{\text{Planet}}} \qquad (FS\ 13)$$

$$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{\Delta\lambda} = \frac{v}{c} \cdot \lambda_0 = \frac{2\pi \cdot r_{\text{Stern}}}{c \cdot T} \cdot \lambda_0 = \frac{2\pi \cdot r_{\text{Stern}}}{c \cdot \sqrt{G \cdot \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{m_{\text{Stern}} + m_{\text{Planet}}}}} \cdot \lambda_0 = \frac{\lambda_0}{c \cdot \sqrt{G}} \cdot \frac{r_{\text{Stern}}}{\sqrt{\boldsymbol{r^3}}} \cdot \sqrt{m_{\text{Stern}} + \boldsymbol{m_{\text{Planet}}}}$$

Dabei ist r der Mittelpunktabstand Zentralstern-Exoplanet und r_{Stern} der Bahnradius der Bewegung des Mittelpunkts des Zentralsterns um den gemeinsamen Schwerpunkt von Zentralstern und Exoplanet.

Man erkennt: **Die im Spektrum des Zentralsterns gemessene Dopplerverschiebung $\Delta\lambda$ nimmt mit der Masse m_{Planet} des Exoplaneten zu und mit dem Abstand r des Exoplaneten vom Stern ab.**

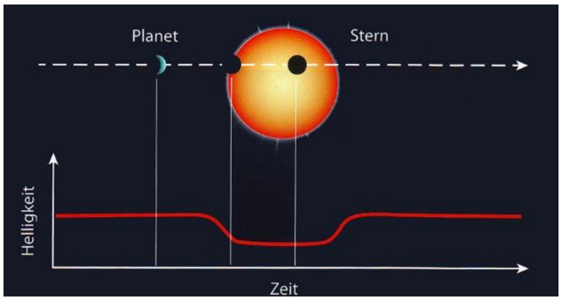
Aus diesem Grund ist es einfacher, mit der Radialgeschwindigkeitsmethode massereiche Exoplaneten zu finden, die ihren Zentralstern in großem Abstand umlaufen, als leichte Exoplaneten auf einer engen Umlaufbahn. Erdähnliche Exoplaneten sind massearm und haben relativ kleine Bahnradien. Deshalb sind sie mit der Radialgeschwindigkeitsmethode kaum zu entdecken.

Mit der Radialgeschwindigkeitsmethode lässt sich nur eine **Minimalmasse m_{min}** für den Exoplaneten bestimmen. Die tatsächliche Masse m hängt über $\boldsymbol{m = m_{min} \cdot \sin i}$ mit der Minimalmasse zusammen. Dabei ist i der sogeannnte Inklinationswinhel, um den die Umlaufbahn des Exoplaneten gegenüber der Blickrichtung geneigt ist. Die Bahnneigung lässt sich mithilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode nicht ermitteln. Dass die Methode lediglich Minimalmassen liefert, hat aber wiederum zur Folge, dass man nicht sicher sein kann, ob es sich bei einem mit der Radialgeschwindigkeitsmethode gefundenen Himmelskörper tatsächlich um einen Exoplaneten oder zum Beispiel um einen Braunen Zwerg handelt.

1995 wurde mit der Radialgeschwindigkeitsmethode der Exoplanet **51 Pegasi b** entdeckt, der einen sonnenähnlichen, etwa $40\ Lj$ entfernten Stern umläuft. Die Umlaufdauer von 51 Pegasi b beträgt 4,2 Tage. Bei 51 Pegasi b handelt es sich um einen „**Hot Jupiter**".

Die Transitmethode:

Wenn ein Exoplanet aus der Sicht des irdischen Beobachters beim Umlauf um seinen Zentralstern vor dem Stern vorbeiläuft und dabei einen kleinen Teil des Sterns verdeckt, kann man eine **periodische Abnahme der Helligkeit des Zentralsterns** messen.



Das Verfahren wird auch bei der Beobachtung von bedeckungsveränderlichen Doppelsternen angewendet (vgl. S. 221).

Aus der **Lichtkurve** lassen sich der **Radius R des Exoplaneten** und der **Inklinationswinkel i der Umlaufbahn** des Exoplaneten bestimmen. Damit der Exoplanet den Zentralstern bedeckt, muss der Inklinationswinkel i im Bereich von $\boldsymbol{i \approx 90°}$ liegen. Wenn zusätzlich mit der Radialgeschwindigkeitsmethode die Minimalmasse m_{min} bestimmt wird, erhält man mit $m = m_{min} \cdot \sin i$ die **Masse** des Exoplaneten. Mit Masse und Radius kann man die **Dichte des Exoplaneten** abschätzen:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{4}{3}R^3\pi}$$

Die Wahrscheinlichkeit, mit der Transitmethode Exoplaneten zu entdecken, ist relativ gering. Zum einen muss die Umlaufbahn relativ zur Blickrichtung so ausgerichtet sein, dass der Exoplanet seinen Zentralstern bedeckt. Zum anderen dauert der Bedeckungsvorgang nur relativ kurz. Man muss also genau zum richtigen Zeitpunkt das Messgerät auf den richtigen Stern ausrichten.

1999 wurde der Exoplanet **HD 209458 b**, ebenfalls ein „Hot Jupiter", mithilfe der Transitmethode entdeckt.

Für Exoplaneten, die sich aus Sicht eines irdischen Beobachters auf ihrer Bahn zeitweise vor oder hinter ihrem Zentralstern befinden, kann man I**nformationen über die chemische Zusammensetzung der Planetenatmosphäre** gewinnen, ohne den Planeten selbst zu sehen. Man nimmt jeweils ein Sternspektrum auf, wenn sich der Exoplanet vor dem Stern befindet und wenn er gerade hinter dem Stern verschwunden ist. Indem man das zweite Spektrum vom ersten subtrahiert, erhält man die nur aus der Atmosphäre des Exoplaneten stammenden Linien. Linien, die sowohl im Spektrum des Zentralsterns als auch im Spektrum der Planetenatmosphäre enthalten sind, lassen sich allerdings mit dieser Methode nicht eindeutig dem Planeten zuordnen.

Mit der Transitmethode können bereits mit Schulteleskopen bekannte extrasolare Planetensysteme indirekt beobachtet werden. Mithilfe einer CCD-Kamera und geeigneten Software werden von entsprechenden Sternen Lichtkurven erzeugt. Für die Messung sollte man etwa 2 Stunden veranschlagen.

Die „Exoplanet Transit Database“ ETD ist eine im Internet unter http://var2.astro.cz/ETD/index.php aufrufbare Seite, die eine Sammlung von Transit-Lichtkurven und damit für die Beobachtung geeigneter Sterne und Tools zur Auswertung von selbst aufgenommenen Lichtkurven bietet.

Das experimentelle Vorgehen wird beispielsweise im Artikel „Die Beobachtung von extrasolaren Planeten mit der Transitmethode“ von Stefanie Rätz in „Astronomie und Raumfahrt“ 6/2011, S. 23 ff beschrieben.

Astrometrische Methode:

Die Bewegung eines Exoplaneten und seines Zentralsterns um den gemeinsamen Schwerpunkt führt aus der Sicht eines irdischen Beobachters nicht nur zu einer periodischen Radialbewegung sondern auch zu einer **periodischen Transversalbewegung**. Dieses Wackeln des Zentralsterns in Form einer periodischen Positionsänderung im Vergleich zu weit entfernten Fixpunkten wie Quasaren oder Galaxien wird mit Teleskopen wie dem **Satellitenteleskop GAIA**, die über eine sehr gute Winkelauflösung verfügen, beobachtet.

Microlensing:

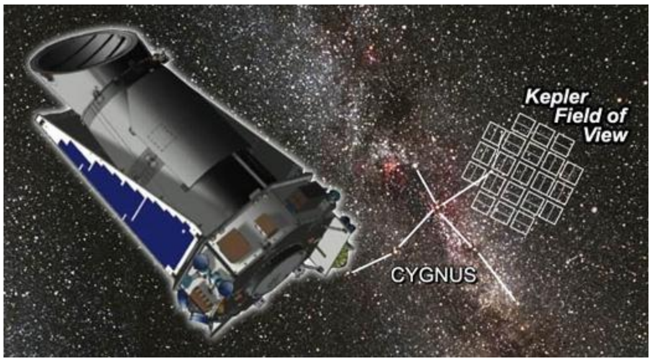
Für die Suche nach weit entfernten Planetensystemen kann man die auf dem **Gravitationslinseneffekt** (vgl. Kap. VIII, S. 447) beruhende Methode des Microlensings nutzen. Die Masse des Exoplaneten führt in seiner Umgebung zu einer Krümmung der Raumzeit. Dadurch wird, wenn der Exoplanet vor seinem Zentralstern vorbeiwandert das vom Zentralstern kommende Licht auf seinem Weg zum irdischen Beobachter geringfügig gebündelt. Die Helligkeit des Zentralsterns erhöht sich dadurch. Microlensing beruht, wie die Transitmethode auf Helligkeitsmessungen. Auf einen Exoplaneten wird bei diesem Verfahren aber nicht aus einer periodischen Abnahme sondern aus einer **periodischen Zunahme der Helligkeit des Zentralsterns** geschlossen.

Satellitenteleskope auf der Suche nach Exoplaneten:

Von 2007 bis 2012 suchte die ESA mit dem Satellitenteleskop **CoRoT** nach Exoplaneten. CoRoT wurde für die sehr **genaue Messung von Sternhelligkeiten** konstruiert und arbeitete mit der **Transitmethode**. Für die Transitmethode ist die Beobachtung außerhalb der Erdatmosphäre von Vorteil, weil sich die Transparenz der Atmosphäre ständig ändert. CoRoT ist ein Spiegelteleskop mit einem Spiegeldurchmesser von $27\ cm$ und einer Brennweite von $120\ cm$. Ein großer Öffnungswinkel ermöglicht die **gleichzeitige Beobachtung vieler Sterne**, was neben einer **langen, zusammenhängenden Beobachtungszeit** gerade für die Transitmethode wichtig ist. Während einer Beobachtungszeit von 150 Tagen führte CoRoT alle 32 Sekunden eine Helligkeitsmessung durch. Das Satellitenteleskop verfügte über eine große Streulichtblende und eine sogenannte Schiefspiegler-Optik, die verhindert, dass die Aufhängungen des Sekundärspiegels störende Strahlkreuze erzeugen.

Die Helligkeitsmessungen durch CoRoT wurden unterstützt durch spektroskopische Untersuchungen am **VLT** sowie durch die Beobachtung mithilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode am **Keck-Observatorium** in Hawaii und am **ESO-3,6m-Teleskop am La Silla-Observatorium** in Chile.

CoRoT entdeckte insgesamt **34 Exoplaneten**. Eine besonders interessante Entdeckung war der vermutlich erdähnliche Exoplanet **CoRoT-7b**. Der Exoplanet war der kleinste bis dahin entdeckte Exoplanet. Er hat eine Masse von 4,8 Erdmassen und einen Radius von 1,75 Erdradien. Seinen Zentralstern CoRoT-7 im Sternbild Einhorn umläuft der Exoplanet in 11 Stunden. Obwohl CoRoT-7b viele Gemeinsamkeiten mit der Erde hat, ist er lebensfeindlich, da er eine einfach gebundene Rotation aufweist und damit seinem Zentralstern immer die gleiche Seite zuwendet.



Das Weltraumteleskop **Kepler** wurde von der NASA entwickelt und sucht seit **2009** ebenfalls mit der Transitmethode nach Exoplaneten. Kepler enthält ein Spiegelteleskop mit $1{,}4\ m$ Spiegeldurchmesser und einer Teleskopöffnung mit $95\ cm$ Durchmesser. Das Satellitenteleskop beobachtete in einem festen Himmelsausschnitt im Sternbild Schwan über mehrere Jahre hinweg kontinuierlich mehr als $100\,000$ Sterne. Die Kepler-Mission muss 2018 wegen Treibstoffmangels beendet werden.

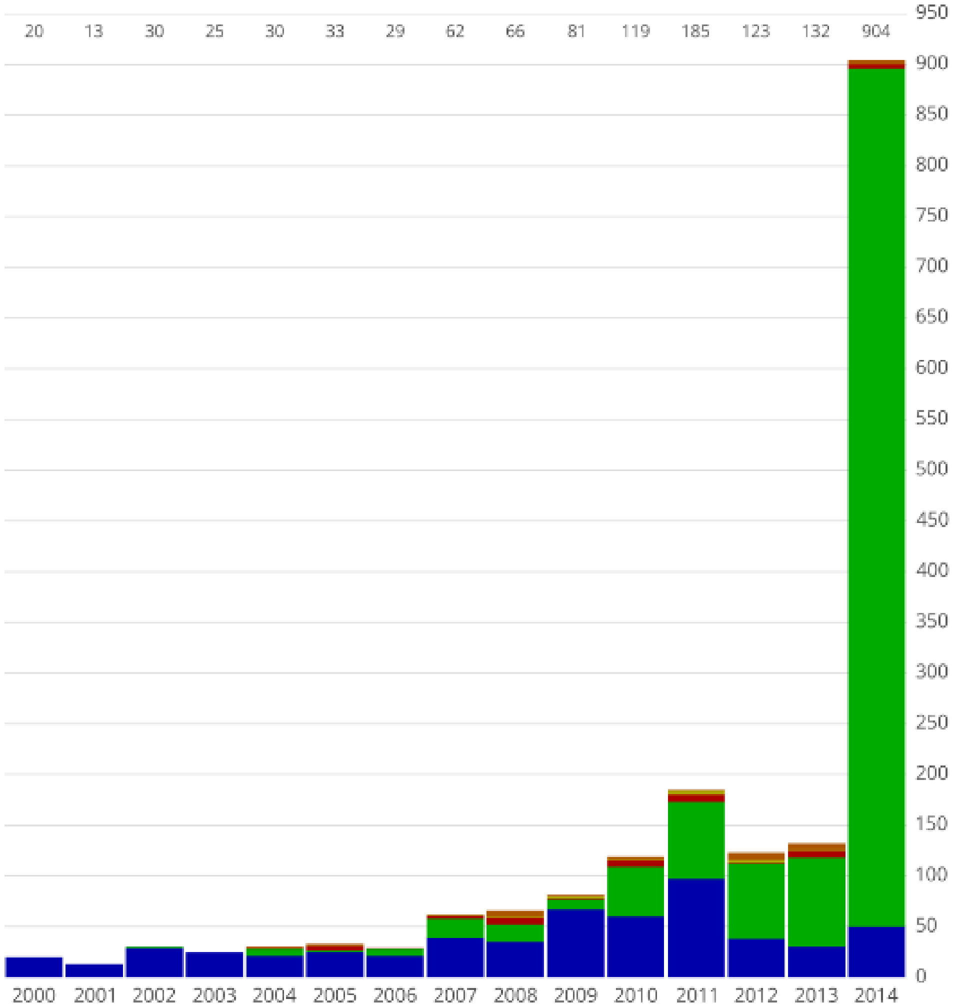
Mit dem Kepler-Weltraumteleskop wurden mehr als **3000 Exoplaneten entdeckt**. Davon sind **207 ungefähr so groß wie die Erde**. Auch die Beobachtungen von Kepler werden durch zusätzliche Beobachtungen mit erdgebundenen Teleskopen unterstützt.

Neben mehreren **erdähnlichen Exoplaneten** wie **Kepler-22b**, **Kepler-186f** und **Kepler-452b** entdeckte Kepler 2011 mit **Kepler-16b**, erstmals einen **Exoplaneten, der ein Doppelsternsystem umläuft**.

Für das Jahr **2024** ist der Start des ESA-Satellitenteleskops **PLATO** geplant. PLATO soll die Arbeit von CoRoT und Kepler fortsetzen. Das Weltraumteleskop wird mit der Transitmethode Sterne in zwei relativ großen Himmelsausschnitten über mehrere Jahre hinweg beobachten. PLATO ist auf die Suche nach erdähnlichen Exoplaneten spezialisiert. Die Leitung der PLATO-Mission liegt beim Deutschen Zentrum für Raumfahrt (DLR).

Die Beobachtungsmethoden im Vergleich:

Die folgende Grafik zeigt, welche Anteile die einzelnen Beobachtungsmethoden im Zeitraum von 2000 bis 2014 an der Entdeckung von Exoplaneten hatten. Man erkennt, dass die Radialgeschwindigkeitsmethode (blau) bis 2011 die erfolgreichste Methode war. Die Transitmethode wird grün dargestellt. Mit ihr wurden in jüngster Zeit - vor allem wegen ihres Einsatzes in den Satellitenteleskopen CoRoT und Kepler - mit Abstand die meiste Exoplaneten gefunden. Die übrigen Methoden spielen eine untergeordnete Rolle.



Leben außerhalb des Sonnensystems:

Im Zentrum der Exoplaneten-Forschung steht die Suche nach Leben außerhalb des Sonnensystems.

Wer nach Leben sucht, muss aber zuerst fragen, wie Leben eigentlich definiert ist. Eine **Definition von Leben** ist nicht unproblematisch, weil wir nur Lebensformen auf der Erde kennen und unseren Definitionen unsere Erfahrungen zugrunde legen.

Üblicherweise sprechen wir von Leben, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Lebewesen passen sich durch Mutation an ihre Umgebung an.
- Lebewesen sind fähig zum Materialaustausch in Form von Atmung, Nahrungsaufnahme und Stoffwechsel.
- Lebewesen pflanzen sich fort und erhalten damit ihre Art.

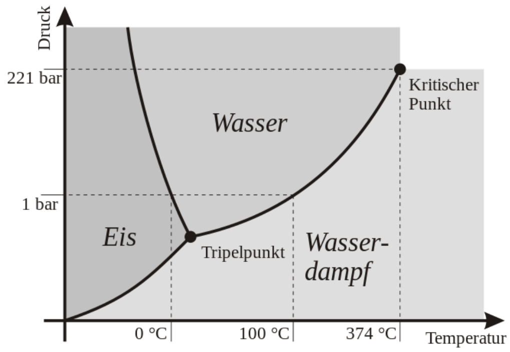
Der **Nachweis von Leben auf Exoplaneten** kann weder in der direkten Beobachtung von Lebewesen noch in einer Kommunikation mit Lebewesen erfolgen. Dazu sind Exoplaneten zu weit entfernt. Man sucht deshalb nach sogenannten **Biosignaturen in den Atmosphären erdähnlicher Exoplaneten**. Das sind Substanzen wie Sauerstoff, Ozon oder Methan, die auf organische Weise, also durch biologische Aktivitäten erzeugt und aufrechterhalten werden.

Damit sich auf einem Exoplaneten Leben entwickeln kann, müssen folgende Voraussetzungen langfristig erfüllt sein:

- **Flüssiges Oberflächenwasser** ist die Grundbedingung für die Entstehung von Leben.
- Die **Oberflächentemperatur** muss stabil in einem Bereich liegen, bei dem Wasser flüssig ist.
- **Energiereiche Strahlung darf die Planetenoberfläche nicht erreichen.**

Für die **physikalischen Eigenschaften von Exoplaneten bzw. ihrer Zentralsterne** bedeutet dies, dass

- ihr **Abstand** so groß ist, dass die Leuchtkraft des Sterns eine **geeignete Oberflächentemperatur auf dem Planeten** erzeugt. Diese Temperatur sollte zwischen $-10°C$ und $100°C$ liegen. Unter $-10°C$ funktioniert der Stoffwechsel nicht mehr. Zwischen $50°C$ und $100°C$ zerfällt Eiweiß.
- die **Atmosphäre des Exoplaneten** an der Planetenoberfläche einen **Druck erzeugt, bei dem Wasser flüssig ist**. Schmelz- und Siedetemperatur von Wasser hängen vom Umgebungsdruck ab. Die Abbildung rechts zeigt die Siedekurve von Wasser.



- die **Masse des Exoplaneten** nicht zu groß oder zu klein ist. Eine zu große Planetenmasse führt zu einer zu dichten Atmosphäre, die wiederum einen zu hohen Druck an der Planetenoderfläche erzeugt. Damit der Planet seine **Atmosphäre dauerhaft festhalten** kann, muss seine Masse ausreichend groß sein. Die Atmosphäre erfüllt eine lebenswichtige Schutzfunktion durch die Absorption energiereicher Strahlung, die vom Zentralstern kommt. Eine zu kleine Planetenmasse verhindert außerdem die Ausbildung eines flüssigen Eisenkerns, der die Voraussetzung für ein **Magnetfeld** ist, das die Oberfläche des Planeten vor der lebensfeindlichen kosmischen Strahlung schützt.
- die **Masse des Zentralsterns** nicht zu groß ist. Die Sternmasse ist nach der Masse-Leuchtkraft-Beziehung (vgl. S. 233) die Ursache der Leuchtkraft des Sterns, beeinflusst aber auch die Energie der Strahlung. Zu schwere Sterne entsenden Strahlung mit einem zu hohen Anteil an lebensfeindlicher UV-Strahlung.
  Die Entwicklung von Leben auf der Erde dauerte etwa 4 Milliarden Jahre. Wenn man diese Zeit als für die Entwicklung von Leben notwendig betrachtet, kann sich Leben nur auf Exoplaneten entwickeln, deren Zentralsterne mindestens 4 Milliarden Jahre lang eine konstante Leuchtkraft besitzen, sich also mindestens 4 Milliarden Jahre lang im Hauptreihenstadium befinden (vgl. S. 235).
  Für die Entwicklungszeit τ eines Sterns gilt

$$\tau = \frac{\tau_\odot}{m^{*2}} \quad \Longrightarrow \quad \tau = \frac{7{,}0 \cdot 10^9\ a}{m^{*2}} > 4 \cdot 10^9\ a \ \Leftrightarrow\ \boldsymbol{m^*} < \sqrt{\frac{7{,}0 \cdot 10^9\ a}{4 \cdot 10^9\ a}} \approx \boldsymbol{1{,}3}$$

  Der Zentralstern eines Exoplaneten, ob dem sich Leben entwickeln kann, muss demnach ein relativ massearmer und damit **sonnenähnlicher Stern** sein.

Der Bereich um einen Stern, in dem die Voraussetzungen für die Entwicklung von Leben erfüllt sind, heißt **habitable Zone**. Wie breit die habitable Zone ist und in welchem Abstand von einem Stern sie beginnt bzw. endet, hängt von der Leuchtkraft des Sterns ab. Um die Grenzen der habitablen Zone um einen Stern grob abzuschätzen, berechnet man die Abstände vom Stern, in denen die Oberflächentemperatur auf einem Planeten bestimmte Grenzwerte erreicht.

<u>Rechenbeispiel</u>: Die habitable Zone im Sonnensystem

Bei der folgenden Berechnung gehen wir wie bei der Berechnung der Oberflächentemperatur von Planeten im Sonnensystem vor (vgl. Kap. IV, S. 189f).

Aus dem Strahlungsgleichgewicht zwischen vom Planeten aufgenommener und abgegebener Strahlungsleistung $P_{\text{auf}} = P_{\text{ab}}$ leiten wir folgenden Zusammenhang zwischen der Leuchtkraft der Sonne $L_{\odot}$ und der Oberflächentemperatur T des Planeten her. Dann lösen wir nach dem Bahnradius des Planeten auf:

$$T = \sqrt[4]{\frac{(1 - \text{Albedo}) \cdot L_{\odot}}{16 \cdot \pi \cdot {r_P}^2 \cdot \sigma}} \quad \Longrightarrow \quad r_P = \sqrt{\frac{(1 - \text{Albedo}) \cdot L_{\odot}}{16 \cdot \pi \cdot \sigma} \cdot \frac{1}{T^2}}$$

Für die Albedo verwenden wir die Albedo der Erde. Sie hat ungefähr den Wert 0,3.

Damit folgt:

$$r_P = \sqrt{\frac{(1 - 0{,}3) \cdot 3{,}846 \cdot 10^{26}\, W}{16 \cdot \pi \cdot 5{,}6704 \cdot 10^{-8}\, \frac{W}{m^2 \cdot K^4}} \cdot \frac{1}{T^2}} \approx 9{,}72 \cdot 10^{15}\, m \cdot K^2 \cdot \frac{1}{T^2}$$

Die Grenzen unserer Abschätzung für die Ausdehnung der habitablen Zone im Sonnensystem erhalten wir, indem wir die oben angegebenen Grenztemperaturen $T_1 = 100°C = 373{,}16\, K$ und $T_2 = -10°C = 263{,}16\, K$ einsetzen.

$$r_1 \approx 9{,}72 \cdot 10^{15}\, m \cdot K^2 \cdot \frac{1}{(373{,}16\, K)^2} \approx 6{,}98 \cdot 10^{10}\, m \approx 0{,}47\, AE$$

$$r_2 \approx 9{,}72 \cdot 10^{15}\, m \cdot K^2 \cdot \frac{1}{(263{,}16\, K)^2} \approx 1{,}40 \cdot 10^{11}\, m \approx 0{,}94\, AE$$

In der habitablen Zone im Sonnensystem befinden sich nach dieser Abschätzung Planeten, die von der Sonne mehr als 0,5 AE aber weniger als 0,9 AE entfernt sind.

Dass es sich hier nur um eine grobe Abschätzung handelt, zeigt die Tatsache, dass die Erde demnach knapp außerhalb der habitablen Zone läge. Bei der Erde ist aber beispielsweise zu berücksichtigen, dass aufgrund des Treibhauseffekts die Erdoberfläche zusätzlich aufgeheizt wird. Wenn die Erdoberfläche durch die Sonnenstrahlung erwärmt wird, strahlt sie Wärmestrahlung im langwelligeren Infrarot-Bereich ab. Vor allem der hohe Wasserdampfgehalt in der Erdatmosphäre reflektiert diese Infrarotstrahlung zur Erdoberfläche zurück. Diesen Effekt bezeichnet man als Treibhauseffekt.

Die **Grenzen der habitablen Zone um die Sonne** liegen nach den gängigen theoretischen Modellen bei etwa 0,8 AE bis 0,9 AE für die innere Grenze bzw. bei 1,2 AE bis 1,4 AE für die äußere Grenze.

Die habitablen Zonen um leuchtschwache M-Sterne, deren Leuchtkraft nur etwa ein Viertel der Sonnenleuchtkraft beträgt, liegen im Bereich von 0,5 AE. Bei Sternen mit der doppelten Sonnenleuchtkraft liegt die habitable Zone bei etwa 1,5 AE.

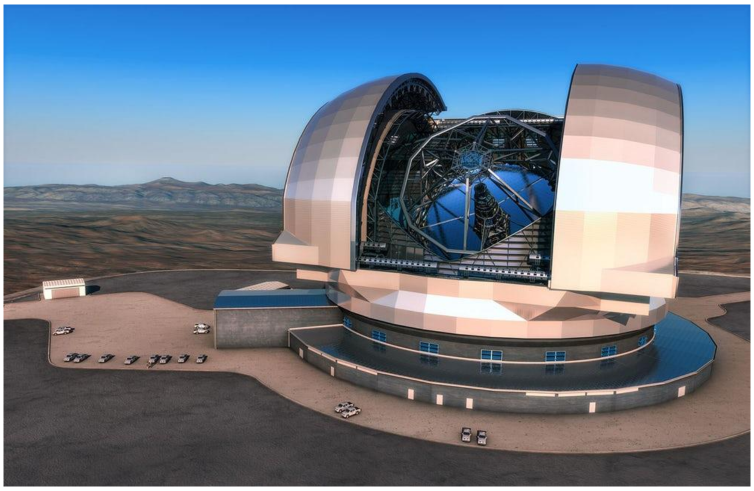
Habitable Zonen können auch **für Galaxien** bestimmt werden. Die Zentralsterne von Exoplaneten dürfen sich beispielsweise nicht zu nahe am galaktischen Zentrum befinden. Dort ist die Dichte junger massereicher Sterne hoch, die nach relativ kurzer Lebenszeit als Supernovae explodieren und dabei das Leben auf Exoplaneten auslöschen würden. Die Habitable Zone der Milchstraße liegt in einer Entfernung von 7 kpc bis 9 kpc vom galaktischen Zentrum. Die Sonne ist etwa 8,4 kpc vom galaktsichen Zentrum entfernt und liegt somit in der habitablen Zone der Milchstraße.

Der aktuelle Forschungsstand:

Die Beobachtung von Exoplaneten zeigte, dass für das Sonnensystem charakteristische Eigenschaften nicht grundsätzlich auf extrasolare Planetensysteme übertragen werden können: Exoplaneten bewegen sich häufig auf stark gekrümmten Ellipsenbahnen. Die Beobachtung von Gasriesen, die ihre Zentralsterne auf engen Bahnen umlaufen, sogenannten „Hot Jupiters" zeigen, dass nicht in allen Planetensystemen die Gesteinsplaneten nahe beim Zentralstern und Gasplaneten in großem Abstand umlaufen.

In den letzten Jahren wurden, insbesondere im Rahmen der Kepler-Mission, mehrere **Exoplaneten entdeckt, die möglicherweise erdähnlich sind und in habitablen Zonen liegen**. Ein wichtiger Vertreter dieser Exoplaneten ist **Kepler 186f**. Er umkreist den $490\ Lj$ entfernten M-Stern Kepler 186 im Sternbild Schwan.

Der Nachweis von Leben auf Exoplaneten erfordert eine vollständige spektroskopische Analyse der Planetenatmosphären. Diese ist aber nur bei direkter Beobachtung möglich. Alle bisher mit Teleskopen direkt beobachtete Exoplaneten sind Gasriesen. Die **direkte Beobachtung erdähnlicher Planeten war bisher nicht möglich**, weil diese Exoplaneten eine geringe scheinbare Helligkeit und einen sehr kleinen Winkelabstand vom Zentralstern haben. Die Möglichkeit, erdähnlicher Exoplaneten direkt zu beobachten, erhofft man sich von den geplanten Riesenteleskopen mit Spiegeldurchmessern von mehr als 30 Metern, wie dem europäischen European Extremely Large Telescope (E-ELT) (oberes Bild) und dem amerikanischen Thirty Meter Telescope (TMT) (unteres Bild). (Vgl. auch Kap. II, S. 47)



Aufgaben zu Kapitel V Sterne:

Aufgabe 1: **Fixsternparallaxe unseres nächsten Fixsterns Alpha Centauri**

1) Welcher Parallaxenwinkel ist für den nächstgelegenen, 4,3 Lichtjahre entfernten Fixstern Alpha Centauri zu erwarten?

2) Wie groß ist die maximale „Reichweite" der Fixsternparallaxe als Methode zur Entfernungsmessung, wenn man davon ausgeht, dass man Winkel bis auf 0,01 Bogensekunden genau messen kann?

Lösung:

zu 1) Skizze (vgl. S. 202):

$$\sin p = \frac{\overline{SE}}{r} = \frac{1\,AE}{4{,}3\,LJ} = \frac{1{,}496 \cdot 10^{11}\,m}{4{,}3 \cdot 9{,}46 \cdot 10^{15}\,m} \approx 3{,}67 \cdot 10^{-6} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{p} \approx (2{,}1 \cdot 10^{-4})° \approx \mathbf{0{,}8''}$$

zu 2) Einem Winkel von $0{,}01''$ entspricht die Entfernung

$$\boldsymbol{r} = \frac{1\,AE}{\sin 0{,}01''} = \frac{1\,AE}{sin\left(\frac{0{,}01°}{3600}\right)} \approx 2{,}1 \cdot 10^{7}\,AE \approx 100\,pc \approx \mathbf{330\,Lj}$$

Aufgabe 2: **Erste Messung einer Fixsternparallaxe durch Friedrich Bessel**

Friedrich Bessel konnte 1838 an der Universitätssternwarte in Königsberg (Ostpreußen) am Doppelstern 61 Cygni im Sternbild Schwan eine Parallaxe von $0{,}31'' \pm 0{,}02''$ messen.

1) Berechne die Entfernung des Sterns 61 Cygni (mit Toleranz!) in Parsec und in Lichtjahren.

2) Wie lang ist das Licht von 61 Cygni bis zu uns unterwegs?

Lösung:

zu 1) $\mathrm{r} = \frac{1''}{\mathrm{p}}\,\mathrm{pc} = \frac{1''}{0{,}31''}\,\mathrm{pc} \approx 3{,}2\,\mathrm{pc}$

Toleranz: $\mathrm{r_{min}} = \frac{1''}{0{,}31'' + 0{,}02''}\,\mathrm{pc} \approx 3{,}0\,\mathrm{pc}$ $\quad \mathrm{r_{max}} = \frac{1''}{0{,}31'' - 0{,}02''}\,\mathrm{pc} \approx 3{,}4\,\mathrm{pc}$

$$\Rightarrow \quad \mathbf{r = 3{,}2\,pc \pm 0{,}2\,pc}$$

zu 2) $\mathbf{r} = 3{,}2\,\mathrm{pc} = 3{,}2 \cdot 3{,}26\,\mathrm{Lj} \approx \mathbf{10{,}4\,Lj}$

Das Licht von 61 Cygni braucht also ca. 10,4 Jahre bis zu uns.

Aufgabe 3: Psychophysisches Gesetz

Die Formel zum Psychophysischen Gesetz lautet $\boldsymbol{m_1 - m_2 = -2{,}5 \cdot lg\frac{E_1}{E_2}}$

1) Leite aus dem Psychophysischen Gesetz eine Funktion her, mit der man für einen beliebigen Stern aus der Strahlungsintensität E die scheinbare Helligkeit m berechnen kann!
Interpretiere die Funktion!

2) Zeichne den Graphen dieser Funktion und interpretiere ihn qualitativ!

Lösung:

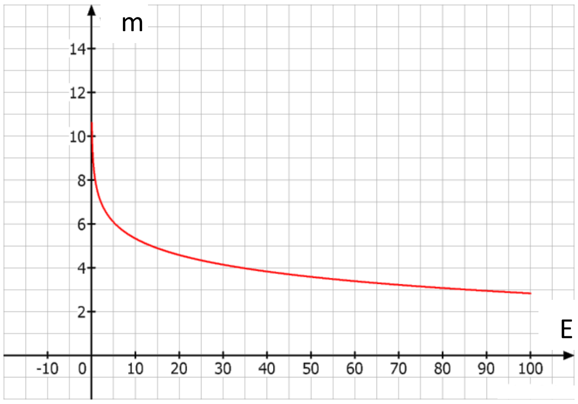
zu 1) Wir stellen zuerst die scheinbare Helligkeit m als Funktion der Strahlungsintensität E dar. Dazu setzen wir für $\mathrm{m_2}$ und $\mathrm{E_2}$ die bekannten Werte der Sonne ein:
$\mathrm{m_S} = -26{,}8$ und $\mathrm{E_S} = 1{,}36\ \frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m^2}}$.

Dann gilt für einen beliebigen Stern mit der Strahlungsintensität E:
$\boldsymbol{m} = -2{,}5 \cdot \lg\frac{E}{1{,}36 \cdot 10^3} + 26{,}8 = -2{,}5 \cdot \lg \mathrm{E} - (-2{,}5) \cdot (-\lg 1{,}36 \cdot 10^3\ ) + 26{,}8 \approx \boldsymbol{-2{,}5 \cdot \lg E + 19}$.

Die Funktion beschreibt einen linearen Zusammenhang zwischen der scheinbaren Helligkeit m (Wahrnehmung) und dem Logarithmus der Strahlungsintensität E (Reiz).

zu 2) Die Helligkeitswahrnehmung nimmt mit abnehmenden Werten für m zu.

Am Verlauf des Graphen erkennt man, dass die Helligkeitswahrnehmung bei gleichmäßiger Zunahme der Strahlungsintensität E (Reiz) keineswegs auch gleichmäßig zunimmt. Je größer der Ausgangswert von E ist, desto langsamer nimmt die Helligkeitswahrnehmung zu.



Aufgabe 4: Strahlungsintensität des Sterns α Centauri

α Centauri ist ein Doppelsternsystem, dessen Komponente A die scheinbare Helligkeit 0,0 und dessen Komponente B die scheinbare Helligkeit 1,4 hat.

1) Welche Strahlungsintensitäten ergeben sich für die beiden Komponenten?

2) Berechne die scheinbare Helligkeit des Gesamtsystems α Cen.

Lösung:

zu 1) Die Strahlungsintensitäten erhalten wir mit der Beziehung $m_1 - m_2 = -2{,}5 \cdot \lg\frac{E_1}{E_2}$.

Wir vergleichen Dabei den Stern jeweils mit der Sonne. Die Strahlungsintensität der Sonne ist die Solarkonstante S.

$$m - m_\odot = -2{,}5 \cdot \lg\frac{E}{S} \quad \Rightarrow \quad E = 10^{\frac{m_\odot - m}{2{,}5}} \cdot S$$

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{E_A} = 10^{\frac{-26{,}74-0{,}0}{2{,}5}} \cdot 1{,}367 \cdot 10^3 \ \frac{W}{m^2} \approx \boldsymbol{2{,}75 \cdot 10^{-8}\ \frac{W}{m^2}}$$

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{E_B} = 10^{\frac{-26{,}74-1{,}4}{2{,}5}} \cdot 1{,}367 \cdot 10^3 \ \frac{W}{m^2} \approx \boldsymbol{7{,}58 \cdot 10^{-9}\ \frac{W}{m^2}}$$

zu 2)

$$E_{ges} = E_A + E_B = 2{,}75 \cdot 10^{-8}\ \frac{W}{m^2} + 7{,}58 \cdot 10^{-9}\ \frac{W}{m^2} \approx 3{,}51 \cdot 10^{-8}\ \frac{W}{m^2}$$

$$\boldsymbol{m_{ges}} = m_\odot - 2{,}5 \cdot \lg\frac{E_{ges}}{S} = -26{,}74 - 2{,}5 \cdot \lg\frac{3{,}51 \cdot 10^{-8}\ \frac{W}{m^2}}{1{,}367 \cdot 10^3\ \frac{W}{m^2}} \approx \boldsymbol{-2{,}63}$$

Aufgabe 5: Das Sternbild Centaurus (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2015)

Eines der auffälligsten Sternbilder des Südhimmels ist Centaurus. In diesem ist α Centauri der hellste Stern. Er besitzt eine scheinbare Helligkeit $m = -0{,}27$ und hat die Entfernung 4,34 Lj. Seine Eigenbewegung μ beträgt 1° pro Jahrtausend.

1) Begründe ohne Rechnung mithilfe der Definition der absoluten Helligkeit, warum für α Centauri die absolute Helligkeit einen größeren Wert als die scheinbare Helligkeit hat.

2) Berechne die Leuchtkraft von α Centauri in Vielfachen der Sonnenleuchtkraft.

3) Bestimme die Parallaxe p von α Centauri und vergleiche diese mit der Eigenbewegung μ.

4) Erläutere zunächst allgemein, wie sich die parallaktische Bewegung und die Eigenbewegung eines Sterns unterscheiden. Begründe dann, weshalb α Centauri, gerade wegen seiner großen Eigenbewegung, einer der ersten Sterne war, bei dem eine Parallaxenbestimmung versucht wurde.

Lösung:

zu 1) Die absolute Helligkeit M ist die scheinbare Helligkeit m, die ein Stern in der Entfernung $10\ pc = 32{,}6\ LJ$ hätte. Je größer der Wert von M bzw. m, desto geringer die wahrgenommene Helligkeit. α Centauri ist mit 4,34 LJ weniger als 10 pc entfernt. Der Stern würde in der Entfernung 10 pc also weniger hell erscheinen als in seiner tatsächlichen Entfernung. Deshalb muss gelten: $M > m$.

zu 2) Absolute Helligkeit M mit dem Entfernungsmodul: $m - M = 5 \cdot \lg\frac{r}{10\ pc}$

$$\Rightarrow \quad M = m - 5 \cdot \lg\frac{r}{10\ pc} = -0{,}27 - 5 \cdot \lg\frac{4{,}34 \cdot 0{,}3066\ pc}{10\ pc} \approx 4{,}11$$

Relative Leuchtkraft L^*: $M - M_{Sonne} = -2{,}5 \cdot L^* \ \Rightarrow \ \boldsymbol{L^*} = 10^{\frac{M_{Sonne} - M}{2{,}5}} = 10^{\frac{4{,}8-(4{,}11)}{2{,}5}} \approx \boldsymbol{1{,}9}$

zu 3) $\frac{r}{1\,pc} = \frac{1''}{p} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{p} = \frac{1\,pc}{r} \cdot 1'' = \frac{1\,pc}{4{,}34 \cdot 0{,}3066\,pc} \cdot 1'' \approx \mathbf{0{,}752''}$ (<u>jährliche</u> Parallaxe)

Jährliche Eigenbewegung: $\frac{\boldsymbol{\mu}}{\mathbf{1000}} = 0{,}001° = \mathbf{3{,}6''}$

Die jährliche Eigenbewegung von α Centauri ist deutlich größer als die Parallaxe.

zu 4) Die Parallaxenbewegung ist eine scheinbare jährliche Bewegung des Sterns auf einer Ellipsenbahn, deren Ursache die Wechselnde Blickrichtung zum Stern bei der Bewegung der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne ist. Die Eigenbewegung des Sterns ist hingegen eine tatsächliche Bewegung des Sterns quer zur Beobachtungsrichtung.

Eigenbewegung und Parallaxe lassen sich von der Erde aus umso deutlicher beobachten, je näher der Stern ist. Aus der beobachteten starken Eigenbewegung schloss man auf die große Nähe von α Centauri. Weil für einen nahen Stern ein großer Parallaxenwinkel zu erwarten ist, versuchte man bei diesem Stern früh, eine Parallaxe zu beobachten.

<u>Aufgabe 6</u>: Beteigeuze (aus einer Abituraufgabe von 1998)

Der helle Schulterstern des Orion mit dem Namen Beteigeuze, ist von uns 540 Lichtjahre entfernt. Durchmesser und Helligkeit sind zeitlich nicht konstant. Seine Abstrahlung sei als Schwarzkörperstrahlung angenommen. Er ist einer der wenigen Sterne, dessen Winkeldurchmesser direkt (interferometrisch) gemessen werden konnte.

Im Folgenden werde Beteigeuze stets im Zustand des Helligkeitsmaximums betrachtet, in dem die scheinbare Helligkeit $m = 0{,}4$ und der Winkeldurchmesser $0{,}054$“ betragen.

1) Warum versagt bei Beteigeuze die Entfernungsbestimmung nach der Methode der trigonometrischen Parallaxe mit erdgebundenen Teleskopen?

2) Berechne für Beteigeuze die absolute Helligkeit und die Leuchtkraft als Vielfaches der Sonnenleuchtkraft.

3) Beteigeuze hat eine geringere Oberflächentemperatur als die Sonne. Dennoch hat Beteigeuze im Vergleich zu ihr eine wesentlich größere Leuchtkraft. Gib hierfür eine Erklärung und berechne den Radius von Beteigeuze als Vielfaches des Sonnenradius. Bis zu welcher Planetenbahn würde Beteigeuzes Oberfläche fast hinreichen, wenn dieser Stern statt der Sonne in unserem Planetensystem stünde? (*Hinweis*: Verwende das Gesetz von Stefan und Boltzmann!)

4) Berechne die Oberflächentemperatur von Beteigeuze.

5) Berechne die Wellenlänge, bei der Beteigeuze das Maximum der Strahlungsintensität hat. In welchem Spektralbereich liegt dieses Maximum? In welcher Farbe erscheint deshalb Beteigeuze dem Beobachter?

<u>Lösung</u>:

zu 1) Die Entfernung von $450\ Lj$ führt zu einem Parallaxenwinkel von weniger als 0,01“ (vgl. S. 202)

zu 2)

$$m - M = 5 \cdot lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right) \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{M} = m - 5 \cdot lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right) = 0{,}4 - 5 \cdot lg\left(\frac{\frac{540}{3{,}26}\,pc}{10\,pc}\right) \approx \mathbf{-5{,}7}$$

$$M - M_{\odot} = -2{,}5 \cdot lg(L^*) \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{L^*} = 10^{\frac{M_{\odot} - M}{2{,}5}} = 10^{\frac{4{,}83 + 5{,}7}{2{,}5}} \approx \mathbf{1{,}6 \cdot 10^4}$$

zu 3) Aus dem Gesetz von Stefan und Boltzmann $L = P = \sigma \cdot A \cdot T^4 = \sigma \cdot R^2\pi \cdot T^4$ folgt:

$$L^* = (R^*)^2(T^*)^4$$

Damit Beteigeuze trotz niedrigerer Oberflächentemperatur dennoch eine größere Leuchtkraft als die Sonne hat, muss Beteigeuze wesentlich größer als die Sonne sein.

$$\frac{2 \cdot R}{2\pi \cdot r} = \frac{0{,}054''}{360 \cdot 3600''} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{R} = \pi \cdot r \cdot \frac{0{,}054''}{360 \cdot 3600''} = \pi \cdot 540 \cdot 6{,}324 \cdot 10^4\ AE \cdot \frac{0{,}054''}{360 \cdot 3600''} \approx \boldsymbol{4{,}5\ AE}$$

Jupiter ist von der Erde $5{,}2\ AE$ entfernt, Mars $1{,}52\ AE$. Damit würde Beteigeuze fast bis zum Jupiter reichen.

$$\boldsymbol{R^*} = \frac{R}{R_\odot} = \frac{4{,}5 \cdot 1{,}496 \cdot 10^{11}\ m}{6{,}957 \cdot 10^8\ m} \approx \boldsymbol{9{,}7 \cdot 10^2\ m}$$

zu 4)

$$L^* = (R^*)^2 \cdot (T^*)^4 = \sigma \cdot (R^*)^2 \cdot \frac{T^4}{T_\odot{}^4} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{T} = \sqrt[4]{\frac{L^*}{(R^*)^2}} \cdot T_\odot = \sqrt[4]{\frac{\boldsymbol{1{,}6 \cdot 10^4}}{(\boldsymbol{9{,}7 \cdot 10^2\ m})^2}} \cdot 5800\ K \approx \boldsymbol{2100\ K}$$

zu 5)

$$\boldsymbol{\lambda_{max}} = \frac{b}{T} = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}\ m \cdot K}{2100\ K} \approx \boldsymbol{1{,}4 \cdot 10^{-6}\ m}$$

Diese Wellenlänge liegt im Infrarot-Bereich. Beteigeuze erscheint dem Beobachter rot.

Aufgabe 7: Anwendungen des Dopplereffekts auf die Sonne

1) Die Sonne dreht sich am Äquator in 25 Tagen einmal um ihre Achse. Ein Erdbeobachter nimmt Spektren von beiden äquatorialen Rändern der Sonnenscheibe auf. Wie groß ist die Verschiebung der H_γ-Linie des Wasserstoffs (Laborwert $\lambda_0 = 434{,}0466\ nm$) zwischen den beiden Spektren?

2) Die in den Granulen der der Photosphäre aufsteigende oder absinkende Sonnenmaterie führt zu Deformierungen der Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum. Ein von der Mitte der Sonnenscheibe aufgenommenes Spektrum zeigt, dass die H_γ-Linie bis $0{,}0015\ nm$ nach kürzeren und ebenso auch höheren Wellenlängen hin „verbogen" ist. Berechne, mit welcher Geschwindigkeit sich die Materie in den Granulen nach oben und nach unten bewegt.

Lösung:

zu 1) Bahngeschwindigkeit v eines Punktes am äquatorialen Rand der Sonnenscheibe:

$$v = \frac{2\pi R_\odot}{T} = \frac{2\pi \cdot 6{,}96 \cdot 10^8\ m}{25 \cdot 24 \cdot 3600\ s} \approx 2025\ \frac{m}{s}$$

Wellenlängenverschiebung der H_γ-Linie :

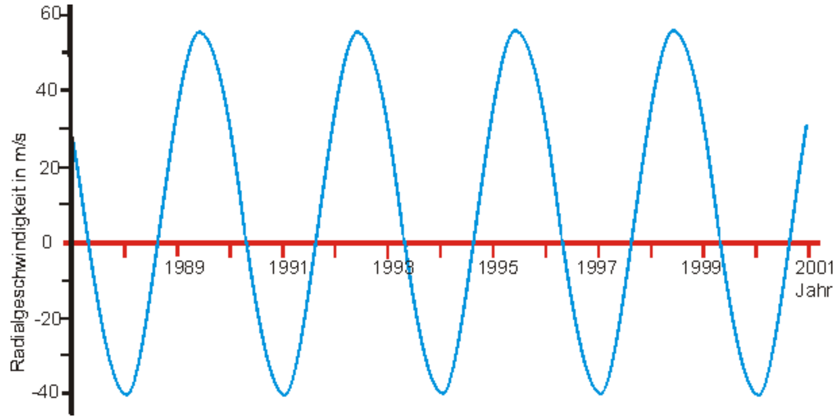
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{\Delta\lambda} = \frac{v}{c} \cdot \lambda_0 = \frac{2025\ \frac{m}{s}}{3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}} \cdot 434{,}0466\ nm \approx \boldsymbol{0{,}0029\ nm}$$

zu 2) Die Radialbewegung von Sonnenmaterie in der Granule und an deren Rand führt zu einer Blau- bzw. Rotverschiebung im Sonnenspektrum:

$$\frac{|\Delta\lambda|}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{v} = \frac{|\Delta\lambda|}{\lambda_0} \cdot c = \frac{0{,}0015\ nm}{434{,}0466\ nm} \cdot 3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s} \approx \boldsymbol{1\ \frac{km}{s}}$$

Aufgabe 8: **Der Stern 47 Ursa Majoris (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2006)**

Der Stern 47 UMa gehört zum Sternbild Großer Bär. Aus spektroskopischen Untersuchungen erhält man für diesen Stern die im folgenden Diagramm dargestellte periodische Veränderung seiner Radialgeschwindigkeit.



Die einzige mit den Beobachtungen verträgliche Erklärung für die periodisch veränderliche Radialgeschwindigkeit ist, dass 47UMa einen Planeten als Begleiter hat und beide um ihren gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Für die folgenden Überlegungen wird angenommen, dass die Beobachtungsrichtung in der Umlaufsebene von Stern und Planet liegt.

1) Erläutere unter Angabe der erforderlichen Formel, wie man mit Hilfe von spektroskopischen Untersuchungen die Radialgeschwindigkeit von 47Uma bestimmen kann!

2) Begründe anhand des Diagramms, dass sich der Schwerpunkt des Systems vom Beobachter weg bewegt. Bestimme die Geschwindigkeit dieser Bewegung!

3) Erläutere unter Verwendung einer Skizze den im Diagramm dargestellten zeitlichen Verlauf der Radialgeschwindigkeit!

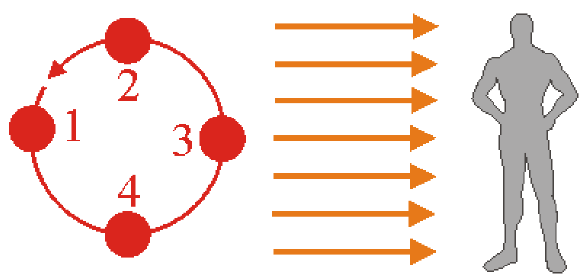
Lösung:

zu 1) Die Geschwindigkeiten erhält man durch Beobachtung charakteristischer Wellenlängen im (Absorptions-) Spektrum von 47UMa. Von diesen wird die Verschiebung der Wellenlänge auf Grund des Dopplereffektes gegenüber der Laborwellenlänge bestimmt.

Dabei gilt: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$

zu 2) Am Diagramm sieht man: $v_{max} = 55\ \frac{m}{s}$ und $v_{min} = -40\ \frac{m}{s}$
Der Mittelwert ist 7,5 $\frac{m}{s}$. Der Schwerpunkt des Sterns bewegt sich also mit 7,5 $\frac{m}{s}$ vom Beobachter weg.

zu 3) In den **Positionen 1 und 3** bewegt sich der Stern 47UMa quer zum Beobachter. Seine Radialgeschwindigkeit ist die des Schwerpunktes.



In **Position 2** bewegt sich der Stern vom Beobachter weg. Seine Radialgeschwindigkeit ist maximal und ist die Summe aus Radialgeschwindigkeit und Schwerpunktgeschwindigkeit.
In **Position 4** bewegt er sich auf den Beobachter zu. Seine Geschwindigkeit ist Radialgeschwindigkeit minus Schwerpunktgeschwindigkeit.

<u>Aufgabe 9</u>: **Das Doppelsternsystem Algol (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2016)**

Die Komponenten A und B von Algol im Sternbild Perseus bilden in einer Entfernung von 91,3 Lj ein Doppelsternsystem. Algol A und Algol B bewegen sich mit den Bahngeschwindigkeiten $v_A = 44\ \frac{km}{s}$ und $v_B = 201\ \frac{km}{s}$ näherungsweise auf Kreisbahnen um den gemeinsamen Schwerpunkt und haben die Umlaufdauer 2,9 Tage. Nimm an, dass Bahn- und Beobachtungsebene übereinstimmen und der Schwerpunkt des Doppelsternsystems relativ zur Erde ruht.

1) Jede Spektrallinie im Spektrum des Doppelsterns spaltet sich in zwei Linien auf. Erkläre die Spektrallinienaufspaltung und beschreibe das Verhalten zweier solcher Linien während eines Umlaufs beider Komponenten!

2) Zeige, dass für die Bahnradien $r_A = 1{,}8 \cdot 10^9\ m$ und $r_B = 8{,}0 \cdot 10^9\ m$ gilt!

3) Eine theoretische Beziehung für den kleinstmöglichen Winkelabstand α zweier Sterne, die in einem Fernrohr gerade noch getrennt beobachtet werden können, lautet $\sin\alpha = \frac{1{,}22\cdot\lambda}{D}$; hierbei ist D der Durchmesser der Fernrohröffnung und λ die Wellenlänge des beobachteten Sternlichts. Entscheide rechnerisch, ob die Komponenten von Algol in einem gewöhnlichen Linsenfernrohr für $\lambda = 480\ nm$ getrennt beobachtbar sind!

<u>Lösung</u>:

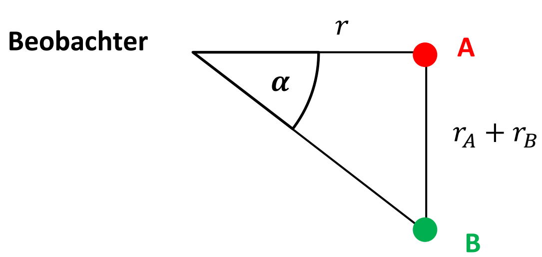
zu 1) Wenn Algol A sich vom irdischen Beobachter weg bewegt, bewegt sich Algol B auf den Beobachter zu. $\Longrightarrow$ Dopplerverschiebung von λ_0 um $\Delta\lambda$ zu größeren bzw. kleineren Wellenlängen λ.
Nur die Geschwindigkeitskomponente in oder gegen die Beobachtungsrichtung trägt zur Dopplerverschiebung bei. Deshalb bewegen sich die beiden Linien gegensätzlich zueinander und vollführen beide während einer Umlaufdauer eine volle Schwingung um die gleiche Ruhelage λ_0. Dabei zeigt die zu Algol B gehörige Linie eine größere maximale Auslenkung $\Delta\lambda$.

zu 2)

$$v_A = \frac{2\pi r_A}{T} \quad\Longrightarrow\quad \boldsymbol{r_A} = \frac{v_A \cdot T}{2\pi} = \frac{44\cdot 10^3\,\frac{m}{s}\cdot 2{,}9\cdot 24\cdot 3600\ s}{2\pi} \approx \boldsymbol{1{,}8\cdot 10^9\ m}$$

und analog: $\boldsymbol{r_B = 8{,}0\cdot 10^9\ m}$

zu 3)



In der Skizze ist die Position des Doppelsternsystems relativ zum Beobachter dargestellt, in der der Winkelabstand α am größten ist. Das Dreieck wurde näherungsweise rechtwinklig gewählt, damit sich die sin- und tan-Beziehungen für rechtwinklige Dreiecke anwenden lassen. Weil der Abstand r zum Doppelsternsystem sehr groß ist, ist diese Näherung zulässig.

Wegen des großen Abstands r ist der Winkel α kein
und die **Kleinwinkelnäherung $\boldsymbol{\sin\alpha \approx \tan\alpha}$** darf angewendet werden.

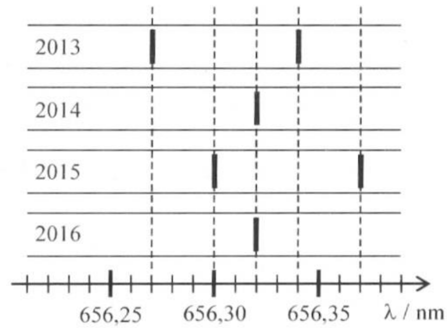
$$\tan\alpha \approx \frac{r_A + r_B}{r} = \frac{1{,}8\cdot 10^9\ m + 8{,}0\cdot 10^9\ m}{91{,}3\cdot 9{,}46\cdot 10^{15}\ m} \approx 1{,}13\cdot 10^{-8}$$

$$\sin\alpha = \frac{1{,}22\cdot\lambda}{D} \approx \tan\alpha \quad\Longrightarrow\quad \boldsymbol{D} \approx \frac{1{,}22\cdot 480\cdot 10^{-9}\ m}{1{,}13\cdot 10^{-8}} \approx \boldsymbol{52\ m}$$

Ein Linsenfernrohr mit einem Objektivdurchmesser von 52 m gibt es nicht. Deshalb können mit einem „gewöhnlichen Linsenfernrohr“ Algol A und Algol B nicht getrennt wahrgenommen werden.

Aufgabe 10: **Spektroskopische Untersuchungen eines Doppelsterns (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2017)**

In der Abbildung ist jeweils die H_α-Linie im Spektrum der beiden Komponenten eines Doppelsternsystems für vier aufeinanderfolgende Jahre im zeitlichen Abstand von jeweils genau einem Jahr markiert. Nimm vereinfachend an, dass sich die beiden Sterne auf Kreisbahnen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen und dass die Erde in der gemeinsamen Bahnebene liegt.



1) Erkläre, warum im Jahr 2013 die H_α-Linie im Spektrum der beiden Sterne bei unterschiedlichen Wellenlängen beobachtet wird. Begründe, dass die Umlaufdauer T des Systems $T = 4{,}0\ a$ beträgt.

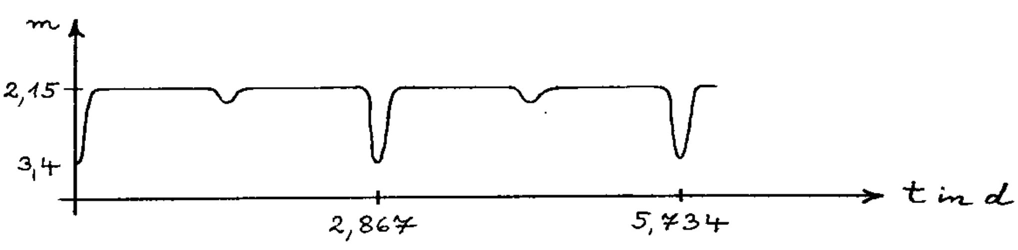
2) Beschrifte in der Abbildung die Linien, die zum massereicheren Stern gehören, mit A, die Linien, die zum massеärmeren Stern gehören, mit B und begründen Sie Ihre Entscheidung.

3) Zeige, dass die Bahngeschwindigkeit des massereicheren Sterns um den gemeinsamen Schwerpunkt $v_A = 9{,}1\ \frac{km}{s}$ beträgt und berechne den Bahnradius r_A des massereicheren Sterns.

4) Begründe, dass $\frac{r_A}{r_B} = \frac{2}{5}$ gilt. Berechne die Gesamtmasse $M = m_A + m_B$ des Doppelsternsystems.

5) Die gemessene Wellenlänge der H_α-Linie in den Jahren 2014 und 2016 ist etwas größer als der Laborwert der Linie. Gib einen Grund dafür an.

Algol ist nicht nur ein spektroskopisches sondern auch ein fotometrisches bzw. bedeckungsveränderliches Doppelsternsystem. Für die scheinbare Helligkeit der A-Komponente kann folgende Helligkeitskurve aufgenommen werden:



6) Erläutere das Zustandekommen der Helligkeitskurve!

Lösung:

Die Bewegung der Komponenten des Doppelsternsystems um den gemeinsamen Schwerpunkt ist ein Zweikörperproblem. Wir verwenden bei dieser Aufgabe grundsätzlich die Kreisbahnnäherung.

zu 1)

Die Bahnen der Komponenten des Doppelsternsystems um ihren gemeinsamen Schwerpunkt haben unterschiedliche Radien r und deshalb bei gleicher Umlaufzeit T auch unterschiedliche Bahngeschwindigkeiten v. Wegen $v = \frac{2\pi r}{T}$ gilt $v \sim r$. Zu einem größeren Bahnradius gehört also eine höhere Bahngeschwindigkeit.

In den Jahren 2013 und 2015 war der radiale Anteil der Bahngeschwindigkeit maximal. Das heißt: Die Komponenten des Doppelsternsystems bewegten sich direkt auf den Beobachter zu bzw. von ihm weg. Zu diesen Zeitpunkten sind die Radialgeschwindigkeit und Bahngeschwindigkeit gleich. (Vgl. Skizze auf S. 220).

Wegen $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$ führt aber eine höhere Radialgeschwindigkeit zu einer größeren Dopplerverschiebung $\Delta\lambda$.

Alle zwei Jahre ist der radiale Anteil der Bahngeschwindigkeit 0. Das heißt: Die Komponenten bewegen sich nur tangential zum Beobachter (vgl. Skizze auf S. 220). Eine Komponente beispielsweise im Jahr 2014 nach links und im Jahr 2016 nach rechts. Deshalb dauert ein Umlauf des Doppelsternsystems 4 Jahre.

zu 2)

Für das Doppelsternsystem als Zweikörpersystem gilt die Schwerpunktgleichung $m_A \cdot r_A = m_B \cdot r_B$.
$\Longrightarrow$ Die Komponente mit der größeren Masse m_A hat den kleineren Bahnradius r_A.

$$m_A > m_B \quad \Longrightarrow \quad r_A < r_B \quad \Longrightarrow \quad v_A < v_B \Longrightarrow \quad \Delta\lambda_A < \Delta\lambda_B$$

Die Linien mit der größeren Dopplerverschiebung gehören also zum massereicheren Stern A.

zu 3)

$$\boldsymbol{v_A} = \frac{\Delta\lambda_A}{\lambda_0} \cdot c = \frac{0{,}02\ nm}{656{,}30\ nm} \cdot 3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s} \approx \mathbf{9{,}1}\ \frac{\boldsymbol{km}}{\boldsymbol{s}}$$

$$v_A = \frac{2\pi r_A}{T} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{r_A} = \frac{v_A \cdot T}{2\pi} = \frac{9{,}1\ \frac{km}{s} \cdot 4 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600\ s}{2\pi} \approx \mathbf{1{,}8 \cdot 10^8}\ \boldsymbol{km}$$

zu 4)

$$v_B = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_0} \cdot c = \frac{0{,}05\ nm}{656{,}30\ nm} \cdot c = \frac{5}{2} \cdot v_A$$

$$v \sim r \quad \Longrightarrow \quad r_B = \frac{5}{2} \cdot r_A \Longrightarrow \quad \frac{\boldsymbol{r_A}}{\boldsymbol{r_B}} = \frac{\mathbf{2}}{\mathbf{5}}$$

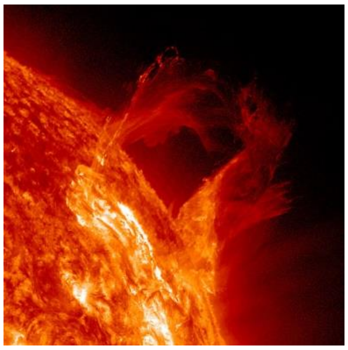
$$\frac{T^2}{(r_A + r_B)^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot (m_A + m_B)} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M}$$

$$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{M} = \frac{4\pi^2 \cdot \left(r_A + \frac{5}{2} \cdot r_A\right)^3}{G \cdot T^2} = \frac{4\pi^2 \cdot \left(\frac{7}{2}\right)^3 (1{,}8 \cdot 10^{11}\ m)^3}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot (4 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600\ s)^2} \approx \mathbf{9{,}3 \cdot 10^{30}}\ \boldsymbol{kg}$$

zu 5) Das Doppelsternsystem entfernt sich als Ganzes von uns. Deshalb ist auch die „Referenz-H_α-Linie" (Jahre 2014 und 2016) zu einer größeren Wellenlänge hin verschoben.

zu 6) Vgl. S. 221

Aufgabe 11: Entwicklung der Sonne



1) Wie alt ist die Sonne und wie ist sie entstanden? In welchem Entwicklungsstadium befindet sie sich momentan? Wie wird sich die Sonne in Zukunft entwickeln?
(Informiere Dich im Internet!)

Während der Entwicklungszeit ist die Energiequelle eines Sterns die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium. In der Sonne ist die dabei wichtigste Fusionsreaktion die Proton-Proton-Reaktion, bei der vier Protonen zu einem ${}^4_2He$-Kern verschmelzen.

2) Erläutere ein zweites Phänomen, das die Entwicklungszeit eines Sterns charakterisiert!

3) Ein ${}^4_2He$-Kern heißt auch α-Teilchen. Vergleiche die Massen der Bestandteile eines ${}^4_2He$-Kerns mit der Masse des ${}^4_2He$-Kerns. Was fällt auf?
(Schlage die benötigten Daten in der Formelsammlung nach!)

Der Unterschied zwischen der Masse der Bestandteile eines ${}^4_2He$-Kerns und der Masse des (leichteren) ${}^4_2He$-Kerns heißt Massendefekt Δm.

Dieser Massendefekt wird bei der Kernfusion nach $E = \Delta m \cdot c^2$ in Energie umgewandelt.

4) Die Sonne strahlt seit ihrer Entstehung mit fast gleichbleibender Leuchtkraft von $3{,}82 \cdot 10^{26}$ Watt.

Zeige, dass der Massenverlust, den die Sonne infolge der Wasserstoff-Helium-Fusion in ihrem Inneren seit ihrer Entstehung (vgl. Teilaufgabe **1)**) erlitten hat, weniger als ein Promille der Sonnenmasse beträgt!

5) Gib die vollständige Reaktionsgleichung der Proton-Proton-Reaktion an!

6) Warum findet Kernfusion nur im Kern der Sonne statt?

Lösung:

zu 1) Die Sonne ist etwa 4,5 Milliarden Jahre alt.
Sie befindet sich in der Entwicklungszeit. Man nennt diesen Entwicklungszustand wegen der Lage der Sonne im Hertzsprung-Russel-Diagramm auch „Hauptreihenstadium“.

Wenn der Kern der Sonne im Wesentlichen zu einem Heliumkern fusioniert ist, erlischt die Kernfusion im Sonnenkern. Der Gravitationsdruck kontrahiert den Kern und heizt in so weit auf, dass Helium zu Kohlenstoff fusioniert. In der Sternhülle kommt es nun zum Schalenbrennen und die Sonne bläht sich zu einem Roten Riesen auf.

Am Ende des Roten-Riesen-Stadiums, wenn die Kernfusion im Sonnenkern endgültig erloschen ist, stößt die Sonne ihre Sternhülle durch einen sehr starken Sonnenwind ab. Sie wird zum Planetarischen Nebel.

Nach Abstoßung der Hülle bleibt von der Sonne ein sehr kompakter, heißer aber leuchtschwacher Sternrest übrig, ein Weißer Zwerg.
Der Weiße Zwerg kühlt allmählich aus.

zu 2) Hydrostatisches Gleichgewicht von Gravitationsdruck und Strahlungsdruck. Der Stern ist stabil.

zu 3)

$$2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n = 2 \cdot 938{,}27\ \frac{MeV}{c^2} + 2 \cdot 939{,}57\ \frac{MeV}{c^2} = 3{,}7557\ \frac{GeV}{c^2} \qquad m_\alpha = 3{,}72738\ \frac{GeV}{c^2}$$

Der ${}^4_2He$-Kern ist also etwas leichter als seine (freien) Bestandteile (2 Protonen und 2 Neutronen).

zu 4) Massendefekt pro Fusionsvorgang:

$$\Delta m = 3{,}7557\ \frac{GeV}{c^2} - 3{,}72738\ \frac{GeV}{c^2} = 28{,}32\ \frac{keV}{c^2}$$

Nach $E = mc^2$ entspricht dieser Massendefekt einer Energie von 28,32 keV.

Bei einer Strahlungsleistung von $3{,}82 \cdot 10^{26}\ W$ hat die Sonne im Lauf von 4,5 Milliarden Jahren die Energie $E = L \cdot t = 3{,}82 \cdot 10^{26}\ W \cdot 4{,}5 \cdot 10^9 \cdot 365{,}25 \cdot 24 \cdot 3600\ s \approx 5{,}425 \cdot 10^{43}\ J$ abgestrahlt.

Das entspricht einem Massenverlust

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{5{,}425 \cdot 10^{43}\ J}{\left(3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}\right)^2} \approx 6{,}03 \cdot 10^{26}\ kg$$

$$\frac{\Delta m}{\Delta m_{Sonne}} = \frac{6{,}03 \cdot 10^{26}\ kg}{1{,}989 \cdot 10^{30}\ kg} \approx 0{,}03\ \%$$

zu 5) $6 \cdot {}_1^1H \rightarrow {}_2^4He + 2 \cdot {}_1^1H + 2 \cdot {}_1^0e^+ + 2 \cdot \gamma + 2 \cdot {}_0^0\nu$

Bilanz: 4 ${}_1^1H$-Kerne verschmelzen zu einem ${}_2^4He$-Kern.

zu 6) Eine Bedingung für die Kernfusion ist eine hohe Temperatur.
Der Gravitationsdruck bewirkt im Sonnenkern eine Temperatur von etwa 15 Millionen Grad. Diese Temperatur ist notwendig für die Fusion von Wasserstoff zu Helium.

<u>Aufgabe 12</u>: Die Sonne als Hauptreihenstern und als Roter Riese (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2015)

Derzeit ist die Sonne ein Hauptreihenstern, der durch Fusion von Wasserstoff Energie freisetzt. Das Hauptreihenstadium der Sonne dauert so lange an, bis die Masse des Wasserstoffs, der bereits fusioniert ist, einen Wert erreicht hat, der 7,5% der aktuellen Masse der Sonne entspricht. Gehen Sie im Folgenden davon aus, dass die Sonne aufgrund der Fusion von einem Kilogramm Wasserstoff die Energie $6{,}3 \cdot 10^{14}\ J$ abstrahlt.

1) Berechne mithilfe der angegebenen Daten den Massenverlust der Sonne während ihres Hauptreihenstadiums und vergleichen Sie diesen mit der derzeitigen Masse der Sonne.

In Milliarden von Jahren wird sich die Sonne zu einem Roten Riesen entwickeln. Modellrechnungen zufolge wird die Erde dann die Sonne in einem mittleren Abstand von 1,5 AE mit einer Umlaufzeit von 2,2 Jahren umrunden. Gehe im Weiteren davon aus, dass die Leuchtkraft der Sonne im Roten-Riesen-Stadium das $2{,}3 \cdot 10^3$-fache ihrer heutigen Leuchtkraft betragen wird.

2) Vergleiche zunächst die obigen Daten zur zukünftigen Erde mit den aktuellen Daten des Mars. Berechne dann die Masse der Sonne im Roten-Riesen-Stadium in Vielfachen ihrer aktuellen Masse.

3) Im Roten-Riesen-Stadium der Sonne wir die Erde ihre Atmosphäre weitestgehend verloren haben. Schätze für die zukünftige Erde die mittlere Oberflächentemperatur ab. Nimm hierbei an, dass die zukünftige Erde 75% der einfallenden Sonnenstrahlung gleichmäßig abstrahlen und sich im Strahlungsgleichgewicht befinden wird.

Lösung:

zu 1) Masse des während des HR-Stadiums fusionierten Wasserstoffs:

$m_H = 7{,}5\% \cdot m_\odot = 0{,}075 \cdot 1{,}989 \cdot 10^{30}\ kg \approx \ kg$

Massendefekt Δm pro $1\ kg$ fusioniertem Wasserstoff:

$$E = \Delta m \cdot c^2 \quad \Longrightarrow \quad \Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{6{,}3 \cdot 10^{14}\ J}{\left(3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}\right)^2} \approx 7{,}0 \cdot 10^{-3}\ kg$$

Energieverlust der Sonne während ihres HR-Stadiums:

$$\boldsymbol{\Delta m_\odot} = 1{,}432 \cdot 10^{19} \cdot 7{,}0 \cdot 10^{-3}\ kg \approx \mathbf{1{,}432 \cdot 10^{-19}}\ \boldsymbol{kg}$$

$$\frac{\boldsymbol{\Delta m_\odot}}{\boldsymbol{m_\odot}} = \frac{1{,}432 \cdot 10^{-19}\ kg}{1{,}989 \cdot 10^{30}\ kg} \approx 5{,}04 \cdot 10^{-4} \approx \mathbf{0{,}05}\%$$

Die Sonne verliert während ihres Hauptreihenstadiums nur etwa 0,5 Promille ihrer Masse durch Energieabstrahlung.

zu 2) $r_{Mars} = 1{,}52\ AE \approx r_{Erde,neu}$

Die Erde wird auf eine Umlaufbahn abdriften, die etwa der jetzigen Marsbahn entspricht.

$T_{Mars} = 1{,}881\ a < 2{,}2\ a = r_{Erde,neu}$

Die Umlaufzeit der Erde wird etwas größer sein als die jetzige Umlaufzeit des Mars.

$$F_Z = F_G \quad \Longrightarrow \quad m_E \cdot \frac{v^2}{r_E} = m_E \cdot \frac{\left(\frac{2\pi {r_E}^2}{T}\right)^2}{r_E} = G \cdot \frac{m_E \cdot m_{RR}}{{r_E}^2}$$

$$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{m_{RR}} = \frac{4\pi^2 \cdot {r_E}^3}{G \cdot T^2} = \frac{4\pi^2 \cdot (1{,}5 \cdot 1{,}496 \cdot 10^{11}\ m)^3}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot (2{,}2 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600\ s)^2} \approx \mathbf{1{,}389 \cdot 10^{30}}\ \boldsymbol{kg}$$

$$\frac{\boldsymbol{m_{RR}}}{\boldsymbol{m_\odot}} = \frac{1{,}389 \cdot 10^{30}\ kg}{1{,}989 \cdot 10^{30}\ kg} \approx \mathbf{69{,}8}\%$$

zu 3)

$$P_{auf} = \frac{0{,}75 \cdot L_{RR} \cdot {R_E}^2\pi}{4\pi {r_E}^2} = \frac{0{,}75 \cdot 2{,}3 \cdot 10^3 \cdot 3{,}846 \cdot 10^{26}\ W \cdot (6371 \cdot 10^3\ m)^2\pi}{4\pi(1{,}5 \cdot 1{,}496 \cdot 10^{11}\ m)^2} \approx 1{,}337 \cdot 10^{20}\ W$$

Strahlungsgleichgewicht: $P_{auf} = P_{ab}$

$$P_{ab} = \sigma \cdot {R_E}^2\pi \cdot T^4 \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{T} = \sqrt[4]{\frac{P_{auf}}{\sigma \cdot {R_E}^2\pi}} = \sqrt[4]{\frac{1{,}337 \cdot 10^{20}\ W}{5{,}6704 \cdot 10^{-8}\ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot (6371 \cdot 10^3\ m)^2\pi}} \approx \mathbf{2074}\ \boldsymbol{K}$$

Aufgabe 13: **Der Pistolenstern (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2017)**

Der Pistolenstern befindet sich im sogenannten Pistolennebel im Sternbild Schütze. Er wurde Anfang der 1990er Jahre mithilfe des Hubble-Weltraumteleskops entdeckt. In den astronomischen Veröffentlichungen wurde er als der „hellste Sterns der Milchstraße“ bezeichnet.

Daten des Pistolensterns:
Entfernung: $25 \cdot 10^3\ Lj$
Scheinbare Helligkeit: 7,5
Oberflächentemperatur: $14 \cdot 10^4\ K$
Leuchtkraft: $1{,}7 \cdot 10^6\ \cdot L_\odot$

1) Berechne aus der Entfernung und der Leuchtkraft die scheinbare Helligkeit des Pistolensterns und gib einen möglichen Grund an, warum der berechnete Wert vom oben angegebenen Wert abweicht.

2) Berechne die vom Pistolenstern jährlich durch Strahlung abgegebene Masse und vergleiche das Ergebnis mit der Erdmasse.

3) Berechne den Radius des Pistolensterns in Vielfachen des Sonnenradius.

4) Die Masse des Pistolensterns wird auf 150 Sonnenmassen geschätzt. Erläutere ausgehend vom Zeitpunkt des Verlassens der Hauptreihe bis zum erwarteten Endstadium die weiteren Entwicklungsschritte eines Sterns dieser Masse.

Lösung:

zu 1)

$$M - M_\odot = -2{,}5 \cdot \lg L^* \quad \Longrightarrow \quad M = M_\odot - 2{,}5 \cdot \lg L^* = 4{,}83 - 2{,}5 \cdot \lg(1{,}7 \cdot 10^6) \approx -10{,}75$$

$$m - M = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\ pc}\right) \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{m} = M + 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\ pc}\right) = -10{,}75 + 5 \cdot \lg\left(\frac{\frac{25 \cdot 10^3}{3{,}26}\ pc}{10\ pc}\right) \approx \boldsymbol{3{,}68}$$

Mit einer tatsächlichen scheinbaren Helligkeit $m = 7{,}5$ erscheint der Pistolenstern deutlich weniger hell. Der Grund hierfür ist, dass der Stern von einer Wolke interstellaren Gases umgeben ist.

zu 2)

$$L = \frac{E}{\Delta t} \quad \Longrightarrow \quad E = L \cdot \Delta t = 1{,}7 \cdot 10^6 \cdot 3{,}846 \cdot 10^{26}\ W \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600\ s \approx 2{,}06 \cdot 10^{40}\ J$$

$$E = \Delta m \cdot c^2 \quad \Longrightarrow \quad \Delta\boldsymbol{m} = \frac{E}{c^2} = \frac{2{,}06 \cdot 10^{40}\ J}{\left(3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}\right)^2} \approx \boldsymbol{2{,}29 \cdot 10^{23}\ kg}$$

$$\frac{\Delta\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{m_E}} = \frac{2{,}29 \cdot 10^{23}\ kg}{5{,}974 \cdot 10^{24}\ kg} \approx \boldsymbol{3{,}8}\%$$

zu 3)

$$L = \sigma \cdot R^2 \pi \cdot T^4 \quad \Longrightarrow \quad L^* = (R^*)^2 \cdot (T^*)^4 \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{R}^* = \sqrt{\frac{L^*}{\left(\frac{T}{T_\odot}\right)^4}} = \sqrt{\frac{1{,}7 \cdot 10^6}{\left(\frac{14 \cdot 10^4\ K}{5800\ K}\right)^4}} \approx \boldsymbol{224}$$

zu 4) Ein Hauptreihenstern von der Masse des Pistolensterns wird sich über einen Roten Riesen und eine Supernova vom Typ SN II zu einem Schwarzen Loch entwickeln. (Vgl. S. 239)

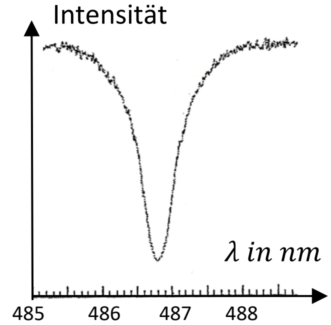
Aufgabe 14: Der Blaue Überriese HD 271791 (nach einer Abituraufgabe von 2012)

Mit Hilfe des Hipparcos-Satelliten kamen Astronomen auf die Spur des Blauen Überriesen HD 271791. Der Stern hat die Oberflächentemperatur $T = 1{,}8 \cdot 10^4\ K = 3{,}1 \cdot T_{\text{Sonne}}$, die $2{,}2 \cdot 10^4$-fache Leuchtkraft der Sonne und die 11-fache Sonnenmasse.

1) Zeichne in ein Hertzsprung-Russel-Diagramm die wichtigsten Sterngruppen, die Sonne und die ungefähre Lage von HD 271791 ein!

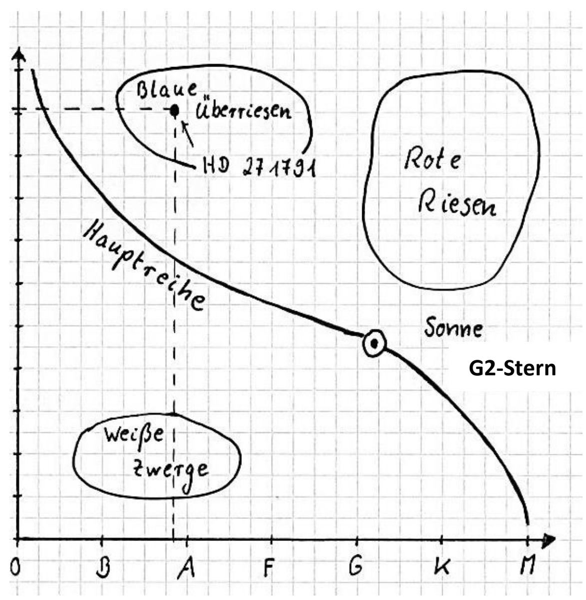
2) Vergleiche den Aufbau von HD 271791 im heutigen Stadium des Blauen Überriesen mit dem in seinem früheren Stadium als Hauptreihenstern.
Gib begründet sein voraussichtliches Endstadium an!

3) Mit nebenstehendem Spektrum des Sterns HD 271791, in dem die verschobene H_β-Absorptionslinie deutlich zu erkennen ist, kann seine Radialgeschwindigkeit bestimmt werden. Die Wellenlänge der unverschobenen Linie ist 486,1 nm.
Ermittle Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit von HD 271791 relativ zum irdischen Beobachter!



Lösung:

zu 1) Aus der Oberflächentemperatur des Sterns ergibt sich die Spektralklasse B (mit Tendenz zu A) (vgl. S. 224). Die hohe Leuchtkraft des Sterns führt zu einer Position weit oben im HRD.



zu 2) Der Stern ist ein Blauer Überriese und hat die 11-fache Sonnenmasse.

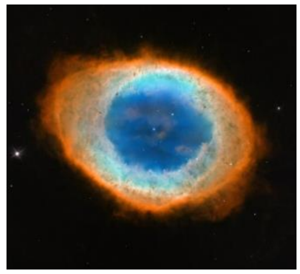
Der Stern ist zwiebelschalenartig aufgebaut: In den einzelnen Schichten des Sterns finden Fusionsprozesse mit nach innen zunehmender Ordnung statt. Im Kern des schweren Sterns fusioniert Silizium zu Eisen. Im Gegensatz zu Roten Riesen, die sich erst am Ende ihres Hauptreihenstadiums aufblähen, erreichen Blaue Riesen bereits während ihres Hauptreihenstadiums ihre Endgröße.

Der Kern des Sterns wird sich nach Erlöschen der Silizium-Fusion zu einem Neutronenstern verdichten. Seine Hülle stößt der Stern in einer Supernova ab. Übrig bleibt bei einem derart schweren Stern ein Schwarzes Loch.

zu 3)

$$\mathbf{v_r} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c = \frac{486{,}8\ \text{nm} - 486{,}1\ \text{nm}}{486{,}1\ \text{nm}} \cdot 3{,}0 \cdot 10^8\ \text{m} = \mathbf{430\ \frac{km}{s}}$$

<u>Aufgabe 15</u>: Ringnebel in der Leier (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2002)



Einer der bekanntesten Planetarischen Nebel ist der Ringnebel im Sternbild Leier. Beim Ringnebel handelt es sich um eines der Parade-Beobachtungsobjekte für das Schulteleskop im Sommer.

Das Objekt hat eine Entfernung von etwa $2{,}4\ kLj$.
Der über $70\ 000$ Grad heiße Zentralstern des Ringnebels hat die scheinbare Helligkeit $m = 14{,}7$.

1) Äußere dich zur Sichtbarkeit des Zentralsterns des Ringnebels im Schulteleskop.
Begründe deine Vermutung!

2) Warum ist es eigentlich nicht möglich, eine „tatsächliche“ Helligkeit für astronomische Objekte zu definieren?
Wie ist die absolute Helligkeit M, die manchmal auch als „wahre Helligkeit“ bezeichnet wird, definiert?
Berechne die absolute Helligkeit des Ringnebels!

3) Der Zentralstern des Ringnebels entwickelt sich zu einem Weißen Zwerg.
Was ist die momentane energetische Quelle seiner Leuchtkraft?
Erläutere, wie sich die Leuchtkraft dieses Sterns im Laufe der Zeit ändern wird!

<u>Lösung</u>:

zu 1) Der Zentralstern im Ringnebel ist im Schulteleskop nicht erkennbar. Die scheinbare Helligkeit $m = 14{,}7$ ist dafür zu gering. Bereits für Objekte wie die Galaxie M82 mit $m = 8{,}6$ sind gute Beobachtungsbedingungen nötig, um sie im Schulteleskop sehen zu können.

zu 2) Helligkeit ist eine Wahrnehmung und damit abstandsabhängig.
Die absolute Helligkeit M eines Sterns ist definiert als die scheinbare Helligkeit, die der Stern hätte, wenn er sich in der Entfernung 10 pc befände.

Entfernungsmodul:

$$m - M = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\ pc}\right) \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{M} = 14{,}7 - 5 \cdot \lg\left(\frac{2{,}4 \cdot 10^3 \cdot 3{,}26\ pc}{10\ pc}\right) \approx \mathbf{0{,}23}$$

zu 3) Die eigene Gravitationskraft erzeugt im Kern des Sterns einen hohen Druck und heizt ihn damit auf. Der Stern sendet Wärmestrahlung aus.
Im Lauf der Zeit kühlt der Stern aus, seine Leuchtkraft nimmt ab.

Aufgabe 16: Der Eulennebel (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2017)

Der Eulennebel M97 ist ein planetarischer Nebel im Sternbild Großer Wagen. Die Entfernung des Eulennebels beträgt $2 \cdot 10^3\ Lj$, seine scheinbare Helligkeit 9,9. In seinem Zentrum befindet sich ein sehr heißer Stern mit einer Oberflächentemperatur von $85 \cdot 10^3\ K$ und der scheinbaren Helligkeit 16. Von der Erde aus misst man für den fast kugelförmigen Nebel einen Winkeldurchmesser von $3{,}3'$. Das Gas des Nebels breitet sich radial mit einer Expansionsgeschwindigkeit von ca. $40\ \frac{km}{s}$ aus.

1) Für einen Beobachter auf dem 50. Breitengrad erscheint der Eulennnebel als zirkumpolares Objekt. Erkläre, was man unter Zirkumpolarität versteht und gib den daraus für den Nebel resultierenden maximalen Winkelabstand vom Himmelsnordpol an.

2) Beurteile, ob der Eulennebel mit bloßem Auge sichtbar ist und berechne den Durchmesser D des Eulennebels.

3) Schätze mithilfe der angegebenen Daten das Alter des Eulennebels ab. Erläutere, welche Vereinfachungen du dafür vornimmst.

4) Berechne die Leuchtkraft des Zentralsterns. Beschreibe seine Lage im Hertzsprung-Russel-Diagramm im Vergleich zur Sonne und ordne ihn einer Sternklasse zu.

5) Bestimme die Wellenlänge, bei der die maximale Strahlungsleistung des Zentralsterns vorliegt und ordne diese einem Bereich des elektromagnetischen Spektrums zu.

6) Erläutere den Entstehungsprozess eines planetarischen Nebels. Gehe insbesondere darauf ein, dass solche Nebel neben Wasserstoff und Helium einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an schwereren Elementen wie Kohlenstoff und Sauerstoff enthalten können.

Lösung:

zu 1) Der Eulennebel ist zirkumpolar, wenn er ganzjährig während der ganzen Nacht nicht untergeht. Er muss stets oberhalb des Horizonts des Beobachters stehen.

Polhöhe: $h_P = \varphi. \implies$ Der Himmelsnordpol (Polarstern) steht für einen Beobachter am 50° nördlicher Breite 50° über dem Horizont. Der Eulennebel ist zirkumpolar, wenn sein Winkelabstand vom Himmelsnordpol höchstens 50° beträgt.

zu 2) $m = 9{,}9 > 6 \implies$ Der Eulennebel ist mit bloßem Auge nicht sichtbar.

$$\frac{D}{2\pi r} = \frac{\alpha}{360°} \quad \implies \quad \boldsymbol{D} = \frac{\alpha}{360°} \cdot 2\pi r = \frac{\left(\frac{3{,}3}{60}\right)^{\circ}}{360°} \cdot 2\pi \cdot 2 \cdot 10^3\ Lj \approx \boldsymbol{1{,}9\ Lj}$$

zu 3) Vereinfachend wird angenommen, dass sich der Eulennebel seit seiner Entstehung mit der konstanten Expansionsgeschwindigkeit $v_{exp} = 40\ \frac{km}{s}$ gleichmäßig ausbreitete.

$$v_{exp} = \frac{R}{\Delta t} \quad \implies \quad \Delta \boldsymbol{t} = \frac{R}{v_{exp}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 1{,}9 \cdot 9{,}4607 \cdot 10^{12}\ km}{40\ \frac{km}{s}} \approx 2{,}27 \cdot 10^{11}\ s \approx \boldsymbol{7200\ a}$$

zu 4) $r_{Stern} = r_{Nebel}$!

$$m - M = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\ pc}\right) \quad \implies \quad M = m - 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\ pc}\right) \quad = 16 - 5 \cdot \lg\left(\frac{\frac{2 \cdot 10^3}{3{,}26}\ pc}{10\ pc}\right) \approx 7{,}06$$

$$M - M_{\odot} = -2{,}5 \cdot \lg L^* \quad \implies \quad L^* = 10^{\frac{M_{\odot} - M}{2{,}5}} = 10^{\frac{4{,}83 - 7{,}06}{2{,}5}} \approx 0{,}128$$

$$\implies \quad \boldsymbol{L} = 0{,}128 \cdot L_{\odot} = 0{,}128 \cdot 3{,}846 \cdot 10^{26}\ W \approx \boldsymbol{4{,}93 \cdot 10^{25}\ W}$$

zu 5) $\lambda_{max} \cdot T = b \quad \Longrightarrow \quad \lambda_{max} = \frac{b}{T} = \frac{2{,}8978 \cdot 10^{-3}\ m \cdot K}{85 \cdot 10^3\ K} \approx 34{,}1\ nm$

Diese Wellenlänge liegt im Bereich der UV-Strahlung.

zu 6) Vgl. S. 239

<u>Aufgabe 17</u>: Der Crabnebel (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2009)

Der Crabnebel M1 im Sternbild Stier gilt als Überrest einer Supernova, die von chinesischen Astronomen im Jahr 1054 n. Chr. beobachtet wurde. Die historischen Berichte legen eine scheinbare Helligkeit $m = -6$ nahe. Aktuelle Messungen ergaben für den 6300 Lichtjahre entfernten Nebel einen Winkeldurchmesser von 6,0'. Dieser vergrößert sich mit einer Expansionsrate von 0,38'' pro Jahr. Man kann vereinfachend von einer konstanten Expansionsgeschwindigkeit ausgehen.

1) Zeige, dass sich aus der Expansionsrate das richtige Alter des Nebels ergibt!

2) Ermittle die Expansionsgeschwindigkeit des Nebels!

Im Zentrum des Nebels befindet sich ein Neutronenstern, der mit der Periode $T = 33\ ms$ rotiert. Der Neutronenstern kann bei einer derart schnellen Rotation nur dann durch Gravitationskräfte zusammengehalten werden, wenn seine mittlere Dichte ρ einen gewissen Mindestwert überschreitet.

3) Zeige, dass für diesen Mindestwert der Ausdruck $\rho = \frac{3 \cdot \pi}{G \cdot T^2}$ gilt, wobei G die Gravitationskonstante ist! Betrachte hierfür die Gravitationskraft und die Zentripetalkraft, die auf eine kleine Masse m am Äquator des Neutronensterns wirken!

4) Berechne den Mindestwert der mittleren Dichte des Neutronensterns im Crabnebel!

<u>**Lösung**</u>:

zu 1) Geht man von gleichmäßiger Expansion aus, so gilt für das Alter: $\boldsymbol{t} = \frac{6{,}0 \cdot 60''}{0{,}38''}\ a \approx \mathbf{950\ a}$

Dies stimmt gut mit dem geschichtlich dokumentierten Alter von 955 Jahren (zum Zeitpunkt der Stellung der Abituraufgabe) überein.

zu 2) Durchmesser D des Crabnebels:

$$\frac{\frac{1}{2} \cdot D}{r} = \tan\left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{6{,}0}{60}\right)^{\circ}\right) \quad \Longrightarrow \quad D = 2 \cdot 6300\ LJ \cdot \tan 0{,}05° \approx 11{,}0\ LJ$$

Expansionsgeschwindigkeit:

$$\boldsymbol{v} = \frac{\frac{1}{2} \cdot D}{t} = \frac{5{,}5\ LJ}{950\ a} = \frac{5{,}5 \cdot 9{,}4607 \cdot 10^{12}\ km}{950 \cdot 365{,}25 \cdot 24 \cdot 3600\ s} \approx \mathbf{1{,}7 \cdot 10^3\ \frac{km}{s}}$$

zu 3) Damit der Neutronenstern nicht durch die Fliehkraft zerrissen wird, muss die Gravitationsbeschleunigung an der Oberfläche des Sterns mindestens so groß sein wie die Zentrifugalbeschleunigung. Gravitationskraft und Zentrifugalkraft auf einen Körper an der Oberfläche des Sterns sind also im Grenzfall gleich groß:

$$F_G \geq F_z \quad \Longrightarrow \quad \mathrm{G} \cdot \frac{m \cdot M}{R^2} \geq \frac{m \cdot v^2}{R} = \frac{m \cdot 4R^2\pi^2}{R \cdot T^2} \quad \Longrightarrow \quad \rho \geq \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3 \cdot \pi}{G \cdot T^2}$$

zu 4)

$$\boldsymbol{\rho_{min}} = \frac{3 \cdot \pi}{G \cdot T^2} = \frac{3 \cdot \pi}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot (33 \cdot 10^{-3}\ s)^2} \approx \mathbf{1{,}3 \cdot 10^{14}\ \frac{kg}{m^3}}$$

Aufgabe 18: **Schwarze Löcher**

1) Erläutere mehrere Phänomene der Allgemeinen Relativitätstheorie, die am Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs auftreten!

2) Berechne den Schwarzschildradius eines (nicht rotierenden) Schwarzen Lochs mit Erdmasse!

3) Welche Masse hat ein (nicht rotierendes) Schwarzes Loch, dessen Ereignishorizont einen Durchmesser von 1 Meter hat? Vergleiche mit der Masse der Sonne!

4) Im Zentrum der Milchstraße vermutet man ein Schwarzes Loch mit 4,5 Millionen Sonnenmassen. Berechne den Schwarzschildradius dieses Schwarzen Lochs und vergleiche ihn mit der Entfernung von der Erde zur Sonne!

Lösung:

zu 1) **Licht**, das sich einem Schwarzen Loch bis auf den Ereignishorizont nähert, wird durch die **Raumzeitkrümmung** so stark abgelenkt, dass es dem Schwarzen Loch **nicht mehr entweichen** kann.

Die **Gravitationsrotverschiebung** erreicht am Ereignishorizont ihren Maximalwert. Das bedeutet, dass das Licht so stark rotverschoben und so stark geschwächt wird, dass die Umgebung des Schwarzen Lochs am Ereignishorizont absolut schwarz erscheint.

Die **gravitative Zeitdilatation** wird ebenfalls am Ereignishorizont maximal. Das heißt: Aus der Sicht eines außenstehenden Beobachters gehen Uhren bei der Annäherung an den Ereignishorizont immer langsamer und bleiben am Ereignishorizont stehen. Die Zeit „friert" also am Ereignishorizont ein.

zu 2)

$$\boldsymbol{R_S} = 2 \cdot \frac{G \cdot M}{c^2} = 2 \cdot \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \dfrac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot 5{,}974 \cdot 10^{24} kg}{\left(3{,}0 \cdot 10^8 \ \dfrac{m}{s}\right)^2} \approx \boldsymbol{9{,}0\ mm}$$

zu 3)

$$R_S = 2 \cdot \frac{G \cdot M}{c^2} \quad \Longrightarrow \quad M = \frac{R_S \cdot c^2}{2 \cdot G} = \frac{0{,}5\, m \cdot \left(3{,}0 \cdot 10^8 \ \dfrac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11} \dfrac{m^3}{kg \cdot s^2}} \approx 3{,}4 \cdot 10^{26}\ kg$$

$$\frac{M}{M_\odot} = \frac{3{,}4 \cdot 10^{26}\ kg}{1{,}99 \cdot 10^{30}\ kg} \approx 1{,}7 \cdot 10^{-4} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{M \approx 0{,}017\% \cdot M_\odot}$$

zu 4)

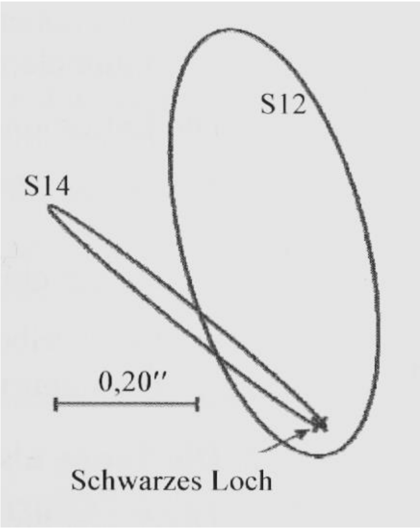
$$R_S = 2 \cdot \frac{G \cdot M}{c^2} = 2 \cdot \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \dfrac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot 4{,}5 \cdot 10^6 \cdot 1{,}989 \cdot 10^{30} kg}{\left(3{,}0 \cdot 10^8 \ \dfrac{m}{s}\right)^2} \approx 1{,}33 \cdot 10^{10}\ m$$

$$\frac{\boldsymbol{R_S}}{\boldsymbol{r_{Erde-Sonne}}} = \frac{1{,}33 \cdot 10^{10}\ m}{1{,}496 \cdot 10^{11}\ m} \approx \boldsymbol{0{,}1}$$

Der Schwarzschildradius des Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße beträgt also etwa ein Zehntel des Abstandes der Erde von der Sonne. Das ist eine für ein Schwarzes Loch sehr große Ausdehnung!

Aufgabe 19: Sterne im Zentralbereich der Galaxis (nach einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2015)

Im Zentrum der Milchstraße (Galaxis) befindet sich $2{,}77 \cdot 10^4\ Lj$ von uns entfernt ein Schwarzes Loch. Seit 1992 werden Bahnen von Sternen um das Schwarze Loch vermessen. Nebenstehend sind die elliptischen Bahnen der Sterne S12 und S14 maßstabsgetreu abgebildet. Die Darstellung ist so gewählt, dass die beiden Bahnebenen mit der Zeichenebne übereinstimmen.
Der Stern S14 benötigt 47,3 Jahre für einen Umlauf. Die numerische Exzentrizität seiner Bahn beträgt 0,96.



1) Die Messungen werden bei Wellenlängen im Infrarotbereich durchgeführt. Gib eine Wellenlänge aus diesem Bereich an und begründe kurz, weshalb für diese Messungen sichtbares Licht nicht verwendet werden kann!

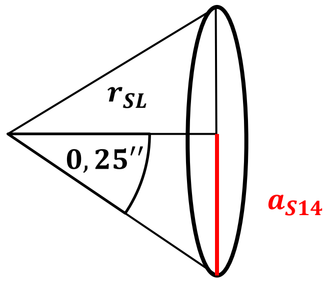
2) Bestimme unter Verwendung obiger Abbildung näherungsweise den Wert der großen Halbachse a_{S14} der S14-Bahn und schätze ebenfalls mithilfe der Abbildung das Verhältnis der Umlaufzeiten von S12 und S14 ab!

3) Berechne zunächst die Masse M des Schwarzen Lochs in Vielfachen der Sonnenmasse und dann mithilfe der Bahndaten von S14 dessen kleinsten Abstand r_{min} vom Schwarzen Loch!

Lösung:

zu 1) Im Infrarotbereich liegt beispielsweise die Wellenlänge $\lambda = 2000\ nm$.
Staub in der galaktischen Ebene der Milchstraße verhindert, dass Licht aus dem Zentralbereich der Milchstraße zu uns kommen kann.

zu 2)



Die Große Halbachse a_{S14} erscheint nach der Zeichnung unter einem Winkel von etwa 0,25″.

$$\tan 0{,}25'' = \frac{a_{S14}}{r_{SL}} \implies a_{S14} = 2{,}77 \cdot 10^4\ Lj \cdot \tan\frac{0{,}25°}{3600} \approx 3{,}36 \cdot 10^{-2} Lj$$

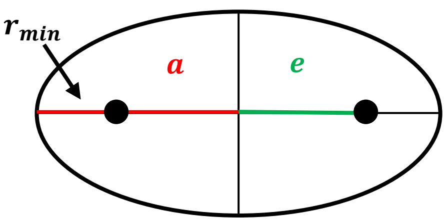
Analog folgt für S12 bei einem Winkel von 0,31″: $\boldsymbol{a_{S12} \approx 4{,}16 \cdot 10^{-2} Lj}$

3. Keplersches Gesetz: $\frac{T^2}{a^3} = konst \implies \frac{{T_{S12}}^2}{{a_{S12}}^3} = \frac{{T_{S14}}^2}{{a_{S14}}^3}$

$$\implies \boldsymbol{\frac{T_{S12}}{T_{S14}}} = \sqrt{\frac{{a_{S12}}^3}{{a_{S14}}^3}} = \sqrt{\frac{4{,}16^3}{3{,}36^3}} \approx \boldsymbol{1{,}4}$$

zu 3) $\frac{{T_{S14}}^2}{{a_{S14}}^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M} \implies \boldsymbol{M} = \frac{4\pi^2 \cdot {a_{S14}}^3}{{T_{S14}}^2 \cdot G} = \frac{4\pi^2 \cdot (3{,}36 \cdot 10^{-2} \cdot 9{,}4607 \cdot 10^{15} m)^3}{(4703 \cdot 365{,}25 \cdot 24 \cdot 3600\ s)^2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}}$

$$\approx 4{,}3 \cdot 10^6 \cdot m_\odot \approx \boldsymbol{8{,}53 \cdot 10^{36}\ kg}$$



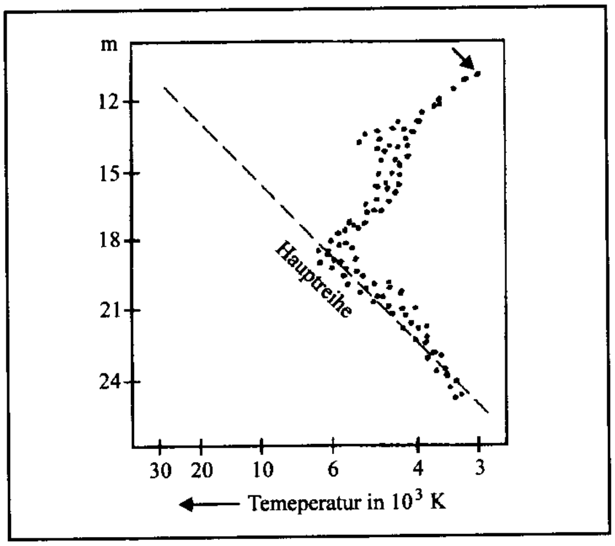
numerische Exzentrizität: $\varepsilon = \frac{e}{a}$

$$\implies \boldsymbol{r_{min}} = a - e = a(1 - \varepsilon) =$$

$$= 3{,}36 \cdot 10^{-2}\ LJ \cdot (1 - 0{,}96) = \boldsymbol{1{,}34 \cdot 10^{-3}\ Lj}$$

Aufgabe 20: Der Kugelsternhaufen M13 im Herkules (nach einer Abituraufgabe von 1995)

Der bei sehr guten Bedingungen gerade noch mit bloßem Auge am Nachthimmel sichtbare Kugelsternhaufen M13 im Sternbild Herkules hat die scheinbare Gesamthelligkeit $m_{ges} = 5{,}8$. Er erscheint dem Beobachter unter einem Winkeldurchmesser von 15‘.



Die Abbildung zeigt eine vereinfachtes Hertzsprung-Russel-Diagramm vom M13, bei dem die scheinbaren Helligkeiten von Einzelsternen gegen die Oberflächentemperaturen aufgetragen sind.

1) Bestimme aus dem HRD die scheinbare Helligkeit eines Sterns G, dessen Spektraltyp möglichst genau dem unserer Sonne entspricht, und berechne mithilfe des Entfernungsmoduls den Abstand r von M13 sowie den Durchmesser D von M13 jeweils in Lichtjahren.

2) Berechne die absolute Gesamthelligkeit von M13 und schätze die Anzahl der Sterne in M13 unter der Annahme ab, dass alle Sterne des Haufens die gleiche Leuchtkraft wie die Sonne besitzen.

3) Die Sterndichte in der Umgebung unserer Sonne beträgt etwa $0{,}002\ \frac{1}{Lj^3}$. Berechne die durchschnittliche Sterndichte von M13 und gib das Verhältnis beider Sterndichten an.

4) Im obigen HRD von M13 ist ein Stern mit einem Pfeil markiert. In welchem Entwicklungsstadium befindet sich dieser Stern? Schätze seinen Radius in Sonnenradien ab; entnimm dafür notwendige Daten dem Diagramm.

5) Gib das für den Stern G aus Teilaufgabe **1)** typische Endstadium seiner Entwicklung an. Nenne charakteristische Eigenschaften des Sterns in diesem Stadium und gib grob den Temperatur- und den Helligkeitsbereich an, in dem der Stern G sein Endstadium erreichen wird.

Lösung:

zu 1) Die Sonne ist ein Hauptreihenstern mit einer Oberflächentemperatur von $5800\ K$. Aus dem HRD ergibt sich für einen solchen Stern die scheinbare Helligkeit $m = 19$. Die absolute Helligkeit eines Sterns, der im HRD an der Stelle der Sonne steht, hat den Wert der absoluten Helligkeit der Sonne: $M \approx 4{,}8$.

$$m - M = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\ pc}\right) \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{r} = 10^{\frac{m-M}{5}} \cdot 10\ pc = 10^{\frac{19-4{,}8}{5}} \cdot 10\ pc \approx 6{,}92 \cdot 10^3\ pc \approx \boldsymbol{1{,}0 \cdot 10^5\ Lj}$$

$$\frac{D}{2\pi r} = \frac{\alpha}{360°} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{D} = \frac{\alpha}{360°} \cdot 2\pi r = \frac{\left(\frac{15}{60}\right)^{\circ}}{360°} \cdot 2\pi \cdot 1{,}0 \cdot 10^5\ Lj \approx \boldsymbol{100\ Lj}$$

zu 2) Die Sonne ist ein Hauptreihenstern mit einer Oberflächentemperatur von $5800\ K$. Aus dem HRD ergibt sich für einen solchen Stern die scheinbare Helligkeit $m = 19$. Die absolute Helligkeit eines Sterns, der im HRD an der Stelle der Sonne steht, hat den Wert der absoluten Helligkeit der Sonne: $M = 4{,}8$.

$$m - M = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\ pc}\right) \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{M} = m - 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\ pc}\right) = 5{,}8 - 5 \cdot \lg\left(\frac{6{,}92 \cdot 10^3\ pc}{10\ pc}\right) \approx \boldsymbol{-8{,}4}$$

$$M - M_{\odot} = -2{,}5 \cdot \lg L^* \quad \Rightarrow \quad L^* = 10^{\frac{M_{\odot}-M}{2{,}5}} = 10^{\frac{4{,}83+8{,}4}{2{,}5}} \approx 2 \cdot 10^5$$

Wenn man davon ausgeht, dass jeder Stern in M13 im Mittel die Leuchtkraft unserer Sonne besitzt, dann sind enthält M13 $2 \cdot 10^5$ Sterne.

zu 3) Durchschnittliche Sterndichte von M13:

$$\rho_{M13} = \frac{\text{Anzahl der Sterne}}{\text{Volumen}} = \frac{2 \cdot 10^5}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^3} = \frac{2 \cdot 10^5}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (50\ Lj)^3} \approx 0{,}38\ \frac{1}{Lj^3}$$

$$\frac{\boldsymbol{\rho_{M13}}}{\boldsymbol{\rho_{US}}} = \frac{0{,}38\ \frac{1}{Lj^3}}{0{,}002\ \frac{1}{Lj^3}} \approx \mathbf{200}$$

zu 4) Der durch einen Pfeil markierte Stern ist ein Roter Riese.

Dem HRD entnimmt man: $m = 11$ und $T = 3000\ K$. Weil sich der Stern im Kugelsternhaufen M13 befindet, ist seine Entfernung die des Kugelsternhaufens: $r \approx 6{,}92 \cdot 10^3\ pc$

$$m - M = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\ pc}\right) \quad \Rightarrow \quad M = m - 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\ pc}\right) = 11 - 5 \cdot \lg\left(\frac{6{,}92 \cdot 10^3\ pc}{10\ pc}\right) \approx -3{,}2$$

$$M - M_\odot = -2{,}5 \cdot \lg L^* \quad \Rightarrow \quad L^* = 10^{\frac{M_\odot - M}{2{,}5}} = 10^{\frac{4{,}83+3{,}2}{2{,}5}} \approx 1{,}6 \cdot 10^3$$

$$L^* = (R^*)^2 \cdot (T^*)^4 \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{R^*} = \sqrt{\frac{L^*}{\left(\frac{T}{T_\odot}\right)^4}} = \sqrt{\frac{1{,}6 \cdot 10^3}{\left(\frac{3000\ K}{5800\ K}\right)^4}} \approx \mathbf{150}$$

zu 5) Der G-Stern wird zu einem **Weißen Zwerg**. Weiße Zwerge haben Endmassen von bis zu 1,4 Sonnenmassen Chandrasekhar-Grenze). Der Entartungsdruck des entarteten Elektronengases hält in Weißen Zwergen dem Gravitationsdruck das Gelichgewicht. Die Radien Weißer Zwerge sind etwa $\frac{1}{100}$ so groß, wie die der Hauptreihensterne, aus denen sie hervorgegangen sind.

Im HRD befinden sich die Weißen Zwerge links unten: Die absolute Helligkeit hat Werte von 8 bis 10. Die Spektralklasse liegt bei B, A oder F. Die Temperatureines Weißen Zwerges erreicht somit etwa $20\,000\ K$ bis $30\,000\ K$.

<u>Aufgabe 21</u>: Planeten um fremde Sonnen?

Mit dem Hubble-Space-Telescope (HST) können aus einer Erdumlaufbahn lichtschwache Begleiter von Fixsternen beobachtet werden. Epsilon Eridani (ε Eri) ist ein Hauptreihenstern mit einer Parallaxe von $0{,}3''$ und einer scheinbaren Helligkeit $m = 3{,}72$. Es wird vermutet, dass um diesen Stern ein Planetensystem existiert.

1) Berechne die Entfernung r_ε von ε Eri gegenüber unserem Sonnensystem und die Leuchtkraft L_ε von ε Eri als Vielfaches der Sonnenleuchtkraft.

2) Ermittele die Entfernung d, in der ein jupiterähnlicher Planet, im Folgenden Joveri genannt, den Stern ε Eri umkreisen müsste, damit er dort die gleiche Bestrahlungsstärke empfängt, wie „unser" Jupiter von „unserer" Sonne.

3) Überprüfe unter der Annahme, dass Joveri eine absolute Helligkeit von $M = 26$ hat, ob mit dem HST das Objekt Joveri sowohl von seiner Helligkeit als auch von seinem Winkelabstand zu ε Eri her entdeckt werden könnte.
Gehe dabei davon aus, dass das HST Objekte bis zu der scheinbaren Helligkeit $m_{gr} = 28$ sicher registrieren und zwei in etwa gleich helle Objekte noch trennen kann, wenn sie mindestens einen Winkelabstand von $\alpha_{gr} = 0{,}02''$ haben.

4) Berechne die Masse von ε Eri als Vielfaches der Sonnenmasse und schätze damit die Aufenthaltsdauer (d.h. die Entwicklungszeit) von ε Eri auf der Hauptreihe im Vergleich zur Sonne ab.

Eine andere Methode, die Existenz von Planeten nachzuweisen, ist die Beobachtung periodischer Ortsveränderungen („Wackeln") des Hauptsterns, die durch einen massereichen Planeten hervorgerufen werden.

5) Ein „Wackeln" in Sehrichtung lässt sich nicht direkt als Ortsveränderung des Zentralsterns am Himmel nachweisen. Gib eine Methode an, man dieses „Wackeln" eventuell nachweisen könnte. Beschreibe, wie man dabei vorgehen und was man dabei erkennen müsste.
Hinweis: Es kann nur das Spektrum des Zentralsterns beobachtet werden.

<u>Lösung</u>:

zu 1)

$$\mathbf{r}_{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1''}{\mathrm{p}}\,\mathrm{pc} = \frac{1''}{0{,}30''}\,\mathrm{pc} \approx \mathbf{3{,}3\ pc}$$

$$m_\varepsilon - M_\varepsilon = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right) \quad \Longrightarrow \quad M_\varepsilon = m_\varepsilon - 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right) = 3{,}72 - 5 \cdot \lg\left(\frac{3{,}3\,pc}{10\,pc}\right) \approx 6{,}13$$

$$M_\varepsilon - M_\odot = -2{,}5 \cdot \lg L^* \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{L_\varepsilon}^* = 10^{\frac{M_\odot - M}{2{,}5}} = 10^{\frac{4{,}83-6{,}13}{2{,}5}} \approx \mathbf{0{,}30}$$

zu 2) Bestrahlungsstärke von der Sonne in Jupiterentfernung:

$$E_J = \frac{L_\odot}{4\pi r_J{}^2} = \frac{3{,}846 \cdot 10^{26}\,W}{4\pi(5{,}2 \cdot 1{,}496 \cdot 10^{11}\,m)^2} \approx 50{,}6\,\frac{W}{m^2}$$

Bestrahlungsstärke, die der Exoplanet Joveri von ε Eri in der Entfernung a empfängt:

$$E_{Joveri} = \frac{L_\varepsilon}{4\pi a^2} = \frac{L_\varepsilon{}^* \cdot L_\odot}{4\pi a^2} = E_J$$

$$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{a} = \sqrt{\frac{L_\varepsilon{}^* \cdot L_\odot}{4\pi \cdot E_J}} = \sqrt{\frac{0{,}30 \cdot 3{,}846 \cdot 10^{26}\,W}{4\pi \cdot 50{,}6\,\frac{W}{m^2}}} \approx 4{,}26 \cdot 10^{11}\,m \ \approx \mathbf{2{,}8}\ \boldsymbol{AE}$$

zu 3)

$$m_{Joveri} - M_{Joveri} = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right) \Rightarrow \boldsymbol{m_{Joveri}} = M_{Joveri} + 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right) = 26 - 5 \cdot \lg\left(\frac{3{,}3\,pc}{10\,pc}\right) \approx \mathbf{23{,}6}$$

$$\frac{d}{2\pi r} = \frac{\alpha}{360°} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{\alpha} = \frac{d}{2\pi r} \cdot 360° = \frac{4{,}26 \cdot 10^{11}\,m}{2\pi \cdot 3{,}3 \cdot 3{,}08 \cdot 10^{16}\,m} \cdot 360° \approx (2{,}40 \cdot 10^{-4})° \approx \mathbf{0{,}86}''$$

Das HST könnte somit den Exoplaneten Joveri sowohl von seiner scheinbaren Helligkeit als auch vom Winkelabstand her auflösen. Allerdings würde der Stern den Exoplaneten vermutlich überstrahlen.

zu 4) Für ε Eri als Hauptreihenstern gilt die Masse-Leuchtkraft-Beziehung:

$$m_\varepsilon{}^3 \sim L_\varepsilon \quad \Rightarrow \quad m^{*3} = L^* \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{m}^* = \sqrt[3]{L^*} = \sqrt[3]{0{,}30} \approx \mathbf{0{,}67}$$

$$\boldsymbol{\tau}^* = \frac{1}{(m^*)^2} = \frac{1}{0{,}67^2} \approx 2{,}2$$

zu 5) Radialgeschwindigkeitsmethode. Vgl. S. 254

Aufgabe 22: Exoplanet des Sterns HD 209458 (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2001)

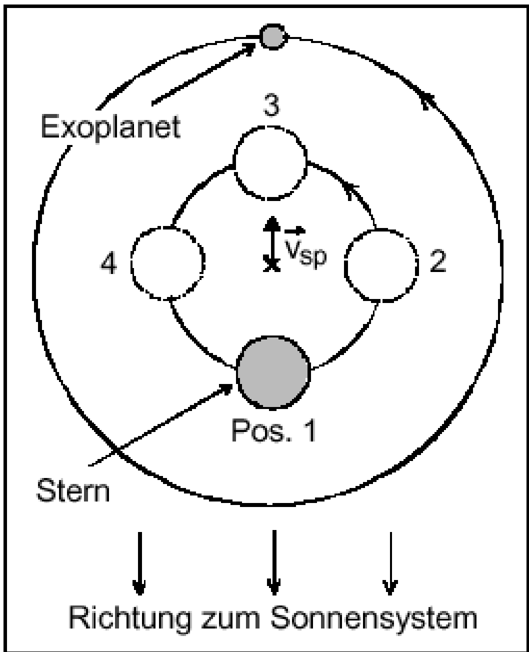


Abbildung 1

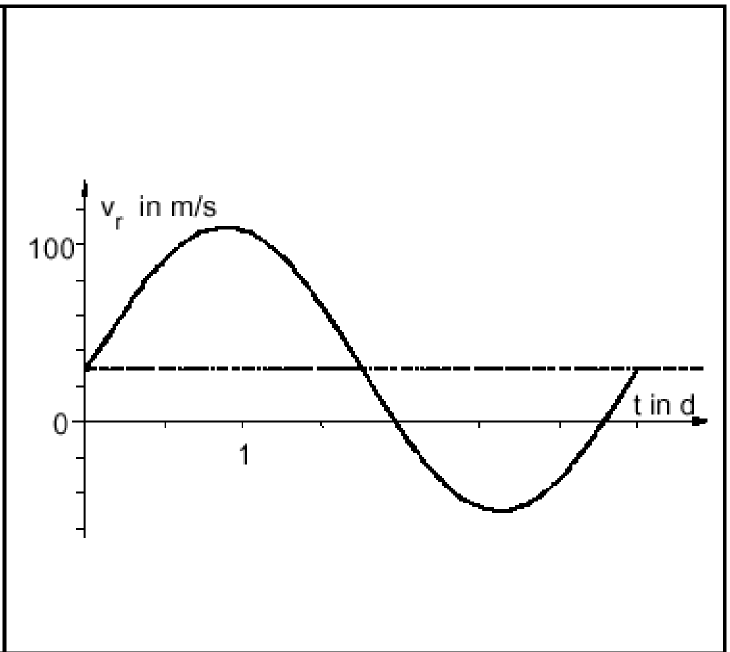


Abbildung 2

Im Jahre 1999 konnte durch Beobachtung des Spektrums von HD209458 (im Folgenden kurz "Stern" genannt) die Existenz eines planetaren Begleiters (Exoplanet) nachgewiesen werden. Beide Himmelskörper bewegen sich, wie in der (nicht maßstabsgetreuen) Abbildung 1 dargestellt, auf Kreisbahnen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Dieser entfernt sich mit der Geschwindigkeit v_{sp} von uns. Vereinfachend wird angenommen, dass die Bahnebenen von Exoplanet und Erde übereinstimmen. Die Radialgeschwindigkeit v_r des Sterns gegenüber unserem Sonnensystem, bereinigt von allen Zusatzeffekten, wurde über mehrere Tage gemessen. Abbildung 2 zeigt die zeitliche Abhängigkeit dieser Radialgeschwindigkeit v_r.

1) Trage in einer Skizze für die Sternposition 2 die Lage von Stern, Exoplanet und deren gemeinsamen Schwerpunkt ein!

2) Ermittle aus Abbildung 2 für jede der Sternpositionen 1 bis 4 die Werte der Radialgeschwindigkeiten v_r des Sterns. Begründe, dass der Wert $v_r = 110\ \frac{m}{s}$ in Position 2 erreicht wird!

3) Die Wellenlänge der H_α-Linie im Labor beträgt 656,5 nm. Berechne die Wellenlängenänderung Δλ der H_α-Linie im Spektrum des Sterns gegenüber dem Laborwert, wenn sich der Stern in Position 2 befindet! Beschreibe und erkläre die weitere zeitliche Entwicklung der Wellenlängenänderung der H_α-Linie!

4) Bestimme die Bahngeschwindigkeit des Massenzentrums des Sterns um den gemeinsamen Schwerpunkt des Systems.

5) Ermittle aus Abbildung 2 die Umlaufdauer des Sterns und berechne den Abstand r_s zwischen Schwerpunkt und Sternzentrum!

<u>Lösung</u>:

zu 1)

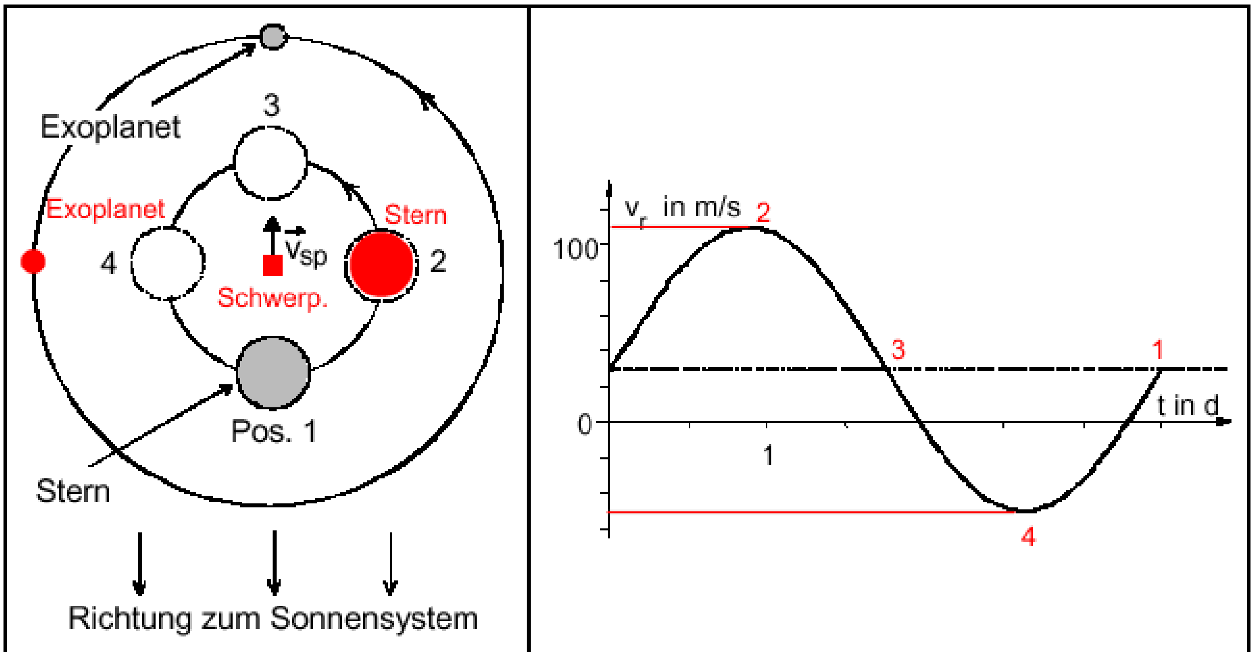


Abbildung 1 | Abbildung 2

zu 2) In den **Punkten 1 und 3** ist die Radialgeschwindigkeit $v_{r,1} = v_{r,3} = v_{sp} = 30\ \frac{m}{s}$, da sich das gesamte System von uns wegbewegt, innerhalb des Systems aber nur tangentiale Geschwindigkeiten auftreten.
Im **Punkt 2** bewegen sich der Stern mit der Bahngeschwindigkeit v_B und Schwerpunkt von uns weg, es ist $v_{r,2} = v_{sp} + v_B = 110\ \frac{m}{s}$.
Im **Punkt 4** sind Bahngeschwindigkeit v_B und Schwerpunktgeschwindigkeit v_{sp} entgegengesetzt gerichtet, es ist $v_{r,4} = v_{sp} - v_B = -50\ \frac{m}{s}$

zu 3) Mit der relativen Dopplerverschiebung $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$ folgt

in Position 2: $\Delta\lambda = \frac{110\ \frac{m}{s}}{3 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}} \cdot 656{,}5\ nm\ \approx 2{,}4 \cdot 10^{-13}\ m$

in Position 1 und 3: $\Delta\lambda = \frac{30\ \frac{m}{s}}{3 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}} \cdot 656{,}5\ nm\ \approx 0{,}65 \cdot 10^{-13}\ m$

in Position 4: $\Delta\lambda = \frac{-50\ \frac{m}{s}}{3 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}} \cdot 656{,}5\ nm\ \approx -1{,}1 \cdot 10^{-13}\ m$

Die Wellenlängenänderung schwankt zwischen den berechneten Werten.

zu 4) $\boldsymbol{v_B} = 110\ \frac{m}{s} - 30\ \frac{m}{s} = \mathbf{80}\ \boldsymbol{\frac{m}{s}}$

zu 5)

$$T = 3{,}5\ d = 3{,}024 \cdot 10^5\ s; \quad v_B = \frac{2\pi r_s}{T} \quad \Longrightarrow \boldsymbol{r_s} = \frac{v_B \cdot T}{2\pi} = \frac{80\ \frac{m}{s} \cdot 3{,}024 \cdot 10^5\ s}{2\pi} \approx \mathbf{3{,}805 \cdot 10^6}\ \boldsymbol{m}$$

<u>Aufgabe 23</u>: Exoplaneten in der habitablen Zone des Sterns Kepler-62 (nach einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2016)

Im Jahr 2012 wurden fünf Planeten des Sterns Kepler-62 entdeckt, von denen sich zwei in einer habitablen Zone befinden. Liegt die Bahn eines Planeten in dieser Zone, so kann sich auf diesem eine mittlere Oberflächentemperatur einstellen, die eine Entwicklung von Leben möglich erscheinen lässt.

<u>Daten des Sterns Kepler-62</u>:
Masse: $1{,}38 \cdot 10^{30}\ kg$
Oberflächentemperatur: $4{,}9 \cdot 10^{3}\ K$
Leuchtkraft: $0{,}21 \cdot L_{\odot}$
Scheinbare Helligkeit: 14

1) Berechne die Entfernung von Kepler-62.

2) Berechne den Radius R von Kepler-62 als Vielfaches des Sonnenradius.

Für die habitable Zone eines Sterns wird eine Bestrahlungsstärke von $0{,}3\ S$ bis $1{,}7\ S$ angenommen. Hierbei ist S die Solarkonstante für die Erde.

3) Berechne den inneren und den äußeren Radius der habitablen Zone vom Stern Kepler-62.

Der Planet Kepler-62e umrundet den Stern Kepler-62 mit einer Umlaufzeit $T = 122{,}4\ d$ auf einer elliptischen Bahn mit der numerischen Exzentrizität $0{,}13$.

4) Berechne die große Halbachse der Umlaufbahn von Kepler-62e und zeige rechnerisch, dass sich dieser extrasolare Planet stets in der habitablen Zone befindet.

Der Planet Kepler-62e konnte mit der Transitmethode nachgewiesen werden. Wenn sich der Planet von der Erde aus betrachtet vor dem Stern vorbeibewegt, bedeckt er einen Teil des Sterns, was die Bestrahlungsintensität auf $99{,}93\%$ des ursprünglichen Werts reduziert.

5) Bestimme einen Näherungswert für den Radius des extrasolaren Planeten und vergleiche mit dem Erdradius.

<u>Lösung</u>:

zu 1)

$$M - M_{\odot} = -2{,}5 \cdot \lg L^{*} \quad \Longrightarrow \quad M = M_{\odot} - 2{,}5 \cdot \lg L^{*} = 4{,}83 - 2{,}5 \cdot \lg 0{,}21 \approx 6{,}52$$

$$m - M = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\ pc}\right) \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{r} = 10^{\frac{m-M}{5}} \cdot 10\ pc = 10^{\frac{14-6{,}25}{5}} \cdot 10\ pc \approx 313\ pc \approx \boldsymbol{1{,}0 \cdot 10^{3}\ Lj}$$

zu 2)

$$L^{*} = (R^{*})^{2} \cdot (T^{*})^{4} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{R}^{*} = \sqrt{\frac{L^{*}}{\left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^{4}}} = \sqrt{\frac{0{,}21}{\left(\frac{4900\ K}{5800\ K}\right)^{4}}} \approx \boldsymbol{0{,}64}$$

zu 3)

$$E = \frac{L}{4\pi r^2} \quad \Longrightarrow \quad r = \sqrt{\frac{L}{4\pi \cdot E}}$$

Innerer Radius der habitablen Zone um Kepler-62:

$$\boldsymbol{r_i} = \sqrt{\frac{L^* \cdot T_\odot}{4\pi \cdot 1{,}7 \cdot S}} = \sqrt{\frac{0{,}21 \cdot 3{,}846 \cdot 10^{26}\ W}{4\pi \cdot 1{,}7 \cdot 1{,}367 \cdot 10^3\ \frac{W}{m^2}}} \approx 5{,}23 \cdot 10^{10}\ m \approx \boldsymbol{0{,}35\ AE}$$

Äußerer Radius der habitablen Zone um Kepler-62:

$$\boldsymbol{r_a} = \sqrt{\frac{L^* \cdot T_\odot}{4\pi \cdot 1{,}7 \cdot S}} = \sqrt{\frac{0{,}21 \cdot 3{,}846 \cdot 10^{26}\ W}{4\pi \cdot 0{,}3 \cdot 1{,}367 \cdot 10^3\ \frac{W}{m^2}}} \approx 1{,}25 \cdot 10^{11}\ m \approx \boldsymbol{0{,}84\ AE}$$

zu 4) Die Formulierung „umrundet den Stern“ spricht dafür, das System aus Stern und Exoplanet nicht als Zweikörpersystem zu betrachten, sondern für den Exoplaneten eine elliptische Umlaufbahn mit dem ruhenden Stern in einem Brennpunkt anzunehmen:

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot m} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{a} = \sqrt[3]{\frac{G \cdot m \cdot T^2}{4\pi^2}} =$$

$$= \sqrt[3]{\frac{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{30}\ kg \cdot (122{,}4 \cdot 24 \cdot 3600\ s)^2}{4\pi^2}} \approx 6{,}39 \cdot 10^{10}\ m \approx \boldsymbol{0{,}43\ AE}$$

Wir berechnen die kleinste und die größte Entfernung des Exoplaneten vom Stern und prüfen, ob beide innerhalb der habitablen Zone liegen:

$$\boldsymbol{r_P} = a \cdot (1 - \varepsilon) = 0{,}43\ AE \cdot (1 - 0{,}13) \approx \boldsymbol{0{,}37\ AE}$$

$$\boldsymbol{r_A} = a \cdot (1 + \varepsilon) = 0{,}43\ AE \cdot (1 + 0{,}13) \approx \boldsymbol{0{,}48\ AE}$$

Perihel- und Apheldistanz liegen in der habitablen Zone. Damit liegt der Exoplanet stets in der habitablen Zone des Sterns.

zu 5) Wie gehen näherungsweise davon aus, dass die Planetenscheibe des Exoplaneten eine kreisförmige Teilfläche $A_P = {R_P}^2\pi$ der von der Erde aus ebenfalls als Kreisscheibe gesehenen Fläche $A_S = {R_S}^2\pi$ des Sterns verdeckt.

Nach dem Gesetz von Stefan und Boltzmann $L = \sigma \cdot A_S \cdot T^4$, sind die Leuchtkraft L des Sterns und damit die Bestrahlungsstärke $E = \frac{L}{4\pi r^2}$ direkt proportional zur Oberfläche A_S des Sterns.

Dass sich die Bestrahlungsstärke des Sterns um 0,07% reduziert, wenn der Exoplanet vor dem Stern vorbeiwandert, bedeutet demnach, dass gilt $A_P = 0{,}07\% \cdot A_S$.

$$A_P = {R_p}^2\pi = 0{,}07\% \cdot A_S = 0{,}07\% \cdot {R_S}^2\pi$$

$$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{R_P} = \sqrt{0{,}0007} \cdot R_S = \sqrt{0{,}0007} \cdot R^* \cdot R_\odot = \sqrt{0{,}0007} \cdot 0{,}64 \cdot 6{,}957 \cdot 10^8\ m \approx \boldsymbol{1{,}18 \cdot 10^7\ m}$$

$$\frac{\boldsymbol{R_P}}{\boldsymbol{R_E}} = \frac{1{,}18 \cdot 10^7\ m}{6371 \cdot 10^3\ m} \approx \boldsymbol{1{,}8}$$

Quellen und weiterführende Literatur:

Beckmann, Epperlein: Astronomie Grundkurs, Manz-Verlag, 1989
Reinhardt Lermer, Grundkurs Astronomie, bsv-Verlag, 1993
Andreas Müller: Schwarze Löcher, Spektrum – Akademischer Verlag, 2010
Ralf Klessen: Sternentstehung, Springer-Verlag, 2007
Kosmos Himmelsjahr 2013: Wo ist die zweite Erde? (Exoplaneten) (S. 142 bis 147)
Kosmos Himmelsjahr 2011: Wie viele außerirdische Zivilisationen gibt es? (Exoplaneten) (S. 186 bis 191)

Astronomie und Raumfahrt, Erhard Friedrich Verlag:

Entfernungsbestimmun:
Heft 5/2012: Die Bestimmung großer kosmischer Entfernungen (S. 10 bis 16)
Heft 5/2012: „So groß ist das Universum…“ (S. 17 bis 20)
Heft 5/1996: Astronomische Entfernungsbestimmung (S. 4 bis 9)
Heft 5/1996: Trigonometrische Parallaxe heute (S. 10 bis 14)
Heft 5/2012: Die sonnennahen Sterne als Grundlage für die Entfernungsbestimmung im All (S. 35 bis 38)
Heft 5/2011: Astronomie mit GAIA (S. 21 bis 25)
Heft 5/2011: Die Parallaxe von 61 Cygni selbst bestimmt (S. 29 bis 31)

Spektroskopie:
Heft 5/2008: Die Rotverschiebung – der Schlüssel zur modernen Kosmologie (S. 34 bis 38)
Heft 3_4/2013: Ein Kandidat für z = 11 (S. 39)
Heft 3_4/2013: Sirius besteht aus Wasserstoff (S. 30 bis 34)

Hertzsprung-Russel-Diagramm:
Heft 6/2001: Das Hertzsprung-Russell-Diagramm und das Maß der Sterne (S. 18 bis 21)
Heft 6/2013: 100 Jahre HRD (S. 36 bis 39)

Sternentwicklung:
Heft 1/2004: Die erste Million Jahre der Sonne (S. 4 bis 8)
Heft 6/2007: Kernphysik in der Astrophysik – Energieerzeugung in Sternen (S. 23 bis 27
Heft 3_4/2013: Sternentwicklungsreihen im HRD (S. 11 bis 12)
Heft 5/2010: Novaforschung im 20. Jahrhundert (S. 8 bis 11)
Heft 6/2001: Supernovaexplosionen: ihre Rolle in der Astrophysik und Kosmologie (S. 13 bis 17)
Heft 6/2015: El Dorado im All: Schwere Sterne, Staub und Gold (S. 25 bis 28)
Heft 5/2010: Neutronensterne (S. 12 bis 15)
Heft 3_4/2012: Weiße Zwerge und Neutronensterne (S. 10 bis 13)
Heft 1/2000: Braune Zwerge – Faszination des Unscheinbaren (S. 8 bis 10)

Schwarze Löcher:
Heft 3_4/2011: Das Monster im Zentrum der Milchstraße (S. 6 bis 10)

Sternhaufen:
Heft 2/2012: Eigenbewegungen und Raumbewegungen von Sternhaufen in der Milchstraße (S.34 bis 37)
Heft 3_4/2008: Distanz und Alter eines Kugelsternhaufens (S. 58 bis 59)
Heft 6/2001: Der galaktische Sternhaufen NGC 7789 (S. 44 bis 45)

Exoplaneten:

Heft 6/2011: Exoplaneten im Unterricht (S. 6 bis 10)
Heft 6/2005: Planetenwelten anderer Sterne (S. 32 bis 35)
Heft 6/2005: Extrasolare Planeten – Entdeckung im Klassenraum (S. 10 bis 18)
Heft 3_4/2013: Exoplaneten auf elliptischen Bahnen – eine Projektidee (S. 45 bis 49)
Heft 1/2010: Extrasolare Planeten und ihre Atmosphären (S. 8 bis 11)
Heft 6/2011: Die Entdeckung extrasolarer Planeten mit der Radialgeschwindigkeitsmethode (S. 16 bis 19)
Heft 6/2011: Die Beobachtung von extrasolaren Planeten mit der Transitmethode (S. 23 bis 27)
Heft 6/2011: Direkte Abbildung von jungen Planeten (S. 33 bis 36)
Heft 5/2007: Extrasolare Planeten: Die Pulsar-Timing-Methode (S. 23 bis 24
Heft 6/2011: CoRoT (S. 11 bis 15)

Habitable Zonen:

Heft 6/2002: Die Suche nach außerirdischem Leben (S. 4 bis 7)
Heft 2/2016: Wo ist die Erde Zwei-Punkt-Null? (S. 25 bis 31)
Heft 1/2017: Schülerinnen und Schüler auf der Suche nach der Erde 2.0 (S. 40 bis 45)
Heft 3_4/2013: Die Lebenszone der Sterne: Ideen für den Unterricht (S. 25 bis 29)
Heft 3_4/2008: Grenzen des Lebens (S. 47 bis 50
Heft 5/2010: Die habitable Zone der Sonne (S. 4 bis 7)
Heft 1/2001: SETI 2000 – Neue Wege auf der Suche nach außerirdischer Intelligenz (S. 40 bis 42)

Kosmos Himmelsjahr:

Kosmos Himmelsjahr 2016: Die Vermessung des Kosmos (Parallaxe, Hipparcos, GAIA) (S. 88 bis 94)
Kosmos Himmelsjahr 2017: Der Arches-Sternhaufen: extrem jung und dicht (S. 88 bis 93)
Kosmos Himmelsjahr 2015: Omega Centauri – ein Kugelsternhaufen der Superlative (S. 146 bis 150)
Kosmos Himmelsjahr 2018: Der Planetenzoo (Exoplaneten) (S. 243 bis 51)
Kosmos Himmelsjahr 2018: Der allernächste Stern und sein Planet (Exoplaneten) (S. 46 bis 51)
Kosmos Himmelsjahr 2011: Wie viele außerirdische Zivilisationen gibt es? (Exoplaneten) (S. 186 bis 191)
Kosmos Himmelsjahr 2013: Wo ist die zweite Erde? (Exoplaneten) (S. 142 bis 147)
Kosmos Himmelsjahr 2013: Wo ist die zweite Erde (S. 142 bis 147)

Spektrum der Wissenschaft:

Heft 3/2012: Mittelgewichte unter den Schwarzen Löchern (S. 38 bis 47)
Heft 4/2016: Botschaften von Schwarzen Löchern (S. 36 bis 249)

Bild der Wissenschaft:

Heft 10/2007 Sprengbomben am Himmel (Supernovae) (S. 42 bis 49)

Naturwissenschaften im Unterricht Physik

Heft 155 Schwarze Löcher (S. 14 bis 17)

Heft 155 Sind wir allein (Exoplaneten) (S. 10 bis 13)

Sterne und Weltraum:

Dossier 1/2010 Aufregende neue Planetenwelten (S. 22 bis 31)

Themen für Seminararbeiten und Referate:

- **Spektroskopie - Entschlüsselung des Sternenlichts**

→ Rotverschiebungen in der Kosmologie

- **Entfernungsbestimmung mithilfe der Fixsternparallaxe**

→ Die Satelliten HIPARCOS und GAIA

- **Das Hertzsprung-Russell-Diagramm**

→ Der Lebensweg der Sonne im HRD

- **Entstehung und Entwicklung eines Sterns**

→ Supernovae als Kollaps eines Schweren Sterns

- **Kernfusion – die Energiequelle der Sterne**

→ Kernfusion in der Sonne

- **Supernovae – kosmische Feuerwerke**

→ Supernovae vom Typ SN Ia

- **Schwarze Löcher**

→ Das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße

- **Extrasolare Planeten und deren Erforschung**

→ Habitable Zonen im in Planetensystemen

II. Der Aufbau des Universums

1) Messung kosmischer Entfernungen

Die Cepheiden-Methode zur Entfernungsbestimmung:

Cepheiden sind Rote Riesen, die z.T. mehr als 10 000-mal so leuchtkräftig wie die Sonne sind. Deshalb können sie auch in großen Entfernungen gesehen werden. Ihre auffällige Eigenschaft sind Helligkeitsveränderungen mit Perioden zwischen 1 und 100 Tagen. Diese Helligkeitsveränderungen entstehen durch periodische Ausdehnung und Kontraktion des Sterns. Sterne mit dieser Eigenschaft heißen „**Pulsationsveränderliche**“.

1912 entdeckte die Astronomin **Henrietta Leavitt (1868 – 1921)** einen (näherungsweisen) Zusammenhang zwischen der Periodendauer p in Tagen d und der mittleren absoluten Helligkeit $\overline{M}$ von Cepheiden:

$$\boxed{\boldsymbol{\overline{M} = -1,67 - 2,54 \cdot \lg\left(\frac{p}{1\,d}\right)}}$$

Perioden-Helligkeits-Beziehung bei Cepheiden

Die Perioden-Helligkeits-Beziehung liefert also die mittlere absolute Helligkeit $\overline{\mathrm{M}}$ eines Cepheiden.

Misst man die mittlere scheinbare Helligkeit $\overline{m}$, so kann man mit dem Entfernungsmodul

$$\overline{m} - \overline{M} = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right)$$

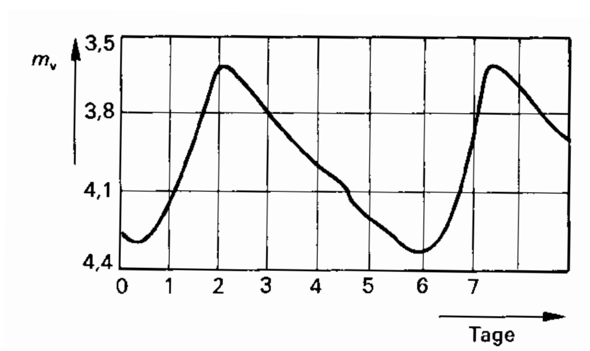
die Entfernung r des Cepheiden und damit die Entfernung der Galaxie berechnen.

Damit sind Cepheiden Standardkerzen!

Die Cepheiden-Methode eignet sich für die Abschätzung von Entfernungen bis zu den Nachbargalaxien der Milchstraße.

Rechenbeispiel:

Gesucht wird die Entfernung des Cepheiden mit der rechts abgebildeten Helligkeitskurve.



Der Helligkeitskurve entnimmt man: $\mathrm{p} = 5{,}4\,\mathrm{d}$

und $\overline{\mathrm{m}} = \dfrac{4{,}3 + 3{,}6}{2} = 3{,}95$.

Perioden-Helligkeits-Beziehung:

$$\begin{aligned} \overline{M} &= -1{,}67 - 2{,}54 \cdot \lg\left(\frac{p}{1\,d}\right) \\ &= -1{,}67 - 2{,}54 \cdot lg\,(5{,}4) \\ &\approx -3{,}53 \end{aligned}$$

Das Entfernungsmodul liefert die Entfernung des Cepheiden:

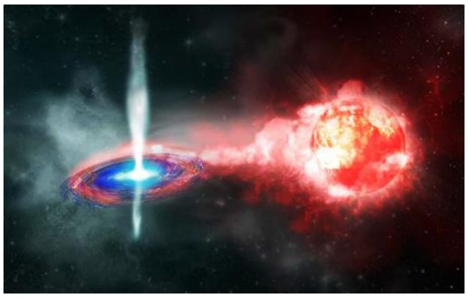
$$\overline{m} - \overline{M} = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right) \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{r} = 10^{\frac{\overline{m}-\overline{M}}{5}} \cdot 10\,pc \approx 313\,pc \approx \boldsymbol{1021\,Lj}$$

Entfernungsbestimmung mit Supernovae vom Typ Ia:

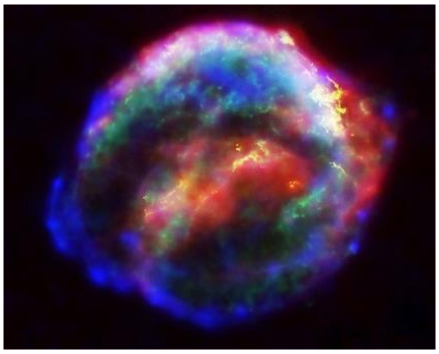
In der Kosmologie ist es notwendig, auch die Entfernung weit entfernter Galaxien messen zu können. Dafür reicht die Helligkeit von Cepheiden aber nicht aus.

Sehr gute **Standardkerzen** sind **Supernovae des Typs Ia** (**SN Ia**).

Supernovae vom Typ SN Ia:

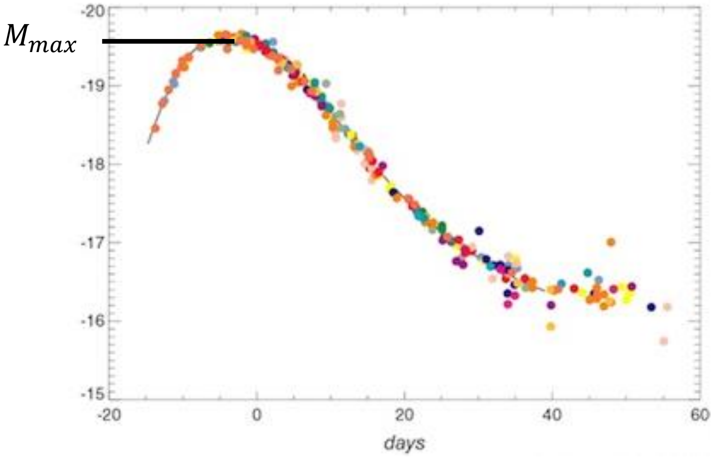


Im Gegensatz zu einer Supernova vom Typ II (vgl. Kap. V, S. 241) ist eine Supernova vom Typ Ia kein Phänomen, das im Rahmen der Sternentwicklung auftritt. Bei einer SN Ia wird in einem Doppelsternsystem mit einem Weißen Zwerg als Hauptstern der Begleitstern vom Weißen Zwerg aufgesaugt (**akkretiert**). Überschreitet dabei die Masse des Weißen Zwergs die **Chandrasekhar-Grenze** (etwa **1,4 Sonnenmassen**), so explodiert der Weiße Zwerg. Der Stern wird auseinandergerissen und es bleibt kein Sternrest übrig.



In einer Galaxie tritt etwa alle 300 Jahre eine SN Ia auf. Wenn man bedenkt, dass das Universum schätzungsweise 100 Milliarden Galaxien enthält, wird aber klar, dass man bei Betrachtung eines großen Himmelsausschnitts alle paar Sekunden eine Supernova vom Typ Ia beobachten kann.

Die **1604 von Johannes Kepler beobachtete Supernova** war eine Supernova vom Typ SN Ia. Das Bild vom Überrest dieser Supernova wurde aus Aufnahmen im sichtbaren Bereich (HST), im Röntgenbereich (Chandra) und im Infrarot-Bereich (Spitzer) zusammengesetzt.



Eine Besonderheit der SN Ia ist, dass **alle Supernovae dieses Typs die gleiche maximale Leuchtkraft und damit die gleiche maximale absolute Helligkeit M_{max}** entwickeln. Dies liegt an der kritischen Masse (Chandrasekhar-Grenze), die für alle SN Ia gleich ist und an der Tatsache, dass die Strahlungsleistung bzw. Leuchtkraft eines Sterns von der Masse des Sterns bestimmt wird.

Die Leuchtkraft einer SN Ia steigt innerhalb von 20 bis 30 Tagen auf einen Wert von etwa 100 Milliarden Sonnenleuchtkräften bzw. auf eine absolute Helligkeit $M_{max} \approx -19{,}6$ an und fällt dann allmählich wieder ab. Die Supernova kann wochenlang ihre gesamte Galaxie überstrahlen.

Der Verlauf der Leuchtkraftkurven und der Maximalwert der absoluten Helligkeit sind für alle Supernovae vom Typ Ia gleich.

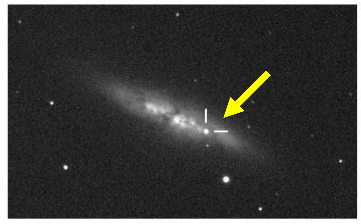
Die absolute Helligkeit M_{max} kann man für Supernovae vom Typ Ia in relativ nahen Galaxien, deren Entfernung sich beispielsweise mit der Cepheidenmethode bestimmen lässt, aus ihrer maximalen scheinbaren Helligkeit m_{max} mithilfe des Entfernungsmoduls berechnen:

$$m_{max} - M_{max} = 5 \cdot lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right)$$

Die Entfernung einer beliebigen Supernova vom Typ SN Ia und damit der Galaxie in der sich die Supernova ereignete, erhält man ebenfalls mithilfe des Entfernungsmoduls.

Supernovae vom Typ SN Ia sind nicht zuletzt wegen ihrer extrem großen Leuchtkraft und damit einer sehr großen maximalen absoluten Helligkeit **in der modernen Kosmologie die wichtigsten Standardkerzen** für die Bestimmung kosmischer Entfernungen (vgl. Kap. V, S. 210).

- Im **Januar und Februar 2014** konnten wir sogar mit dem Schulteleskop eine Supernova vom Typ SN Ia in der Galaxie M82 im Sternbild „Großer Bär" beobachten. Die Supernova erhielt den Namen **SN 2014J**. Man konnte bei mehreren Beobachtungen deutlich erkennen, wie die Helligkeit der Supernova innerhalb von etwa zwei Monaten abnahm, bis sie nicht mehr erkennbar war.



Rechenbeispiel: Supernova SN 2014 J in der Galaxie M82

Wir berechnen die maximale scheinbare Helligkeit dieser Supernova, um zu belegen, dass die SN Ia sogar mit dem Schulteleskop beobachtbar war:

Der oben abgebildeten Leuchtkraftkurve können wir entnehmen, dass die maximale absolute Helligkeit von Supernovae des Typs SN Ia etwa den Wert $M_{max} = -19{,}6$ erreicht.

Damit folgt: $$\boldsymbol{m_{max}} = M_{max} + 5 \cdot lg\left(\frac{r}{10\,pc}\right) = -19{,}6 + 5 \cdot \lg\left(\frac{11{,}5 \cdot 10^6\,Lj}{10 \cdot 3{,}26\,Lj}\right) \approx \mathbf{8{,}1}$$

Die SN Ia erscheint also heller als die gesamte Galaxie M82, die die scheinbare Helligkeit 8,6 hat. Damit ist sie im Schulteleskop gut beobachtbar.

2) Die Milchstraße

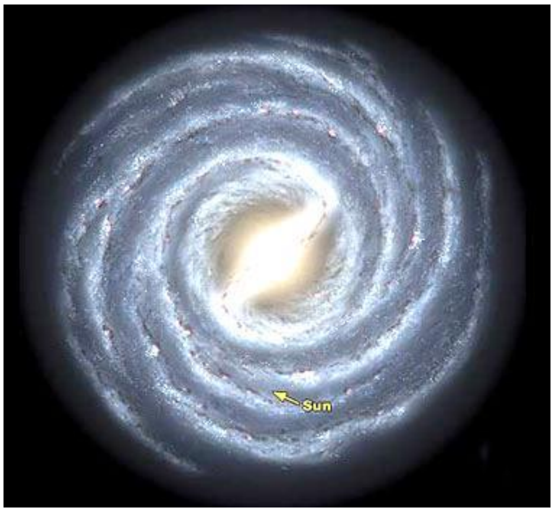
Woher kommt der Name „Milchstraße"?

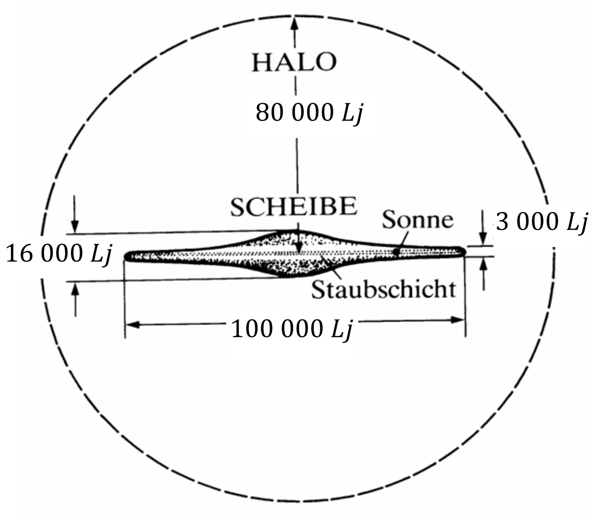
Unsere Heimatgalaxie ist die **Milchstraße**, die auch als „**Galaxis**" bezeichnet wird. Häufig wird der milchig schimmernde Sternenteppich, den wir in klaren Nächten am Nachthimmel sehen können, als „**Band der Milchstraße**" bezeichnet.

Wir müssen uns allerdings darüber im Klaren sein, dass nicht nur die Sterne, die am Nachthimmel das „Band der Milchstraße" bilden, zur Milchstraße gehören, sondern praktisch alle Sterne und astronomischen Objekte, die wir mit bloßem Auge am Nachthimmels sehen können.

Der Name „Milchstraße" stammt aus der **antiken griechischen Mythologie**: Zeus ließ seinen unehelichen Sohn Herakles, den Sohn der sterblichen Alkmene an der Brust seiner Frau, der Göttin Hera trinken, als Hera schlief. Herakles sollte auf diese Weise göttliche Kräfte erhalten. Hera wachte aber auf, stieß Herakles empört weg und verspritzte dabei einen Strahl ihrer Milch über den ganzen Himmel…

Aufbau und Entstehung der Milchstraße:





Die Milchstraße ist eine **Spiralgalaxie**.

Sie hat einen **Durchmesser von etwa 100 000 Lichtjahren** und enthält schätzungsweise **100 Milliarden Sterne**. Die **Masse** der Milchstraße wird auf ca. **1,9 Billionen Sonnenmassen** geschätzt.

Die **Sonne** ist etwa 26 000 Lj vom Zentrum der Milchstraße entfernt und umkreist dieses mit einer Bahngeschwindigkeit von etwa 250 $\frac{km}{s}$.

Aus dem Weltall wäre die **galaktische Scheibe** der Milchstraße sichtbar. Sie zeigt in der Mitte, den sogenannten „**Bulge**“. Die galaktische Scheibe wird umgeben von einem kugelförmigen **Halo**, der mehrere Tausend **Kugelsternhaufen** und große Mengen **Dunkler Materie** mit etwa 1 Billion Sonnenmassen enthält.

Weil wir uns in der Milchstraße befinden, ist es uns nicht möglich, von außen auf die Milchstraße zu blicken. Unser Wissen über die Milchstraße beruht auf Messungen an Sternen, Gaswolken usw. in der Milchstraße und auf Beobachtungen an ähnlichen Galaxien wie unserer Nachbargalaxie, der Andromeda-Galaxie.

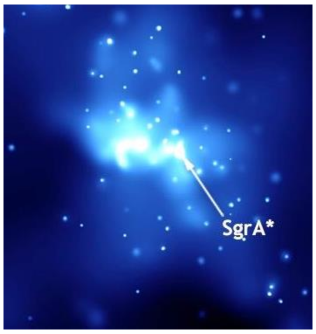
Die gängigste Theorie für die **Entstehung der Spiralarme** ist die „**Dichtewellentheorie**“. Nach dieser Theorie rotiert die Galaxie nicht wie ein starrer Körper. Die einzelnen Sterne laufen in die Spiralarme hinein und wieder heraus. Die Spiralarme selbst werden als stehende Dichtewellen betrachtet; als Orte, an denen die Sterndichte besonders hoch ist, die aber von unterschiedlichen Sternen durchlaufen werden. Durch die Dichtewellen wird in den Spiralarmen das interstellare Gas stark komprimiert. Deshalb befinden sich dort **Sternentstehungsgebiete**.
Computersimulationen, denen die Dichtewellentheorie zugrunde liegt, zeigen, dass sich auch die Form einer Spiralgalaxie im Laufe von Milliarden von Jahren ändert.

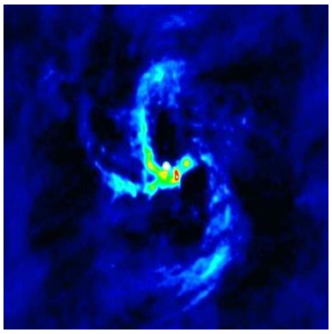
Die Milchstraße entstand vor etwa 10 Milliarden Jahren aus einer kugelförmigen, rotierenden Gaswolke, die sich innerhalb von einigen 100 Millionen Jahren zu einer Gasscheibe abplattete.

Im Zentrum der galaktischen Scheibe vermutet man ein **Schwarzes Loch** mit 4,5 Millionen Sonnenmassen.

Auf das Schwarze Loch weist eine starke Radioquelle, **Sagittarius A**, hin. Chandra registrierte Röntgenausbrüche in der Nähe von Sag A, die darauf schließen lassen, dass bis zu $20\,000$ kleinere Schwarze Löcher ein supermassives Schwarzes Loch in einem Abstand von etwa 70 Lj umkreisen.

Die beiden Aufnahmen zeigen Sagittarius A aus der Sicht des Röntgensatelliten Chandra (links) und des Radio-Teleskop-Arrays VLA.





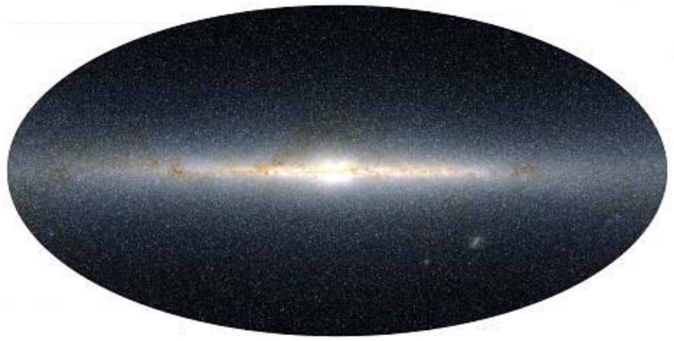
Beobachtung der Milchstraße in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen:

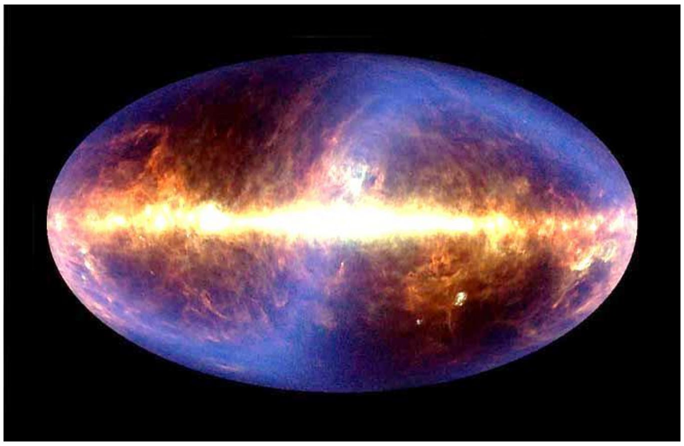
Blickt man durch ein Teleskop auf das Band der Milchstraße, so erkennt man, dass in diesem Bereich besonders viele Sterne zu sehen sind.

Das Zentrum der Milchstraße liegt im Sternbild „Schütze“. Zum Zentrum hin nimmt die Sterndichte stark zu. Außerdem enthält die innere galaktische Scheibe viel interstellares Gas und Staub. Diese **interstellare Materie** versperrt optischen Teleskopen den Blick zum Zentrum der Milchstraße.

Radiowellen, **Infrarotstrahlung** und **Röntgenstrahlung** durchdringen die interstellare Materie weit besser als sichtbares Licht. Seit dem Bau von Radioteleskopen (ab 1945) nahm deshalb die Erforschung unserer Galaxis einen gewaltigen Aufschwung. Satellitenteleskope wie Spitzer, Herschel und Chandra, die Infrarot- bzw. Röntgenstrahlung aus dem Zentrum der Milchstraße beobachten, lieferten wichtige Informationen über unsere Heimatgalaxie.

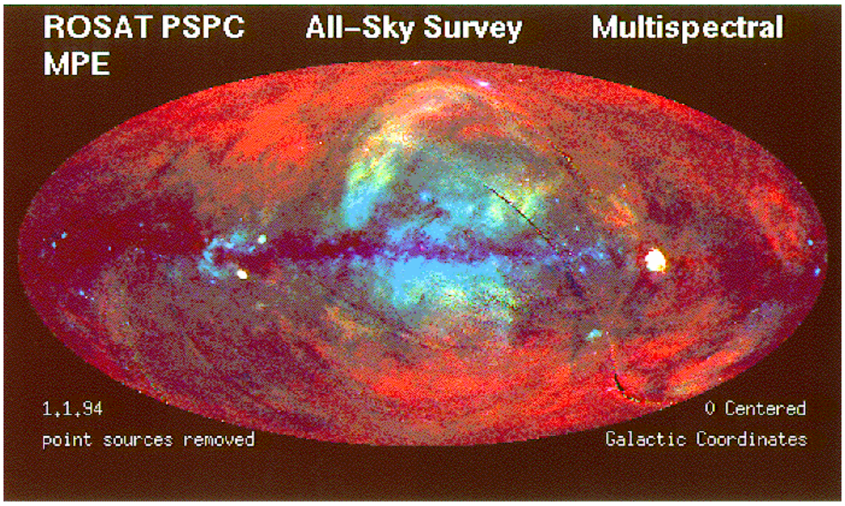
Infrarotstrahlung durchdringt den interstellaren Staub sehr gut. In der rechts abgebildeten Infrarot-Aufnahme des gesamten Himmels im nahen Infrarot bei einer **Wellenlänge von** $2\ \mu m$ ist die galaktische Scheibe der Milchstraße mit dem Bulge deutlich erkennbar. Die beiden hellen Flecken rechts unterhalb der galaktischen Scheibe sind die Große und die Kleine Magellansche Wolke. Diese beiden kleinen Begleitgalaxien der Milchstraße sind am Südsternhimmel mit bloßem Auge sichtbar.





Auch das zweite Bild des Himmels ist eine Infrarotaufnahme. Es wurde aus drei mit der Infrarotkamera des COBE-Satelliten bei den **Wellenlängen** $60\ \mu m$ **(blau),** $100\ \mu m$ **(grün) und** $240\ \mu m$ **(rot)** aufgenommenen Bildern zusammengesetzt. Das Band der Milchstraße erscheint jetzt hell, weil interstellares Gas und interstellarer Staub in diesem Wellenlängenbereich stark strahlen. Die Milchstraße enthält etwa 5 Milliarden Sonnenmassen interstellares Gas. Supernovae und Sternwinde blasen die interstellare Materie aus der galaktischen Scheibe heraus. Als blauer Schleier erscheint interplanetarischer Staub. Er markiert die ekliptische Ebene, in der die Planeten um die Sonne kreisen.

Aus Daten des **Röntgensatelliten ROSAT** wurde unsere dritte Himmelskarte erstellt. Die Energie der Röntgenstrahlung nimmt von rot über grün nach blau zu. Die galaktische Scheibe der Milchstraße zeigt sich als starker Röntgenstrahler. Sie enthält Supernova-Überreste, Röntgendoppelsterne und extrem heißes Gas als Röntgenquellen. Die hellen, besonders energiereichen Gebiete sind der Röntgendoppelstern Cygnus X1 (links im Bild) und der Vela-Pulsar (rechts im Bild).

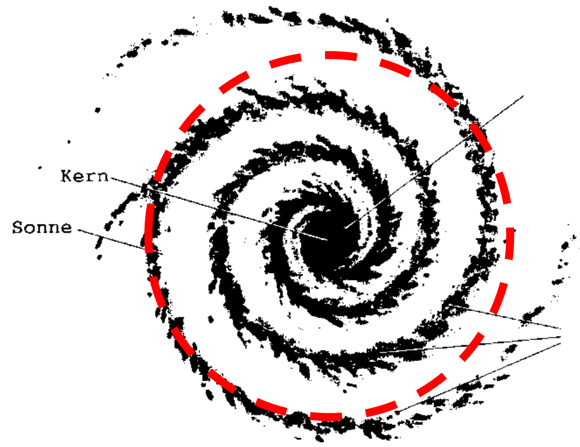


Abschätzung der Sternmasse in der Milchstraße:

Weil die Sterndichte in der Milchstraße nach außen hin stark abnimmt und vermutlich sehr viel Masse im Schwarzen Loch im Zentrum der Milchstraße gebunden ist, bestimmen wir die Masse der leuchtenden Materie innerhalb der Umlaufbahn der Sonne um das galaktische Zentrum. Die Gesamt-Sternasse der Milchstraße sollte dann nicht wesentlich größer sein.

Bei den Berechnungen gehen wir von drei vereinfachenden Annahmen aus:

- Die Galaxie besteht nur aus sichtbarer Materie.
- Die Sonne bewegt sich auf einer Kreisbahn um das Zentrum.
  (Bahngeschwindigkeit:250 $\frac{km}{s}$,
  Bahnradius: $r \approx 26\,000\ Lj$)
- Die Sterndichte nimmt zum Zentrum der Milchstraße hin stark zu und das zentrale Schwarze Loch ist mit 4,5 Millionen Sonnenmassen sehr schwer.
  Deshalb denkt man sich für Berechnungen die gesamte innerhalb der Sonnenbahn liegende Masse M näherungsweise im Zentrum der Milchstraße konzentriert.



Die für die Rotationsbewegung der Sonne notwendige Zentripetalkraft wird durch die Gravitationskraft der Masse im Inneren der Sonnenbahn bereitgestellt. Deshalb kann man ansetzen:

Gravitationskraft $=$ **Zentripetalkraft**

$$G \cdot \frac{m_\odot \cdot M}{r^2} = m_\odot \cdot \frac{v^2}{r} \quad \Longrightarrow \qquad \boldsymbol{M = \frac{v^2 \cdot r}{G}}$$

(Gesamtmasse innerhalb der Sonnenbahn)

Mit $v \approx 250\ \frac{km}{s}$ und $r = 26\,000\ Lj = 2{,}46 \cdot 10^{20}\ m$ ergibt sich:

$$\boldsymbol{M} = \frac{\left(250 \cdot 10^3\ \frac{m}{s}\right)^2 \cdot 2{,}46 \cdot 10^{20}\ m}{6{,}673 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2}} \approx \boldsymbol{2{,}30 \cdot 10^{41}\ kg}$$

Diese Abschätzung liefert für die Milchstraße eine Sternmasse von **mindestens 120 Milliarden Sonnenmassen**.

Weil die Milchstraße große Mengen nichtleuchtender Masse in Form von Schwarzen Löchern, Sternleichen und vor allem Dunkler Materie enthält, ist die gerade berechnete Sternmasse nur ein Bruchteil der Gesamtmasse der Milchstraße.

Die **Gesamtmasse der Milchstraße** wird auf **1400 Milliarden Sonnenmassen** geschätzt.

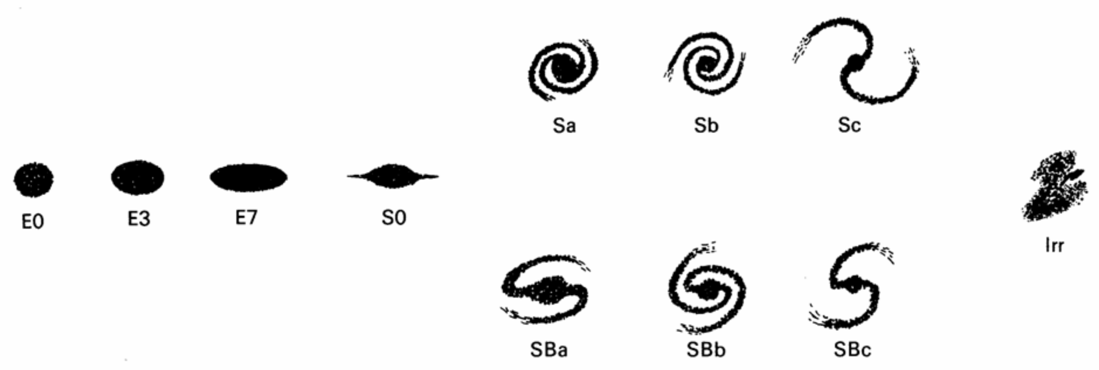
3) Galaxientypen

Die Hubble-Klassifikation:

Die Milchstraße ist eine **Spiralgalaxie**.

Es gibt aber noch eine Reihe **weiterer Galaxientypen** mit charakteristischen Eigenschaften. Ein Ausschnitt aus dem **Hubble-Ultra-Deepfield** (vgl. Kap. II, S. 51) zeigt unterschiedliche Galaxienformen:

Edwin Hubble gelang es 1923 mit dem 2,5m-Spiegelteleskop auf dem Mt. Wilson in Kalifornien, dem damals größten Spiegelteleskop, unsere Nachbargalaxie, die Andromeda-Galaxie in Einzelsterne aufzulösen und bestimmte ihre Entfernung zu 900 000 Lichtjahren (tatsächliche Entfernung: 2,5 Millionen Lj). Damit erbrachte er den Nachweis, dass die Andromeda-Galaxie weder ein Gasnebel ist, noch zur Milchstraße gehört. Hubble beobachtete zahlreiche weitere Galaxien im nahen Universum und erkannte, dass bei den Galaxien bestimmte typische Formen vorkommen. Diese Galaxientypen stellte Hubble in der **Hubble-Klassifikation** zusammen:



- **Spiralgalaxien (S):**

  ausgeprägte Rotationsbewegung
  Sternentstehungsgebiete im Bereich der Spiralarme.
  Manche Spiralgalaxien enthalten in der Mitte eine Balkenstruktur (untere Zeile in der Hubble-Klassifikation, SB).

- **Elliptische Galaxien (E):**

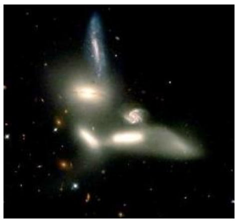
  geringe Rotationsbewegung
  kaum noch Sternentstehung
  Typ der größten und kleinsten Galaxien im Universum
  Die Zahl hinter dem E gibt die Exentrizität der Ellipsengalaxie an:
  Je größer der Zahlenwert, desto stärker ist die Ellipse gekrümmt.

- **Spindelgalaxien (SO):**

  kaum noch Sternentstehung
  wegen ihrer Form auch „Sombrero-Galaxien“ genannt

- **Irreguläre Galaxien (Irr):**

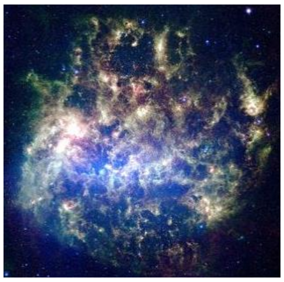
  unsymmetrische Form aufgrund von Wechselwirkungen oder Kollisionen mit anderen Galaxien
  enthalten viel interstellare Materie
  häufig Sternentstehunggebiete.

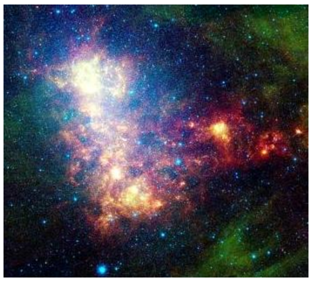


Die **Milchstraße** ist eine **Balkenspiralgalaxie vom Typ SBc**.

Sie besitzt zwei kleine, irreguläre Begleitgalaxien, die **Große** und die **Kleine Magellansche Wolke**, die am Südsternhimmel mit bloßem Auge sichtbar sind.

Die Aufnahmen der Großen (links) und der Kleinen (rechts) Magellanschen Wolke stammen vom Spitzer-Weltraumteleskop.





Unsere nächste größere Nachbargalaxie, die **Andomeda-Galaxie**, ist bereits 2,5 Millionen Lichtjahre entfernt. Sie ist der Milchstraße vermutlich sehr ähnlich.

Das Bild rechts zeigt eine Aufnahme des Spitzer Weltraum-teleskops von der Andromeda-Galaxie.

Wechselwirkungen zwischen Galaxien

Zu Wechselwirkungen zwischen Galaxien kommt es bei der Begegnung zweier Galaxien oder wenn sich Galaxien in Galaxienhaufen auf Ellipsenbahnen um den Massenschwerpunkt des Haufens bewegen. Im ersten Fall durchdringen sich die Galaxien oder sie verschmelzen zu einer größeren Galaxie. Im zweiten Fall werden Gas und Sterne durch Gezeitenkräfte aus den Galaxien gerissen. Weil interstellares Gas zum Großteil aus Wasserstoff besteht, kann man mit Radioteleskopen im Licht der 21cm-Linie des neutralen atomaren Wasserstoffs riesige Wasserstoffwolken beobachten, die die Galaxien einhüllen.

Beispiele für Galaxien, die sich in geringem Abstand um den Schwerpunkt ihres Galaxienhaufens bewegen, sind die Galaxien M81 und M82 im Sternbild „Großer Bär“. (Vgl. Kap. II, S. 65)

Unsere Nachbargalaxie, die Andromeda-Galaxie ist auf Kollisionskurs mit der Milchstraße. Die beiden großen Galaxien bewegen sich mit der Relativgeschwindigkeit $v = 114\ \frac{km}{s}$ aufeinander zu. Bei der Kollision in 4 bis 10 Milliarden Jahren werden sich die beiden Galaxien durchdringen oder verschmelzen.

Computersimulationen zeigen, dass bei der Verschmelzung zweier Spiralgalaxien in der Regel elliptische Galaxien entstehen. In Spiralgalaxien bewegen die Sterne sich ausschließlich in der galaktischen Ebene, während sich die Sterne In elliptischen Galaxien regellos in alle Richtungen bewegen. Weil die galaktischen Ebenen zweier kollidierender Spiralgalaxien sehr wahrscheinlich nicht parallel zueinander liegen, werden sich die Sterne nach der Verschmelzung nicht mehr nur in einer Ebene bewegen.

Die Verschmelzung zweier Galaxien dauert mehrere Millionen bis zu 1,5 Milliarden Jahre und ist meist mit einer hohen Sternentstehungsrate verbunden. In diesem Fall spricht man von **Starburst-Galaxien**.

Irreguläre Galaxien sind oft durch **Kollisionen oder Verschmelzungen von Galaxien** entstanden.

Die meisten der beobachteten Galaxienverschmelzungen sind weit entfernt. Daraus kann man schließen, dass Verschmelzungsprozesse in frühen Phasen des Universums häufiger waren als in der näheren Vergangenheit.

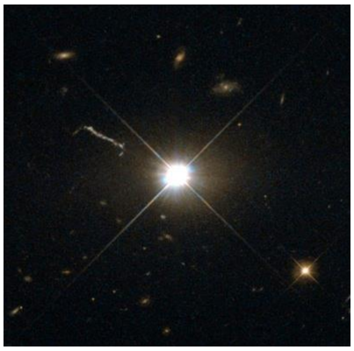
Beispiele:

Die Kollision der 144 Millionen Lj entfernten Galaxien **NGC 2207 und IC 2163** im Sternbild „Großer Hund“ wurde 1999 vom Hubble Space Teleskop aufgenommen.

Die 31 Millionen Lj entfernte **Whirlpool-Galaxie M51** im Sternbild „Jagdhunde“ saugt gerade ihre irreguläre Begleitgalaxie auf. Vermutlich durch Gezeitenkräfte wird interstellares Gas verdichtet. Dabei bilden sich hell leuchtende Sternentstehungsgebiete.

4) Quasare - aktive Galaxien

Quasare (quasi stellar objects), erscheinen im sichtbaren Licht als sternartige Gebilde, deren Rotverschiebung auf Entfernungen von mehreren Milliarden Lichtjahren schließen lässt.

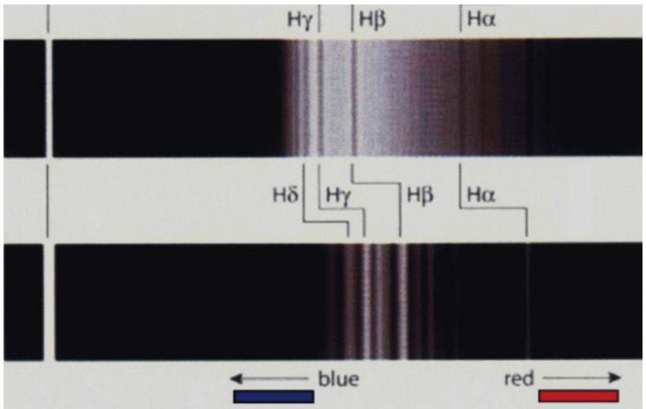


Dass man Quasare über solche Entfernungen hinweg noch beobachten kann, ist nur aufgrund ihrer **ungeheuren Leuchtkraft** möglich. Die leuchtkräftigsten Quasare Haben Leuchtkräfte die mehr als 1000-mal so groß sind wie die Leuchtkraft der Milchstraße oder über 100 Billionen Sonnenleuchtkräfte.

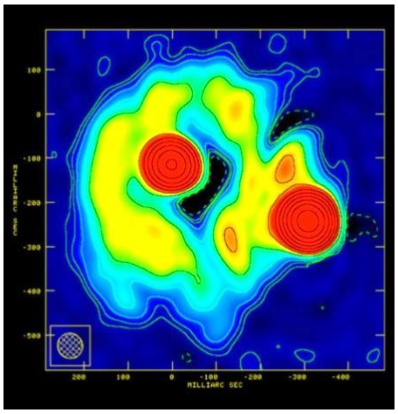
Der Quasar SDSS J0100+2802 ist der bisher hellste beobachtete Quasar und hat die 420 Millionenfache Leuchtkraft der Sonne.

Die HST-Aufnahme rechts zeigt den etwa 2,4 Milliarden Lj entfernten **Quasar 3C 273**.

Die **Rotverschiebung der Quasare** ist so groß, dass im sichtbaren Spektrum eines Quasars Linien erscheinen, deren Wellenlänge beim unverschobenen Spektrum weit im UV-Bereich lägen. Es handelt sich um farbige Emissionslinien, die von heißem Gas in der Umgebung des Quasars ausgesandt werden. Diese Linien sind sehr breit, was auf eine hohe Rotationsgeschwindigkeit dieser Gasmassen schließen lässt.

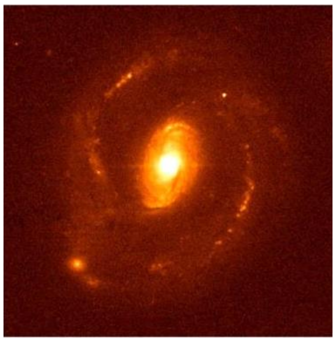


Rechts wird das Emissionsspektrum eines (nur) 2 Milliarden Lj entfernten Quasars mit der Rotverschiebung $z = 0{,}16$ (unten) mit dem Absorptionsspektrum des Sterns Vega (oben, $z = 0$) verglichen.



Mit Radioteleskopen aufgenommene Bilder von Quasaren zeigen, dass es sich bei Quasaren nicht um Sterne sondern um ausgedehnte Objekte handelt.

Links ist eine Aufnahme der vom 7,5 Milliarden Lj entfernten **Quasar B0218+367** emittierten **Radiostrahlung** zu sehen. Der Quasar erscheint aufgrund eines Gravitationslinseneffekts (vgl. Kap. VIII, S. 447) zweimal.



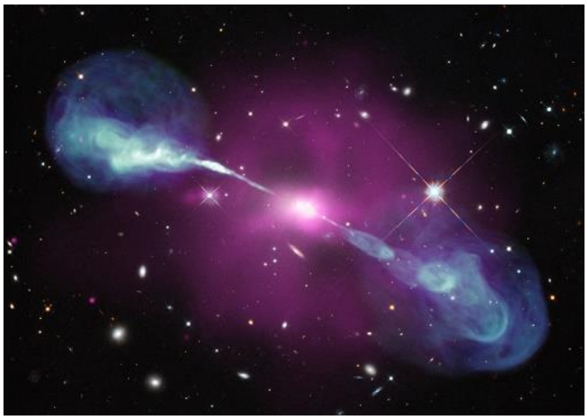
Quasare sind **aktive Galaxien aus der Frühphase des Universums**, die ein **supermassives Schwarzes Loch** mit bis zu 10 Milliarden Sonnenmassen enthalten und **ungeheure Mengen interstellarer Materie** aus ihrer Umgebung ansaugen. Bevor die interstellare Materie in das Schwarze Loch stürzt, strahlt sie gewaltige Energiemengen ab (vgl. Kap. II, S. 65).

Damit lässt sich die extrem große Strahlungsleistung von aktiven Galaxien begründen.

In der Aufnahme rechts ist die „Wirtsgalaxie“ eines Quasars sichtbar.

Eine derart hohe Strahlungsleistung kann nur aufrechterhalten werden, solange das Schwarze Loch von genügend viel interstellarer Materie umgeben wird. Dafür muss aber das Universum eine hohe Dichte haben, was nur in der **Frühphase des Universums** der Fall war.

Um einen Quasar zu beobachten, muss man deshalb weit in die Vergangenheit zurückblicken: mehrere Milliarden Jahre. Ebenso viele Lichtjahre sind Quasare entfernt. Ein Objekt von dem das Licht solange bis zu uns unterwegs war, liegt nahe am Rand des sichtbaren Universums!



Auf Radar- und Röntgenaufnahmen wie dem Chandra-Bild vom **Quasar Herkules A** ist zu erkennen, welche Vorgänge in einem Quasar ablaufen: Ein supermassives, schnell rotierendes Schwarzes Loch in der Mitte des Gebildes saugt Materie aus der Umgebung auf. Die bei der Beschleunigung des heißen Plasmas in der Umgebung des Schwarzen Lochs emittierte Röntgenstrahlung ist rot dargestellt.

Die spektakulären Jets sind gewaltige Materieausbrüche. Die Entstehung der Jets wird ähnlich erklärt, wie Sonnenprotuberanzen: Starke Magnetfelder durchstoßen die Akkretionsscheibe und reißen Plasma weit hinaus ins Weltall. Die elektrisch geladene Materie des Plasmas wird durch die magnetischen Feldlinien zu Jets gebündelt.

Auch im Zentrum der **Milchstraße** befindet sich ein supermassives Schwarzes Loch. Es handelt sich aber um ein **„hungerndes" Schwarzes Loch**, dessen Umgebung weitgehend leer ist.

5) Großstrukturen im Universum

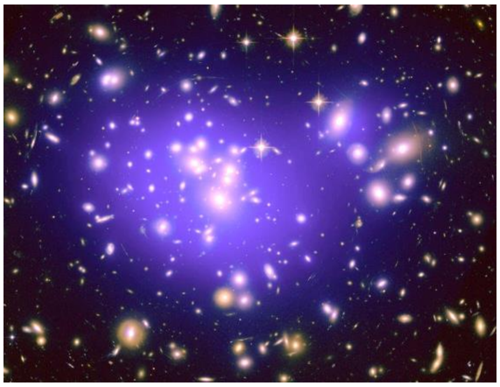
Galaxienhaufen und Galaxiensuperhaufen:

Mit modernen Großteleskopen könnte man mehr als 50 Milliarden Galaxien erfassen, die sich offenbar räumlich zusammenhängenden Gruppen zuordnen lassen.

Galaxienhaufen bestehen aus mehreren Hundert Galaxien, die durch Gravitationskräfte aneinander gebunden sind und sich auf Ellipsenbahnen um den Schwerpunkt des Haufens bewegen. Neben Sternen enthalten Galaxienhaufen große Mengen **Dunkler Materie** und **intergalaktisches Gas**. Die Masse dieses Gases kann ein Vielfaches der Galaxienmasse sein. Es ist ebenfalls gravitativ gebunden und ist mit 10 bis 100 Millionen Grad sehr heiß. Röntgenteleskope machen das heiße intergalaktische Gas sichtbar.

Im **Abell-Katalog** werden **4073 Galaxienhaufen** aufgelistet.

Einer der massereichsten bekannten Galaxienhaufen ist der 2,2 Milliarden Lj entfernte Haufen **Abell 1689** im Sternbild Jungfrau. Die Überlagerung einer HST-Aufnahme und einer Aufnahme des Röntgenteleskops Chandra zeigt neben den Galaxien auch heißes intergalaktisches Gas in Abell 1689.



Zu **Galaxiensuperhaufen** werden wiederum bis zu mehreren hundert Galaxienhaufen zusammengefasst, die ebenfalls gravitativ miteinanderwechselwirken. Galaxiensuperhaufen sind die größten bekannten kosmischen Strukturen mit mehreren Billiarden Sonnenmassen.
In einer Umgebung von 1,5 Milliarden Lichtjahren werden etwa 130 Superhaufen vermutet.

Die **Milchstraße** und die **Andromeda-Galaxie** bilden die größten Galaxien in der **Lokalen Gruppe**, einem vergleichsweise kleinen Galaxienhaufen, der vermutlich **300 bis 500 Zwerggalaxien** im Umkreis von **5 bis 7 Millionen Lj** enthält, von denen 70 bekannt sind. Die Lokale Gruppe bewegt sich auf den benachbarten, 70 Millionen Lj entfernten, großen Galaxienhaufen **Virgo** zu, der mindestens 1300 Galaxien enthält.

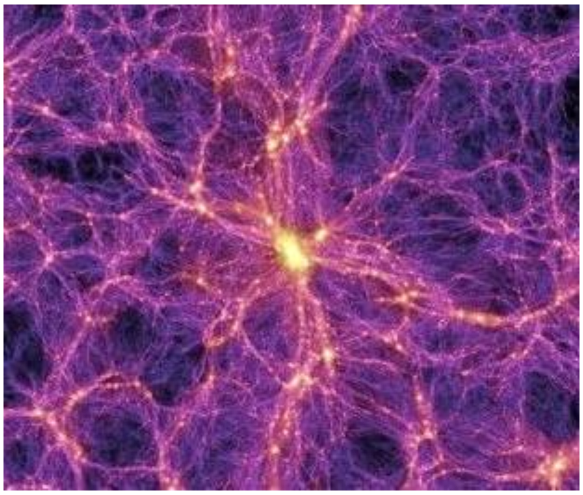
Die Lokale Gruppe und der Virgo-Haufen gehören zum **Laniakea-Superhaufen**. Dieser Superhaufen besteht aus etwa $100\,000$ Galaxien und besitzt eine **Ausdehnung von etwa 520 Millionen Lj**. Bis 2014 betrachtete man den sogenannten **Virgo-Superhaufen** als die größte, der Lokalen Gruppe übergeordnete Struktur. Der Virgo-Superhaufen ist jedoch nur ein Teil von Laniakea.

Die großräumige Verteilung der sichtbaren Materie im Universum ist nicht homogen, sondern zeigt eine **wabenartige Struktur**. Die Strukturen, die auf dem Bild Wattefasern ähneln, sogenannte **Filamente**, bestehen aus **Galaxien und Galaxienhaufen**. Sie besitzen Ausdehnungen von mehreren Millionen Lj.

Die Zentren der Galaxiensuperhaufen liegen an den Knotenpunkten der Filamente. Über die Filamente stehen die Superhaufen miteinander in Verbindung.

Zwischen den Filamenten enthält das Universum riesige, fast leere Blasen, die **Voids**, mit einer mittleren Ausdehnung in der Größenordnung von 100 Millionen Lj.

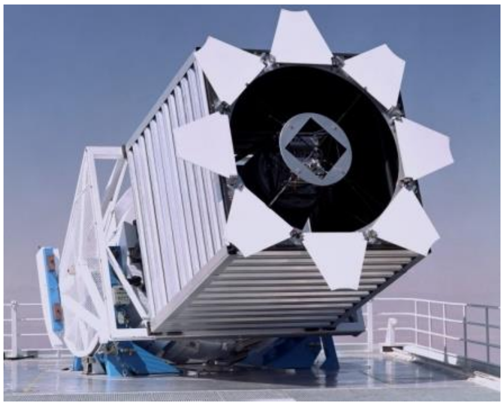
Dass sich die Voids durch eine auswärts gerichtete Bewegung der Galaxien gebildet haben, ist unwahrscheinlich, da eine Galaxie 163 Milliarden Jahre benötigen würde, um bei einer typischen Eigengeschwindigkeit von $600\ \frac{km}{s}$ einen Void zu durchqueren.
Diese Zeit wäre aber etwa 12-mal so lang, wie das Alter des Universums (13,8 Milliarden Jahre).



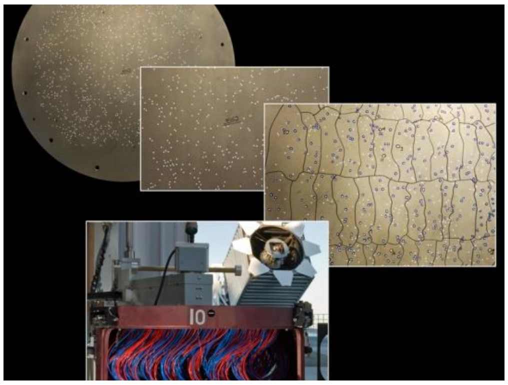
Das Bild zeigt einen, etwa 800 Millionen Lj großen Ausschnitt aus der **Millennium-Simulation** zum Aufbau des Universums (vgl. S. 317f).

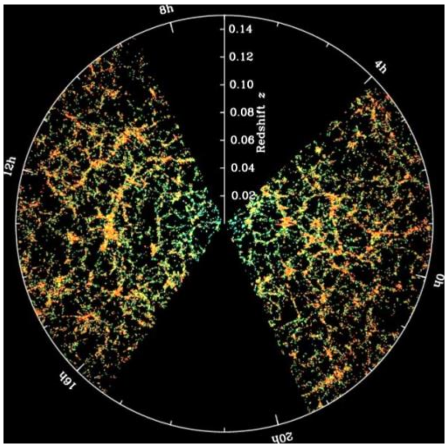
Himmelsdurchmusterungen:

An Supercomutern gerechnete Simulationen großräumiger Strukturen zeigen große Ähnlichkeit mit **Himmelsdurchmusterungen die mit realen Teleskopen** wie dem **Sloan Digital Sky Survay (SDSS) erstellt wurden**. Das 2,5 m-Spiegelteskop am Apache Point Observatory in New Mexico liefert Aufnahmen und Spektren von Galaxien und Quasaren, aus denen Informationen über Helligkeiten, Entfernungen und Formen der Objekte ermittelt werden. Das Projekt, an dem die USA, Japan, Korea und Deutschland beteiligt sind, läuft seit 1998.



Bei SDSS können die Spektren von mehreren hundert Objekten gleichzeitig aufgenommen werden. Dazu werden einzelne Himmelsausschnitte durch Lochplatten spektroskopiert. Die Löcher sind so angeordnet, dass jedes Loch mit der Position eines Sterns oder einer Galaxie übereinstimmt. Über Lichtleiterkabel sind die Löcher mit den Spektrorafen des Teleskops verbunden. Aus den Spektren lassen sich über die Rotverschiebungen die Fluchtgeschwindigkeiten und damit die Entfernungen der Objekte bestimmen (vgl. Kap. V, S. 308ff).



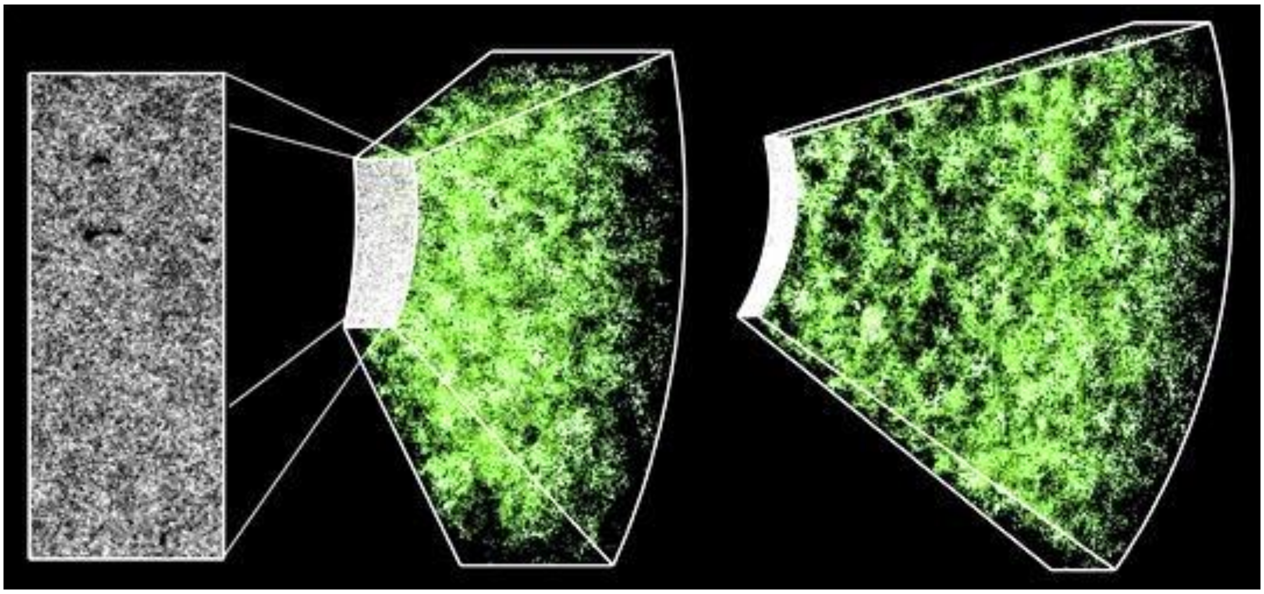


Die Abbildung links zeigt eine **SDSS-Himmelskarte**. Jeder Punkt entspricht einer Galaxie oder einem Quasar. Die Entfernung und damit das Alter der Objekte nimmt nach außen mit der Rotverschiebung z zu. Die Farbe gibt die lokale Materiedichte an: Rot steht für eine geringe, grün für eine mittlere und blau für eine hohe Dichte. Die Anordnung der Galaxien in Filamenten mit dazwischenliegenden Voids ist deutlich erkennbar.

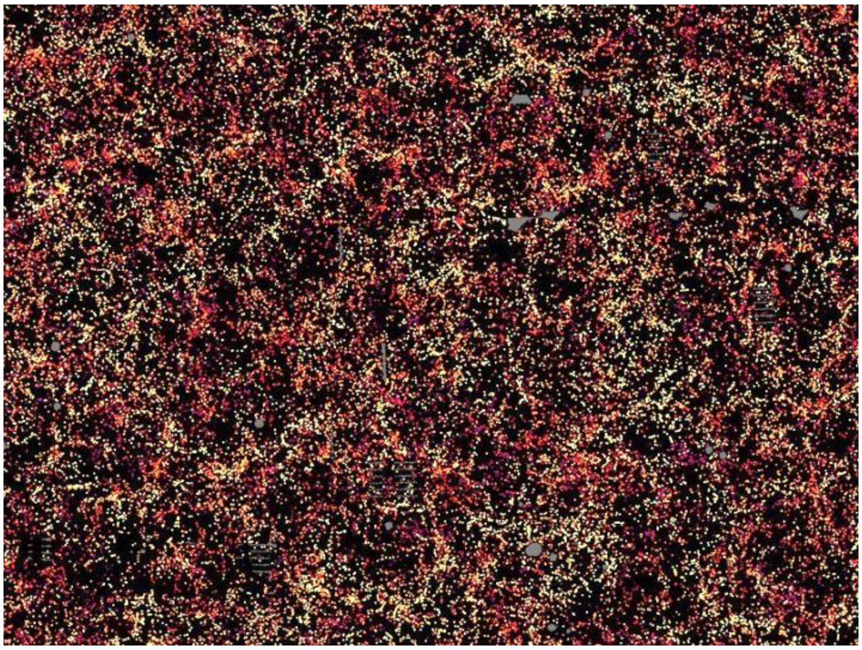
Die größte dreidimensionale Karte des Universums:

Im Rahmen des sechsjährigen Messprojekts **BOSS** (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey) wurden bei SDSS ein Viertel des Himmels durchmustert. Die Struktur des Universums in einem Volumen von 650 Milliarden Kubiklichtjahren wurde mithilfe von Daten aus Spektren von 1,2 Millionen Galaxien mit Entfernungen von bis zu 7 Milliarden Lichtjahren kartiert. Das Ergebnis war die 2012 veröffenlichte größte dreidimensionale Karte des beobachteten Ausschnitts des Universums, der „**BOSS-Katalog**".

Die folgende Darstellung verdeutlicht, wie durch spektroskopische Entfernungsbestimmungen aus einer zweidimensionalen Himmelskarte eine dreidimensionale Karte entsteht.

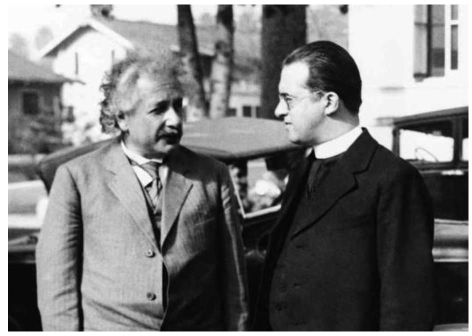


Das Bild unten zeigt einen Schnitt durch die dreidimensionale SDSS/BOSS Karte für eine Entfernung von 6 Milliarden $\pm$ 250 Millionen Lj. Der Ausschnitt ist etwa so groß wie $1/20$ des Himmels.
Er ist 6 Milliarden Lj breit, 4,5 Milliarden Lj hoch, 500 Millionen Lj tief und enthält $48\,741$ Galaxien. Das sind ca. 3% der Objekte des BOSS-Katalogs. Die Farben geben die Entfernungen der Galaxien von der Erde an: von gelb oder rot nach violett nimmt die Entfernung zu.



6) Das Hubble-Gesetz:

Einstein vertrat lange seine Überzeugung von einem **statischen Universum**, also von einem Universum, das sich nicht ausdehnt und das auch nicht irgendwann kollabiert.



Der belgische Priester und Astrophysiker **Georges Lemaître** äußerte bereits 1927 auf der Grundlage beobachteter Galaxienverteilungen und Spektrum von Galaxien, dass das Universums im Einklang mit der Allgemeinen Relativitätstheorie expandieren könne.

Weil die Einsteinsche Feldgleichung expandierende und kollabierende Lösungen zulässt, führte Einstein eine **Kosmologische Konstante** in die Feldgleichung ein, die ein kollabierendes Universum - mathematisch - verhindern sollte.

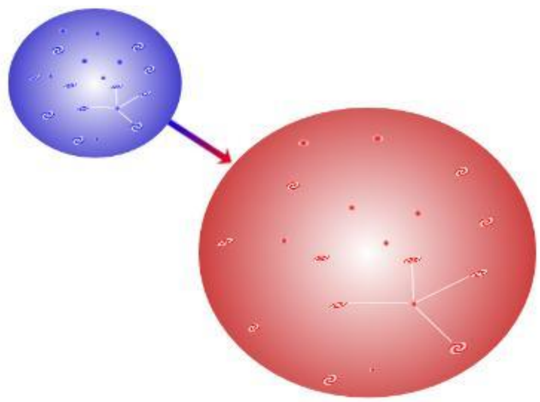
Edwin Hubble veröffentlichte 1929 seine Messergebnisse zur Wellenlängenverschiebung in Galaxienspektren, aus denen hervorging, dass alle Galaxien, die so weit entfernt sind, dass nicht mehr die Gravitationswirkung der Milchstraße ihre Bewegung dominiert, rotverschoben sind.

Diese Beobachtung stützte die Hypothese Lemaîtres zur Expansion des Universums.

Daraufhin bezeichnete Einstein angeblich seine Einführung der Kosmologischen Konstante als „größte Eselei“. (Vgl. Kap. VIII, S. 457)

Veranschaulichung zur Expansion der Raumzeit:

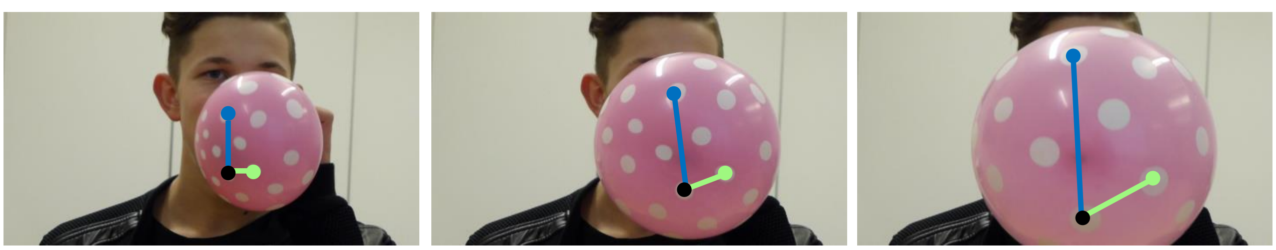
Wir reduzieren die 4-dimensionale Raumzeit um eine Dimension: Die Raumzeit stellen wir uns als einen 3-dimensionalen Luftballon vor und den Raum als die 2-dimensionale Oberfläche des Luftballons, auf den Galaxien aufgedruckt wurden.



Die Expansion der Raumzeit entspricht im Modell dem Aufblasen des Luftballons.

In unserem Modell versetzen wir uns an den Ort einer aufgedruckten Galaxie auf der Oberfläche des Luftballons. Es ist egal, welche wir auswählen!

Wenn der Luftballon beim Aufblasen größer wird, beobachten wir, dass sich alle anderen Galaxien von unserer Galaxie entfernen. Die Bewegung der Galaxien ist keine Eigenbewegung der Galaxien, die ja fest aufgedruckt sind. Die Galaxien werden lediglich mit der Expansion der Raumzeit bzw. mit der Vergrößerung des Luftballons mitbewegt.



Wir versetzen uns in die mit einem schwarzen Punkt markierte Galaxie. In der gleichen Zeit, in der sich unsere $1\ cm$ entfernte Nachbargalaxie (grün) um $5\ cm$ entfernt, entfernt sich eine ursprünglich $2\ cm$ entfernte Galaxie (blau) um $2 \cdot 5\ cm = 10\ cm$. Weil sich die doppelt so weit entfernte Galaxie in der gleichen Zeit auch doppelt so weit von uns entfernt, beobachten wir bei ihr eine doppelt so große Fluchtgeschwindigkeit!

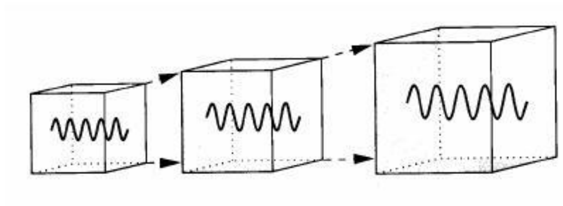
Hinweis:

Dass die aufgedruckte Galaxie beim Aufblasen des Luftballons ebenfalls größer wird, lässt sich nicht vermeiden, soll aber hier nicht beachtet werden. Die Größe einer Galaxie wird von Gravitationskräften zwischen Massen in der Galaxie bestimmt und nicht durch die Expansion des Universums.

Die kosmologische Rotverschiebung:

Die Spektren aller **weit entfernten Galaxien** (weiter als 100 Millionen Lichtjahre!), die nicht mehr messbar unter dem Einfluss der Gravitationskraft der Milchstraße oder anderer großer Galaxien des Virgo-Superhaufens stehen, zeigen eine **deutliche Rotverschiebung**.

Diese Rotverschiebung weit entfernter Galaxien und Galaxienhaufen ist aber nur zu einem kleinen Teil auf auf Relativbewegungen im Raum zurückzuführen, sondern im Wesentlichen auf die Expansion des Universums. Die **Raumzeit dehnt sich aus** und die Galaxienhaufen werden mit dem sich ausdehnenden Raum mitbewegt. Dem Licht, das sich frei durch die sich ausdehnende Raumzeit bewegt, wird die Ausdehnung der Raumzeit aufgeprägt: Die **Wellenlänge des Lichts wird gedehnt**.
(Vgl. auch S. 311!)



Diesen Effekt bezeichnet man als **kosmologische Rotverschiebung**.

Beachte:

Es ist wichtig, die kosmologische Rotverschiebung klar von der Rotverschiebung infolge der Eigenbewegung einer Galaxie und von der Gravitationsrotverschiebung zu unterscheiden:

- Die Eigenbewegung einer Galaxie führt zu einer Blau- bzw. Rotverschiebung, wenn sich die Galaxie auf den Beobachter zu oder vom Beobachter wegbewegt.
- Die **Kosmologische Rotverschiebung** ist eine Folge der Expansion des Raumes, die zu einer Mitbewegung der Galaxien mit dem expandierenden Universum führt.

Eigenbewegung und Mitbewegung führen beide zu einer Relativbewegung zwischen beobachtetem Objekt und Beobachter. Damit beruhen die Rotverschiebung aufgrund einer Eigenbewegung und die kosmologische Rotverschiebung auf dem **Dopplereffekt** (vgl. Kap. V, S. 212ff).

- Die **Gravitationsrotverschiebung** wird von Massen bzw. von „Dellen“ in der Raumzeit verursacht. Licht verliert Energie, wenn es von einem Bereich mit größerer Raumzeitkrümmung in einen Bereich mit kleinerer Raumzeitkrümmung übergeht. Dadurch wird die Wellenlänge des Lichts gedehnt und die Intensität nimmt ab.

Die kosmologische Rotverschiebung $\boldsymbol{z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}}$ nimmt mit der Entfernung zu. Ab einer Entfernung von wenigen $100\ Mpc$ spielt der Anteil der Dopplerverschiebung an der Rotverschiebung im Vergleich zur kosmologischen Rotverschiebung eine vernachlässigbare Rolle.

Die kosmologische Rotverschiebung erklärt insbesondere die **Abkühlung des Universums** infolge der kosmischen Expansion: Dehnung der Wellenlänge bedeutet Abnahme der Strahlungsenergie. Wenn die Energiedichte der Strahlung, die das Universum erfüllt, abnimmt, nimmt die Temperatur des Universums ab. Das Universum wird infolge der kosmologischen Rotverschiebung kühler.

Von dieser Abkühlung zeugt die kosmische Hintergrundstrahlung. Sie entstand etwa $380\,000$ Jahre nach dem Urknall bei einer Temperatur von etwa $3000\ K$ in heißem Staub. Heute besitzt die kosmische Hintergrundstrahlung eine Strahlungstemperatur von nur noch etwa $2{,}7\ K$.

Das Hubble-Gesetz:

Edwin Hubble entdeckte 1929 durch systematische Messungen von Entfernungen mit der Cepheidenmethode und von Rotverschiebungen in Spektren von Galaxien einen interessanten Zusammenhang:

Je weiter eine Galaxie entfernt ist, desto größer ist ihre kosmologische Rotverschiebung z.

Es gilt: $$\boldsymbol{z \cdot c = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c = H_0 \cdot r}$$ mit der **Hubble-Konstante** $\boldsymbol{H_0 = 69\ \frac{km}{s \cdot Mpc}}$

Wert und Einheit der Hubble-Konstante:

Die Wahl der **Einheit der Hubble-Konstanten** hat historische Gründe. Sie erleichtert aber auch die anschauliche Interpretation der Hubble-Konstante:

Eine **Galaxie A in der Entfernung $\boldsymbol{r = 1\ Mpc}$** hat – allein aufgrund der Expansion des Universums – eine **Fluchtgeschwindigkeit $\boldsymbol{v_A = H_0 \cdot 1\ Mpc = 69\ \frac{km}{s}}$**.

Eine **Galaxie B in der Entfernung $\boldsymbol{2\ Mpc}$** hätte eine **Fluchtgeschwindigkeit $\boldsymbol{v_B = 2 \cdot 69\ \frac{km}{s} = 138\ \frac{km}{s}}$** usw.

Hubble selbst ging von einem Wert $H_0 = 100\ \frac{km}{s \cdot Mpc}$ aus.
Mithilfe von Messdaten des Hubble Space Teleskops, des Planck-Satelliten und etlicher anderen Satellitenteleskope wurde der Wert der Hubble-Konstante immer wieder angepasst.
Der aktuell anerkannte Wert der Hubble-Konstanten ist $H_0 = 69\ \frac{km}{s \cdot Mpc}$.

Das Hubble-Gesetz für ein <u>gleichmäßig expandierendes</u> Universum:

Hubble ging von einer **gleichmäßigen Expansion des Universums** aus.

Das heißt:

- In einer festen Entfernung r hat das Universum überall die gleiche **Expansionsgeschwindigkeit $\boldsymbol{v_{exp}(r)}$**.
- Diese Expansionsgeschwindigkeit ist die **Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien** in der Entfernung r, die man über die Rotverschiebung z misst.
- Die **Hubble-Konstante $\boldsymbol{H_0}$** ist die **Expansionsrate des Universums**.

Das **Hubble-Gesetz für ein gleichmäßig expandierendes Universum** lautet somit:

Die kosmologische Rotverschiebung leuchtender Objekte im Universum nimmt bei einer konstanten Expansionsrate $\boldsymbol{H_0}$ des Universums gleichmäßig mit der Entfernung zu.

Für die **Expansionsgeschwindigkeit $\boldsymbol{v_{exp}(r)}$ des Universums in der Entfernung $\boldsymbol{r}$** heißt das:

$$\boxed{\boldsymbol{v_{exp}(r) = z \cdot c = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c = H_0 \cdot r}}$$

Das Hubble-Gesetz für ein <u>beschleunigt expandierendes</u> Universum:

Anhand der Rotverschiebung unterschiedlich weit entfernter Supernovae des Typs SN Ia stellte man fest, dass die Expansionsgeschwindigkeit **des Universums bis vor etwa 6 Milliarden Jahren abnahm und das Universum seit etwa 5 Milliarden Jahren beschleunigt expandiert**.

Beschleunigte Expansion bedeutet, dass die Expansionsgeschwindigkeit in einer bestimmten Entfernung mit der Zeit zunimmt. Weil wir umso weiter in die Vergangenheit blicken, je weiter ein beobachtetes Objekt entfernt ist, heißt das, dass sich eine Galaxie A mit der Fluchtgeschwindigkeit v_A, die halb so weit entfernt ist, wie eine andere Galaxie B mit der Fluchtgeschwindigkeit v_B, mit einer Geschwindigkeit $v_A > \frac{1}{2} \cdot v_B$ entfernt.

Die Fluchtgeschwindigkeiten von Galaxien werden über die Rotverschiebung der Spektren von Supernovae vom Typ SN Ia in diesen Galaxien ermittelt.

Für große Entfernungen und damit für große zeitliche Abstände der beobachteten Galaxie ändert sich der Wert der „Hubble-Konstanten" deutlich. Man spricht allgemein vom **Hubble-Parameter $\boldsymbol{H(t)}$**.

Der Hubble-Parameter $H(t)$ hängt von der Zeit seit der Entstehung des Universums bis zur Messung von $H(t)$ ab und damit von der Entfernung des kosmologischen Objekts, für das $H(t)$ bestimmt werden soll.

- Die Hubble-Konstante $\boldsymbol{H_0}$ ist der **Hubble-Parameter zum heutigen Zeitpunkt**.
- Der Hubble-Parameter $\boldsymbol{H(t)}$ **ist die Expansionsrate des Universums zum Zeitpunkt t** nach der Entstehung des Universums.

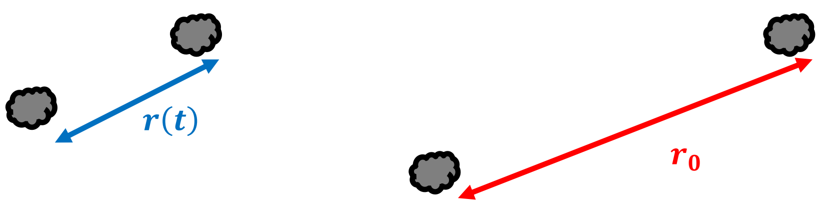
Damit erhalten wir als **zeitabhängiges Hubble-Gesetz:** $\boxed{\boldsymbol{v_{exp}(t) = z(t) \cdot c = H(t) \cdot r(t)}}$

Der kosmische Skalenfaktor $\mathcal{R}(t)$:

Wenn wir die Entfernung einer Galaxie mithilfe der kosmologischen Rotverschiebung z bestimmen, stehen wir immer vor dem Problem, dass das beobachtete Licht von der Galaxie in der Vergangenheit abgestrahlt wurde. Wir sehen die Rotverschiebung zu einem Zeitpunkt, der so weit zurückliegt, wie das Licht von der Galaxie bis zu uns brauchte. Während der Ausbreitung des Lichts entfernte sich aber die Galaxie aufgrund der Expansion des Universums. Deshalb ist die mit der Hubble-Beziehung $z \cdot c = H_0 \cdot r$ bestimmte Entfernung zu klein. Je weiter die Galaxie entfernt ist, desto größer wird der Fehler.

Wir führen für unsere Berechnungen folgende Bezeichnungen ein:

> $\boldsymbol{t}$ ist eine **beliebige Zeit seit der Entstehung des Universums**.
>
> $\boldsymbol{t_0}$ ist die Zeit, die **heute** seit der Entstehung des Universums vergangen ist.
> Weil wir, wenn wir Galaxien beobachten, immer in die Vergangenheit schauen, gilt: $t < t_0$.
>
> $\boldsymbol{r(t)}$ ist ein Abstand im Universum, z.B. der Abstand zweier Galaxien zum Zeitpunkt t.
>
> $\boldsymbol{r_0 = r(t_0)}$ ist der heutige Abstand der beiden Galaxien.



Den Zusammenhang zwischen den Abständen $r(t)$ und r_0 beschreibt der **„kosmische Skalenfaktor" $\mathcal{R}(t)$.**

Es gilt:

$$\boxed{\mathcal{R}(t) = \frac{r(t)}{r_0} = \frac{\text{Entfernung zur Zeit } t}{\text{heutige Entfernung}}}$$

Insbesondere folgt: $\boxed{r(t) = \mathcal{R}(t) \cdot r_0}$ und $\boxed{\mathcal{R}(t_0) = 1}$

Für $t < t_0$ gilt: $\mathcal{R}(t) < \mathcal{R}(t_0)$ und damit $\mathcal{R}(t) < 1$ und $\mathcal{R}(t = 0) = 0$

Der kosmische Skalenfaktor $\mathcal{R}(t)$ ist eine dimensionslose Größe, die angibt, wie ein im expandierenden Universum zum Zeitpunkt t nach der Entstehung des Universums Abstand von dieser Zeit t abhängt.

$\mathcal{R}(t)$ ist gewissermaßen die **Längeneinheit des Raums**. Die Längeneinheit wird in der Vergangenheit immer kleiner und zum Zeitpunkt des Urknalls Null.
Wenn die Längeneinheit des Raums mit der Expansion des Universums wächst, nehmen die Abstände der Galaxien ohne eine Eigenbewegung der Galaxien zu. Die Galaxien werden lediglich mit dem expandierenden Raum mitbewegt.

Zusammenhang zwischen $\mathcal{R}(t)$ und der kosmologischen Rotverschiebung z:

Auch Wellenlängen sind Abstände im Universum. Deshalb wird die Wellenlänge von Licht, das sich im expandierenden Universum ausbreitet, gedehnt (kosmologische Rotverschiebung).

Es gilt: $\boldsymbol{\lambda(t) = \mathcal{R}(t) \cdot \lambda_0}$.

Beachte:

- $\lambda(t)$ ist hier die ungedehnte Wellenlänge.
- $\lambda_0 = \lambda(t_0)$ ist die heute vom Beobachter gemessene, gedehnte Wellenlänge.

Damit gilt für die (kosmologische) Rotverschiebung z des Spektrums einer Galaxie, die wir zum Zeitpunkt t nach der Entstehung des Universums beobachten:

$$z(t) = \frac{\Delta\lambda(t)}{\lambda(t)} = \frac{\lambda_0 - \lambda(t)}{\lambda(t)} = \frac{\lambda_0 - \mathcal{R}(t) \cdot \lambda_0}{\mathcal{R}(t) \cdot \lambda_0} = \frac{1 - \mathcal{R}(t)}{\mathcal{R}(t)} \quad bzw. \quad \boxed{\boldsymbol{\mathcal{R}(t) = \frac{1}{1+z}}}$$

Rechenbeispiel:

In den letzten Jahren wurden mehrere Quasare mit Rotverschiebungen um $z = 10$ entdeckt.

Zum Zeitpunkt t, in dem eine solcher Quasar das Licht aussandte, das wir heute beobachten, hatte der Skalenfaktor den Wert $\mathcal{R}(t) = \frac{1}{11}$. Das bedeutet, dass heute aufgrund der Expansion des Universums alle Abstände 11-mal so groß sind, wie damals.

Expansionsgeschwindigkeit v_{exp} und Hubble-Parameter $H(t)$:

Für Ableitungen nach der Zeit verwenden wir im Folgenden die in der Physik üblichen Schreibweisen

$\boldsymbol{\dot{r}(t)}$ für die **erste Ableitung** des Abstandes r nach der Zeit t und

$\boldsymbol{\ddot{r}(t)}$ für die **zweite Ableitung** des Abstandes r nach der Zeit t.

Die **Expansionsgeschwindigkeit des Universums $v_{Exp}(t)$** ist die zeitliche Änderungsrate und damit die Ableitung aller Abstände im Universum zum Zeitpunkt t:

$$\boldsymbol{v_{Exp}(t)} = \dot{r}(t) = \dot{\mathcal{R}}(t) \cdot r_0 = \boldsymbol{\frac{\dot{\mathcal{R}}(t)}{\mathcal{R}(t)} \cdot r(t)}$$

Mit dem zeitabhängigen Hubble-Gesetz $\boldsymbol{v_{Exp}(t)} = z(t) \cdot c = \boldsymbol{H(t) \cdot r(t)}$ folgt: $\boxed{\boldsymbol{H(t) = \frac{\dot{\mathcal{R}}(t)}{\mathcal{R}(t)}}}$

$H(t)$ ist die zeit- und entfernungsabhängige Expansionsrate des Universums.

Mit $r(t) = \mathcal{R}(t) \cdot r_0$ folgt: $\boxed{\boldsymbol{v_{Exp}(t) = \dot{\mathcal{R}}(t) \cdot r_0}}$

Insbesondere ist $\boldsymbol{v_{Exp}(t_0)} = \dot{\mathcal{R}}(t_0) \cdot r_0 = H(t_0) \cdot \mathcal{R}(t_0) \cdot r_0 = \boldsymbol{H_0 \cdot r_0}$ die von uns gemessene **Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxie in der Entfernung r_0**.

Entfernungsbestimmung mit dem zeitunabhängigen Hubble-Gesetz:

Das zeitunabhängige Hubble-Gesetz $z \cdot c = H_0 \cdot r$ ermöglicht die Abschätzung der Entfernung von Galaxien, die so weit entfernt sind, dass eine gravitative Wechselwirkung mit der Milchstraße vernachlässigt werden kann.

Allerdings darf das Hubble-Gesetz in dieser Form nur für $z \leq 0{,}1$ also für Entfernungen bis etwa $400\ Mpc$ zur Entfernungsbestimmung angewendet werden. Für größere Entfernung muss die beschleunigte Expansion des Universums und damit die Zeit- und Entfernungsabhängigkeit des Hubble-Parameters $H(t)$ berücksichtigt werden.

Rechenbeispiel:

Das Spektrum einer Galaxie im Leo-Haufen zeigt die Rotverschiebung $z = 0{,}06$.

Entfernung:

$$r = \frac{c}{H_0} \cdot z \approx \frac{3 \cdot 10^5\ \frac{km}{s}}{69\ \frac{km}{s \cdot Mpc}} \cdot 0{,}06 \approx 261\ Mpc \approx 850 \text{ Millionen } Lj$$

Abschätzungen für Alter und Größe des Universums:

Aus dem zeitunabhängigen Hubble-Gesetz, dem eine gleichmäßige Expansion des Universums zugrunde liegt, lassen sich zwei weitere Größen ableiten, die häufig als **grobe Abschätzung für Alter und Ausdehnung des Universums** verwendet werden:

Die **Hubble-Zeit**

$$\boxed{\boldsymbol{H_T = \frac{r_0}{v_{Exp}} = \frac{r_0}{z \cdot c} = \frac{1}{H_0}}}$$

Unter der Voraussetzung einer Expansion eines leeren Universums mit konstanter Expansionsgeschwindigkeit v_{Exp} kann man die Hubble-Zeit H_T als Zeit interpretieren, die vergangen ist, seit Beobachter und beobachtetes Objekts sich am gleichen Ort befanden.

Der Kehrwert der Hubblekonstanten H_0 ist demnach eine Abschätzung für das Alter des sichtbaren Universums, das sogenannte „Weltalter“.

$$\boxed{\boldsymbol{t_0 = \frac{1}{H_0}}}$$

Weltalter

Mit $H_0 = 69\ \frac{km}{s \cdot Mpc}$ folgt*:*

$$t_0 = \frac{1}{H_0} = \frac{3{,}086 \cdot 10^{13} \cdot 10^6\ km \cdot s}{69\ km} \approx 4{,}5 \cdot 10^{17}\ s \approx 14{,}2 \cdot 10^9 a$$

Aufgrund aktueller Messdaten des Planck-Satelliten geht man momentan von einem **Weltalter von 13,8 Milliarden Jahren** aus.

Das Universum ist ca. **13,8 Milliarden Jahre alt**. Die ersten Galaxien entstanden etwa eine Milliarde Jahre nach dem Urknall. Weil das Universum sich ausdehnte, während sich das Licht, das wir heute von kosmischen Objekten sehen, ausbreitete, ist der **Ausdehnungsradius des sichtbaren Universums** tatsächlich viel größer als 13,8 Milliarden Lichtjahre. Man geht momentan von einem Ausdehnungsradius von **46,6 Milliarden Lichtjahren** aus.

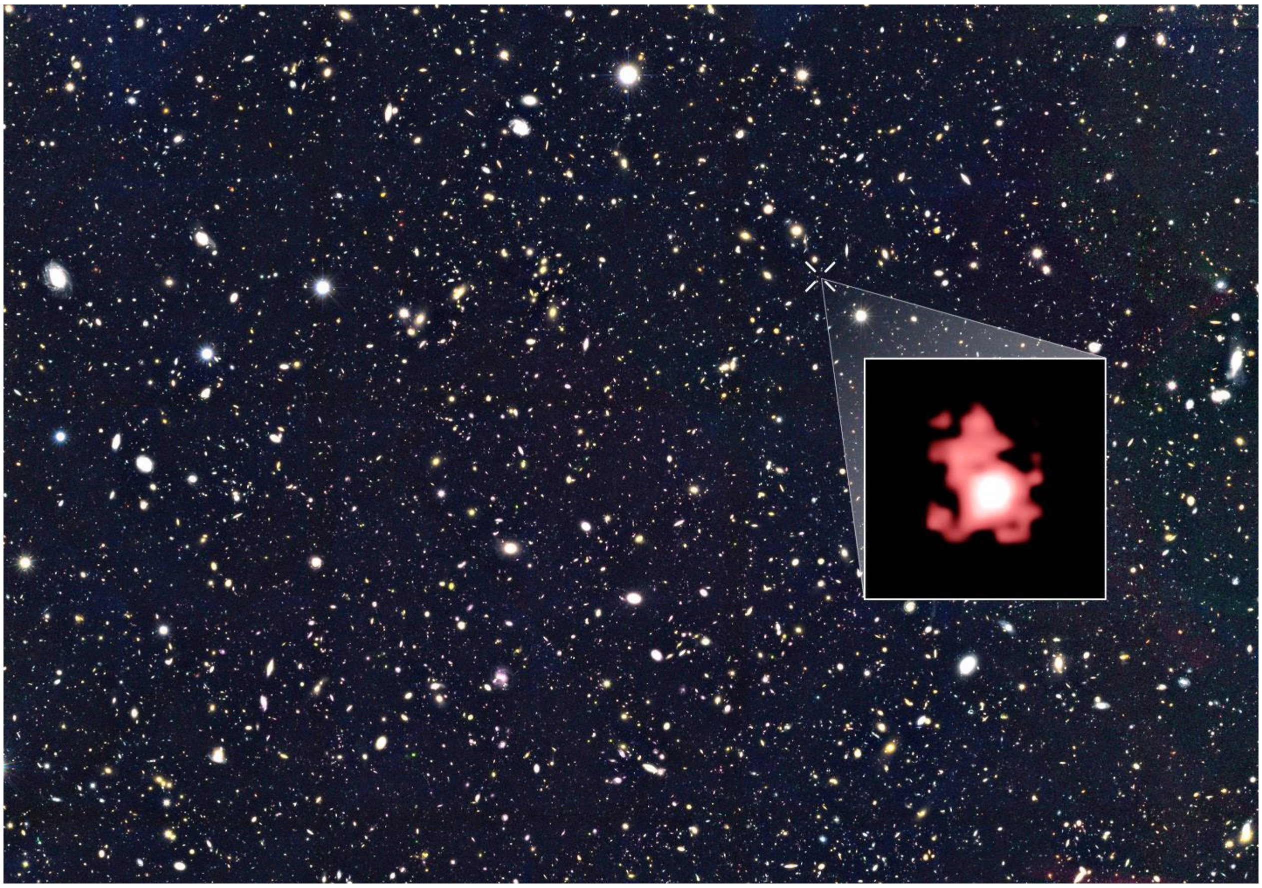
Das bedeutet insbesondere, dass Bereiche am Rand des sichtbaren Universums heute keine Informationen miteinander austauschen können, weil ihre Entfernung größer ist, als der Weg, den das Licht seit der Entstehung des Universums zurücklegen konnte.

Das Universum dehnte sich aber auch schon vor der Entstehung der ersten Sterne aus. In der sogenannten Inflationsphase möglicherweise sogar mit Überlichtgeschwindigkeit. (Vgl. Kap. VII, S. 336)

Deshalb ist der **tatsächliche Radius des Universums vermutlich noch viel größer**.

Weil wir über das sichtbare Universum nicht hinaussehen können, wissen wir praktisch nichts über das Universum jenseits des sichtbaren Universums. In der Literatur finden sich Schätzungen für die Größe des gesamten Universums, die zwischen dem 10-fachen und dem 10^{26}-fachen Radius des sichtbaren Universums liegen.

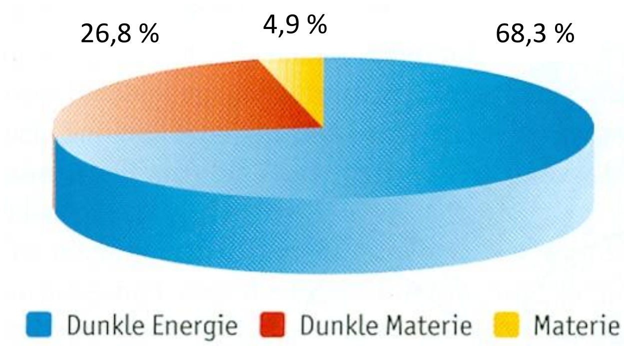
Das am weitesten entfernte beobachtete Objekt im Universum ist der **Quasar GN-z11**. Mit dem Hubble Space Telescope gelang es 2016, ein Spektrum des Quasars aufzunehmen, das sich analysieren ließ. Es ergab eine Rotverschiebung von $z = 11{,}1$. Wir sehen den Quasar im Sternbild „Großer Bär“ demnach in seinem Zustand vor 13,4 Milliarden Jahren, als das Universum erst 400 Millionen Jahre alt war. Vermutlich hat der Quasar GN-z11 einen Durchmesser von etwa 4000 Lj und enthält Sterne mit insgesamt einer Milliarde Sonnenmassen. Weil das Universum seit dem Zeitpunkt, zu dem wir den Quasar sehen, expandierte, ist GN-z11 allerdings nicht 13,4 Milliarden Lichtjahre entfernt, sondern vermutlich 32 Milliarden Lichtjahre.



7) Dunkle Materie und Dunkle Energie

Woraus besteht unser Universum?

Die sichtbaren Strukturen im Universum (Sterne, Galaxien, Galaxienhaufen) bestehen aus Materie, die aus Atomen aufgebaut ist. Nach neuesten Erkenntnissen aus Messungen des Planck-Satelliten trägt die aus Elementarteilchen aufgebaute („baryonische") Materie aber nur knapp 5 % zur Gesamtmasse des Universums bei. Man geht davon aus, dass **95% des Universums** aus sogenannter **Dunkler Materie (27 %)** und **Dunkler Energie (68 %)** bestehen.



Dunkle Materie

Dunkle Materie gibt keine elektromagnetische Strahlung ab und ist deshalb nicht sichtbar. Über die Gravitation wechselwirkt Dunkle Materie aber mit Materie und Licht. Deshalb kann man Dunkle Materie **indirekt nachweisen**:

- **Rotationskurven vieler Galaxien**,
- **Gravitationslinseneffekte** und
- **Temperaturfluktuationen in der kosmischen Hintergrundstrahlung**

weisen eindeutig auf die Existenz Dunkler Materie hin.

Dunkle Materie in Galaxien:

Die Verteilung sichtbarer Materie in einer Spiralgalaxie zeigt immer eine sehr starke Zunahme der Massendichte zum Zentrum der Galaxie hin. Dies legt es nahe, die Bewegung von Sternen einer Galaxie in einem größeren Abstand vom galaktischen Zentrum als Kreisbewegung um einen Massenmittelpunkt, der die Masse der Galaxie enthält, zu betrachten. (Vgl. S. 297)

Aus dem Ansatz „Gravitationskraft = Zentripetalkraft" bzw. $G \cdot \frac{m_\odot \cdot M}{r^2} = m_\odot \cdot \frac{v^2}{r}$ folgt für die Bahngeschwindigkeit eines Sterns mit der Entfernung r vom galaktischen Zentrum:

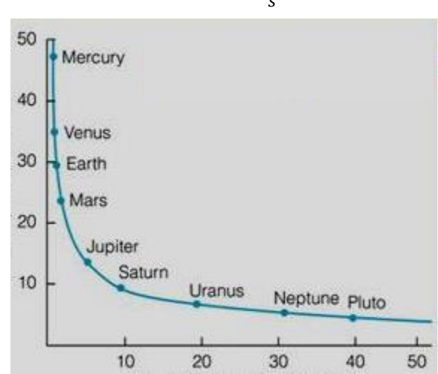
$$\boldsymbol{v = \sqrt{G \cdot M} \cdot \frac{1}{\sqrt{r}} = \textbf{konst.} \cdot \frac{1}{\sqrt{r}}}$$

Die Bahngeschwindigkeiten der Sterne einer Galaxie sollten also mit zunehmendem Abstand vom Zentrum der Galaxie wie die Funktion $\boldsymbol{\frac{1}{\sqrt{r}}}$ abnehmen.

Die **Bahngeschwindigkeiten der Planeten** auf ihren Umlaufbahnen um die Sonne erfüllen diesen Zusammenhang sehr gut. Davon kann man sich überzeugen, indem man die in der Formelsammlung angegebenen Daten von Sonne und Planeten (Sonnenmasse $M_\odot$, Bahnradien r und Umlaufzeiten T der Planeten) in die Formeln

$v = \sqrt{G \cdot M_\odot} \cdot \frac{1}{\sqrt{r}}$ und $v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$ einsetzt.

Bahngeschwindigkeit v in $\frac{km}{s}$



Entfernung r von der Sonne in AE

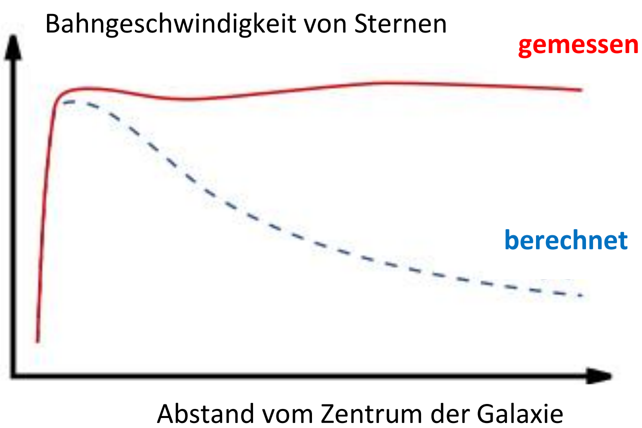
Die **Rotationskurve** einer Galaxie ist ein r-v-**Diagramm**. Die Rotationskurve beschreibt die Bahngeschwindigkeiten der Sterne einer Galaxie in unterschiedlichen Abständen vom Zentrum der Galaxie.

Die Bahngeschwindigkeiten von Sternen einer Galaxie lassen sich mithilfe der Dopplerverschiebung der Spektrallinien in Sternspektren bestimmen (vgl. Kapitel V, S. 212ff).

Von Sternen im Zentralbereich der Milchstraße lassen sich keine Spektren analysieren, weil diese Sterne durch Gas und Staub verdeckt werden. Die mit Radioteleskopen beobachtbare **21cm-Linie des mit den Sternen mitbewegten atomaren Wasserstoffs** (vgl. Kap. II, S. 65) durchdringt jedoch Gas und Staub. Ihre Dopplerverschiebung gibt Aufschluss über die Rotationsgeschwindigkeiten im Zentralbereich der Milchstraße.

In ein gemeinsames Koordinatensystem sind zwei Rotationskurven eingetragen: Die blaue Rotationskurve zeigt die erwarteten $\frac{1}{\sqrt{r}}$-Abhängigkeit.

Bei vielen Spiralgalaxien liefern Geschwindigkeitsmessungen aber Rotationskurven, die eher dem roten Graphen entsprechen. Diese gemessenen Rotationskurven zeigen einen ganz anderen Verlauf als den erwarteten:



Anstatt für zunehmende Entfernungen r nach $1/\sqrt{r}$ abzufallen, bleiben die Bahngeschwindigkeiten von Sternen in der Galaxie nach außen hin etwa gleich!

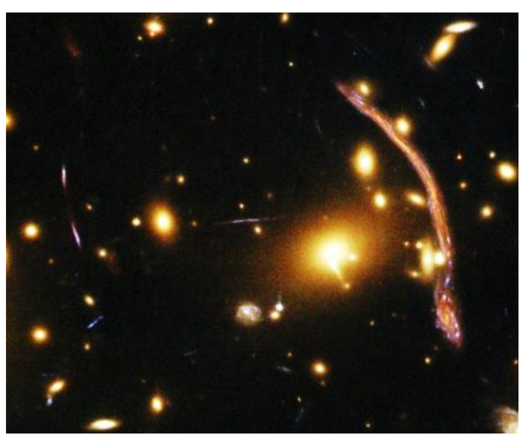
Die Bahngeschwindigkeiten der Sterne im Außenbereich der Galaxien sind also „zu schnell". Ohne zusätzliche Zentripetalkraft müssten die äußeren Sterne ins Universum wegfliegen. Die Galaxien würden sich auflösen.
Um die nötige Zentripetalkraft durch zusätzliche Gravitationskraft bereitzustellen muss die Galaxie außer der sichtbaren noch in erheblichem Maß nicht sichtbare Materie enthalten; und zwar auch in den äußeren Bereichen. Die Masse dieser unsichtbaren Materie macht je nach Galaxie bis zu 80% der Gesamtmasse der Galaxie aus!

Man geht davon aus, dass ein Großteil der Galaxienmasse auf **Dunkle Materie** zurückzuführen ist.

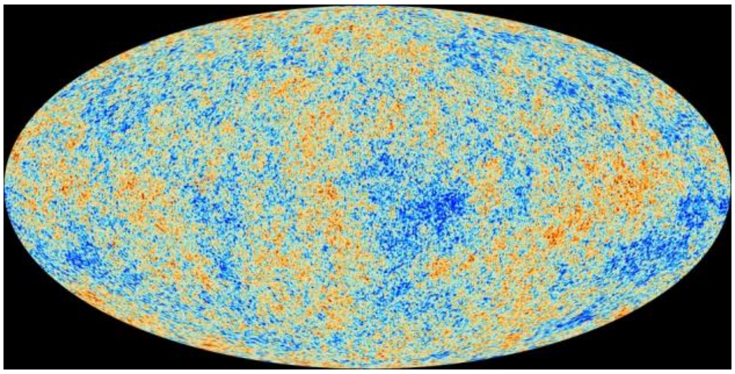
Gravitationslinseneffekte:

Galaxienhaufen enthalten große Mengen Dunkler Materie. Aufgrund ihrer hohen Masse wirken Galaxienhaufen als Gravitationslinsen. Aus dem Krümmungsradius des virtuellen Bildes von hinter der Linse sehenden Objekten kann man die Gesamtmasse des Galaxienhaufens und damit auch den Anteil der Dunklen Materie an seiner Masse bestimmen. (Vgl. Kap. VIII, S. 447)

In der Aufnahme rechts bildet der Galaxienhaufen **Abell 370** eine Gravitationslinse. Man erkennt mehrere zu Bögen verzerrte Hintergrundgalaxien und einen riesigen Bogen, der von zwei verzerrten Bildern einer Galaxie hinter Abell 370 gebildet wird.



Temperaturfluktuationen in der kosmischen Hintergrundstrahlung:



Sichtbare Materie erzeugt Strukturen im Universum die Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung im mK-Bereich erwarten ließen. Tatsächlich wurden von den Mikrowellensatelliten COBE, WMAP und Planck wesentlich kleinere Fluktuationen im μK-Bereich gemessen. Die „Himmelskarte“ des Planck-Satelliten zeigt Abweichungen im Bereich $\pm 200\,\mu K$ vom Mittelwert $2{,}725\,K$. Diese Beobachtung wird als Hinweis auf **Dunkle Materie** gewertet, die - zusammen mit der Dunklen Energie - einen Anteil von etwa 95 % an der Gesamtmasse des Universums hat. Sie beeinflusst die Strahlung nur durch ihre Gravitation und relativiert damit den Einfluss der lokal inhomogen verteilten sichtbaren bzw. baryonischen Materie.

Die Temperaturfluktuationen in der kosmischen Hintergrundstrahlung sind vermutlich auf Dichtefluktuationen der Dunklen Materie in der Frühphase des Universums zurückzuführen.

Aus den Materieverdichtungen in der Rekombinationsphase (vgl. Kap. VII, S. 342), als die kosmische Hintergrundstrahlung entstand, entwickelten sich die **heutigen kosmischen Strukturen**.

Die Temperaturverteilung der Kosmischen Hintergrundstrahlung ist aber auch ein Indikator für die **zukünftige Entwicklung des Universums**: Das „Muster“ im Mikrowellenhintergrund wird von den Beiträgen der baryonischen Materie, der Dunklen Materie und der Dunklen Energie zur Gesamtdichte des Universums bestimmt. Von der kosmischen Energie- und Materiedichte hängt es ab, ob sich das Universum in ferner Zukunft wieder zusammenzieht oder weiter ausdehnt. (Vgl. Kap. VII, S. 353).

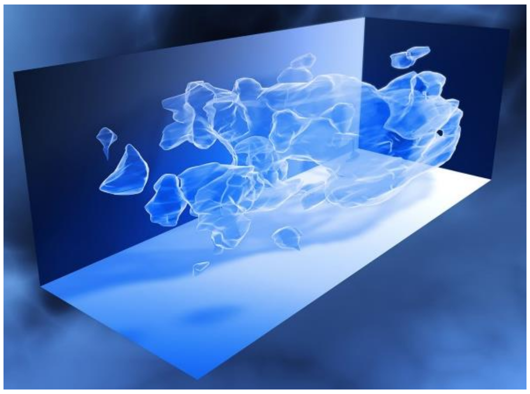
- In der **Kosmologie-Ausstellung des Deutschen Museums in München** kann man an einer interaktiven Simulation selbst ausprobieren, zu welchen Veränderungen in der Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung unterschiedliche Zusammensetzungen des Universums aus baryonischer Materie, Dunkler Materie und Dunkler Energie führen würden.
- Mit dem Applet http://wmap.gsfc.nasa.gov/resources/camb_tool/index.html kann man simulieren, welche Auswirkungen eine Änderung der Anteile von baryonischer Materie, Dunkler Materie und Dunkler Energie am Universum auf die Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung hätte.

Mit der kosmischen Hintergrundstrahlung befassen wir uns auch in Kapitel II „Licht, Spektroskopie und Teleskope“ und in Kapitel VII „Ursprung und Entwicklung des Universums“.

Hypothesen zum Wesen der Dunklen Materie:

Woraus Dunkle Materie besteht, ist noch nicht geklärt. Die Mehrzahl der Physiker vermutet, dass Dunkle Materie aus Teilchen besteht, die von der theoretischen Physik vorhergesagt, aber noch nicht nachgewiesen wurden. Kandidaten für solche Teilchen sind sehr leichte **Axionen** oder schwere **WIMPS** (**W**eakly **I**nteracting **M**assive **P**articles). Zu den WIMPS gehören auch die hypothetischen schweren **supersym-metrischen Partnerteilchen** der bekannten Teilchen, aus denen die Materie aufgebaut ist. Manche Wissenschaftler vermuten, dass **WIMPS ihre eigenen Antiteilchen** sind. Wenn WIMPS aufeinandertreffen, würden sie annihilieren. Dabei würde wegen ihrer großen Masse relativ viel Energie freigesetzt. Diese könnte von Gammateleskopen in Form von Gammablitzen oder anhand hochenergetischer Folgeteilchen von Teilchendetektoren wie AMS im Weltraum, nachgewiesen werden. (Vgl. Kap. II, S. 65 und Kap. IX, S. 561ff)

Dunkle Materie als Grundgerüst für große Strukturen im Universum:



Im Rahmen der Himmelsdurchmusterung **COSMOS** (Cosmic Evolution Survey) beobachtete das Hubble Space Telescope im „COSMOS-Feld“, einem Himmelsausschnitt, der etwa achtmal so groß wie der Vollmond ist, Gravitationslinseneffekte in massereichen Galaxienhaufen. Insgesamt 500 000 Galaxien wurden auf Gravitationslinseneffekte hin analysiert. Aus Verformungen der Galaxien kann man auf die Verteilung der Dunklen Materie, die durch ihre Gravitationswirkung das Licht der Galaxien im beobachteten Volumen des Universums ablenkt, schließen. Aus den Messdaten des HST wurde die rechts abgebildete **dreidimensionale Karte zur Verteilung der Dunklen Materie** im COSMOS-Feld erstellt.

Die Dichte der Dunklen Materie ist inhomogen im Universum verteilt. Bereiche hoher Dichte der Dunklen Materie ziehen baryonische Materie an, wodurch sich auch die baryonische Materie an diesen Stellen verdichtet. In diesen Regionen können Sterne und Galaxien entstehen.

Im Auftrag des Max-Planck-Instituts für Extraterrestrische Physik in München wurde das COSMOS-Feld auch mit dem **Röntgensatelliten XMM-Newton** durchmustert. Das Röntgenteleskop misst die Röntgenstrahlung von heißem kosmischem Gas, also von baryonischer Materie, die sich in Bereichen hoher Dichte der Dunklen Materie ansammelt. Für die baryonische Materie erhielt man eine Dichteverteilung der Dunklen Materie, die der über die Gravitationslinseneffekte mit dem HST gewonnenen Verteilung entspricht.

Die Bildung der Großstrukturen im Universum begannen mit Dichtefluktuationen der Dunklen Materie. Ohne die gravitative Wirkung der Dunklen Materie hätte insbesondere wegen des Strahlungsdrucks die Verklumpung der baryonischen Materie erst viel später stattgefunden. Die heute beobachtbaren Großstrukturen wären viel schwächer ausgeprägt.

Simulation des Einflusses der Dunklen Materie auf kosmische Strukturen:

Dunkle Materie erfüllt das gesamte Universum. Die großräumige Verteilung der Dunklen Materie erscheint homogen. Lokal weist die Dunkle Materie aber Dichteschwankungen auf, die für die Entwicklung von Strukturen im Universum grundlegend sind. Offenbar war die Dunkle Materie noch nie ganz gleichmäßig verteilt. Erste Sterne und Galaxien konnten sich im expandierenden Universum nur aufgrund von Dichtefluktuationen der Dunklen Materie bilden, weil Dunkle Materie durch ihre Gravitationskraft der Expansion des Universums entgegenwirkt. (Vgl. Kap. VII, S. 344)

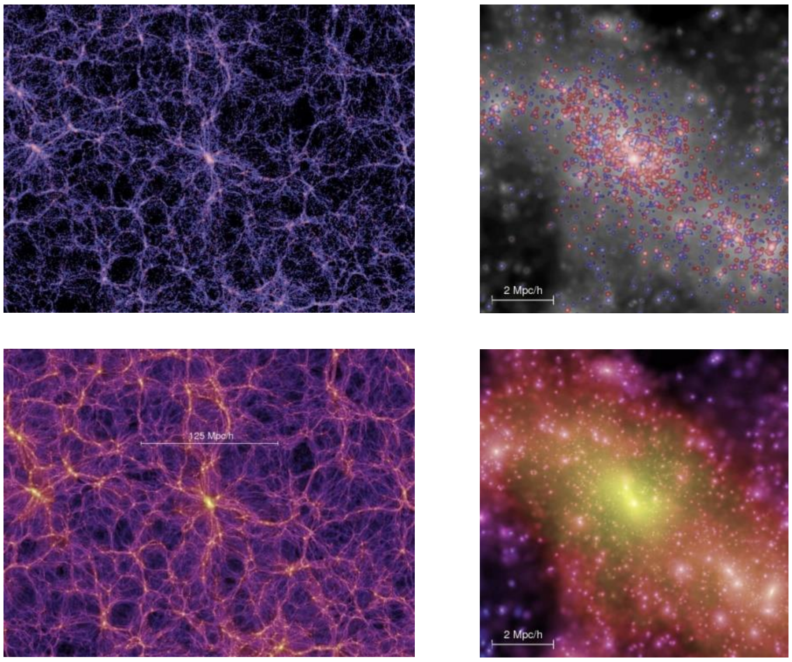
Noch heute beeinflusst die Dunkle Materie die Bewegung von Galaxien und Wechselwirkungen zwischen Galaxien wesentlich.

Unter der Federführung des Max-Planck-Instituts für Astrophysik in München wurde 2005 die sogenannte **Millennium-Simulation** programmiert. Mit Supercomputern simulierten Wissenschaftler die **Ausbildung von Strukturen im Universum auf der Grundlage von Dichtfluktuationen der Dunklen Materie**.

In einen Würfel von etwa 2 Milliarden Lichtjahren Kantenlänge wurden 10 Milliarden Teilchen gesetzt, die Galaxien entsprechen. Außerdem wurde der Würfel mit 10 Trillionen Sonnenmassen Dunkler Materie gefüllt.

Beim Start des Projekts simulierte man in der Verteilung der Dunklen Materie Dichtefluktuationen, wie sie vermutlich etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall auftraten. Das Programm berechnet die Bewegung jeder der 10 Milliarden Galaxien unter dem Einfluss der gegenseitigen Gravitationskraft, der von der Dunklen Materie ausgehenden Gravitationskraft und der Expansion des Universums. Die Millennium-Simulation gibt vermutlich die Materieverteilung im Universum sehr realistisch wieder. Es besteht die Möglichkeit, die Verteilung der leuchtenden baryonischen Materie und der Dunklen Materie getrennt zu betrachten.

Die Abbildungen zeigen Materieverteilungen jeweils für einen großen Ausschnitt aus dem Universum (links) und für einen Galaxienhaufen (rechts); oben ohne und unten mit Dunkler Materie.



Auf einem schnellen Computer kann man sich diese Simulation im Internet unter http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/presse/ ansehen.

2010 wurde die Millennium Simulation als **Millennium XXL** auf ein 216-faches Volumen mit entsprechend mehr Teilchen ausgeweitet, um die Verteilung von Galaxien und Dunkler Materie in sehr großen Dimensionen studieren zu können.

Experimente zur Erforschung der Dunklen Materie:

Zahlreiche Experimente der Teilchenphysik – unter anderem am CERN – sind darauf ausgelegt, nach noch unbekannten Elementarteilchen zu forschen und damit vielleicht etwas zum Verständnis der Dunklen Materie beizutragen.

Bei einem Besuch am **CERN** kann man unter anderem das Sonnenteleskop **CAST** besichtigen, mit dem nach **Axionen** gesucht wird.

Axionen könnten durch den sogenannten **Primakoff-Effekt** in Sternen entstehen: Photonen werden in Axionen umgewandelt, wenn sie auf Atomkerne treffen. In starken Magnetfeldern sollten sich die Axionen wieder in Photonen umwandeln. Diesen **umgekehrter Primakoff-Effekt** versucht man bei CAST zu nutzen, um Axionen zu finden.

Man geht davon aus, dass Axionen in Kernen von Sternen erzeugt werden. Deshalb richtet man bei **CAST** (CERN Axion Solar Telescope) einen starken supraleitenden Magneten, wie er auch als Ablenkmagnet im LHC verwendet wird, auf die Sonne und versucht mit einem Detektor die Photonen zu messen, in die ein Axion zerfällt.

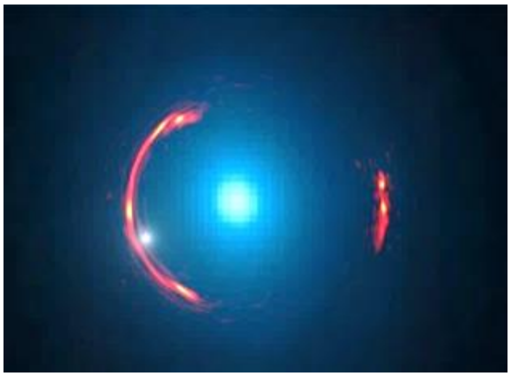
WIMPS sind schwere Teilchen, deren Masse im Bereich von Atommassen vermutet wird, die aber schwer nachweisbar sind, weil sie, wie auch Axionen, kaum mit Materie wechselwirken. Ein aktuelles Experiment zum Nachweis von WIMPS ist das am Max-Planck-Institut für Teilchenphysik in München entwickelte **CRESST**-Experiment. CRESST steht für Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers.

Beim CRESST-Experiment versucht man Rückstoßenergien zu messen, die auftreten, wenn WIPMS mit Atomkernen in würfelförmigen **Kalziumwolframatkristallen** zusammenstoßen. Die Rückstoßenergien der Atomkerne führen zu winzigen Temperaturerhöhungen im Kristall. Um diese messen zu können, dampft man auf den Kristall einen **Wolframstreifen** auf, der bei einer Temperatur von unter $0{,}012\ K$ **supraleitend** wird und kühlt den Kristall auf $0{,}012\ K$. Bei einer geringfügigen Temperaturerhöhung wird der Wolframstreifen normalleitend und sein elektrischer Widerstand erhöht sich schlagartig.

Mit Supraleitung befassen wir uns im Kapitel IX: „Grundlagen der Teilchenphysik" auf S. 536ff.

Ein Problem beim CRESST-Experiment ist, dass auch radioaktive Zerfälle in der Umgebung des Kristalls und Teilchen aus der kosmischen Strahlung zu Temperaturerhöhungen im Kristall führen. Zur **Abschirmung der kosmischen Strahlung** wird das Experiment in Italien unter dem $1500\ m$ hohen Gran-Sasso-Massiv durchgeführt. In den Kalziumwolframatkristallen erzeugen Zusammenstöße mit Atomkernen schwache Lichtblitze. Wenn Elektronen aus radioaktiven Betazerfällen mit Atomkernen in den Kalziumwolframatkristallen wechselwirken, treten ebenfalls Lichtblitze auf, die allerdings deutlich heller sein sollten als die von WIMPS verursachten Blitze. Mit Photomultipliern wird die Helligkeit der im Kristall auftretenden Lichtblitze verstärkt und gemessen. Damit lassen sich WIMP-Ereignisse von radioaktiven Effekten unterscheiden.

Am **H.E.S.S.-Teleskop** in Namibia versucht man, WIMPS indirekt nachzuweisen: Wenn ein energiereiches WIMP und sein Antiteilchen - beispielsweise ein supersymmetrisches Teilchen-Antiteilchen-Paar - aufeinandertreffen und zerstrahlen, entsteht aus deren Energie ein Paar von Gamma-Photonen. Diese hochenergetischen Photonen erzeugen in der Erdatmosphäre Teilchenschauer, die wiederum Cherenkov-Strahlung verursachen. H.E.S.S. registriert Cherenkov-Blitze in der Erdatmosphäre. (Vgl. Kap. II, S. 69)



Bei der Analyse geometrischer Unregelmäßigkeiten in einem vom Radio-Array **ALMA** beobachteten Einsteinring (Bild links), stießen Astrophysiker 2016 auf eine Zwerggalxie, die möglicherweise nur aus Dunkler Materie besteht. Ihre vermutete Position ist im Bild durch den kleinen weißen Fleck am linken Bogen markiert. Der Einsteinring wird von einer massereichen, 4 Milliarden Lj entfernten Galaxie erzeugt. Der Einsteinring stammt von einer etwa 12 Milliarden Lj entfernten Galaxie im Hintergrund. Man hofft, in Zukunft durch die Analyse von Gravitationslinseneffekten weitere Dunkle-Materie-Galaxien zu entdecken.

Das mit 305 Metern Spiegeldurchmesser größte Radio-Teleskop der Welt, das **Arecibo-Teleskop** in Puerto Rico liefert ebenfalls Beiträge bei der Suche nach Ansammlungen von Dunkler Materie im Universum.

Das auf der Internationalen Raumstation ISS installierte und vom CERN aus überwachte **AMS-Experiment** misst die Energien von Positronen aus dem Weltall. Seit 2013 veröffentlicht die AMS-Arbeitsgruppe Daten, die auf deutlich mehr kosmische Positronen mit sehr hohen Energien hinweisen, als man aus bekannten Positronen-Quellen erwarten würde. Eine Hypothese für die Herkunft dieser energiereichen Antiteilchen ist die Zerstrahlung supersymmetrischer Teilchen der Dunklen Materie. (Vgl. Kap. IX, S. 561ff)

Die **Kollisionsexperimente** am **CERN** dienen unter anderem der Produktion und dem Nachweis supersymmetrischer Teilchen. Nach der Entdeckung des Higgs-Teilchens im Jahr 2012 wäre die Bestätigung der Existenz schwerer Partner der bekannten Elementarteichen ein weiterer großartiger Erfolg.

Bisher konnte keines der als Kandidaten für die Dunkle Materie gehandelten Teilchen experimentell nachgewiesen werden. Große Hoffnungen ruhen momentan auf der zweiten, seit 2015 laufenden Betriebsphase am LHC mit einer Steigerung der Kollisionsenergie von $7\ TeV$ auf $13{,}5\ TeV$.

Die beschleunigte Expansion des Universums:

Gegen Ende der 1990er Jahre bestimmten die amerikanischen Astrophysiker **Saul Perlmutter**, **Brian Schmidt** und **Adam Riess** mithilfe von Supernovae des Typs SN Ia die Entfernungen weit entfernter Galaxien und über deren Rotverschiebung die Fluchtgeschwindigkeiten der Galaxien. Sie erkannten, dass sich die Galaxien schneller entfernten, als nach dem Hubble-Gesetz zu erwarten gewesen wäre.

Das Hubble-Gesetz geht von einer gleichmäßigen Expansion des Universums aus. (Vgl. S. 308)

Perlmutter, Schmidt und Riess schlossen aus ihren Messungen jedoch auf eine **beschleunigte Expansion des Universums**. Für diese Entdeckung erhielten sie 2011 den Nobelpreis.

In den letzten Jahren wurde die Expansion des Universums anhand der Fluchtgeschwindigkeiten von Hunderten von Galaxien in Entfernungen von 3 bis 1000 Millionen Lichtjahren sehr genau vermessen. Neueste Messungen belegen, dass sich die Wirkung der Dunklen Energie nicht erst auf sehr großen Distanzen, sondern bereits in der Umgebung der Lokalen Gruppe, das heißt, in Entfernungen von weniger als 3 Millionen Lichtjahren nachweisen lässt.

Woher die **Energie für die beschleunigte Expansion des Universums** stammt, ist eine der großen ungelösten Fragen der Kosmologie. Man nennt diese Energie deshalb „**Dunkle Energie**".

Das Wesen der Dunklen Energie ist weitgehend ungeklärt und ihre Existenz noch nicht nachgewiesen.

Die Dunkle Energie als Kosmologische Konstante:

Offensichtlich **erzeugt** die Dunkle Energie **einen antigravitativen Druck**. Die Gravitationskraft der Materie sollte dazu führen, dass das Universum sich nach und nach zusammenzieht. Die Dunkle Energie wirkt der Gravitation entgegen. Möglicherweise ist die Dunkle Energie eine Eigenschaft der Raumzeit. Während die Strahlungsdichte und die Dichte der baryonischen und Dunklen Materie mit der Ausdehnung des Universums abnehmen, scheint die **Dichte der Dunklen Energie konstant** zu sein.

Das würde bedeuten, dass durch die Ausdehnung des Raums im Laufe der Zeit immer mehr Dunkle Energie erzeugt werden muss.

Für diese Hypothese sprechen die Messungen der Temperaturfluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung durch den Planck-Satelliten:

Das Universum besteht aus Strahlung, Materie (baryonische Materie und Dunkle Materie) und Dunkler Energie. Kurz nach dem Urknall dominierte die Strahlung alle Vorgänge im jungen Universum. Mit der Expansion des Universums nahm die Dichte der Strahlung ab. Als die Dichte der Strahlung unter die Dichte der Materie gefallen war, dominierte die Materie – vor allem die Dunkle Materie – das Universum. Aus der Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung kann man schließen, dass **seit 5 bis 6 Milliarden Jahren die Dunkle Energie das Universum dominiert**.

Über die Messung von Entfernungen und Fluchtgeschwindigkeiten von Supernovae vom Typ SN I a in Galaxien kann man nachweisen, dass ebenfalls zu dieser Zeit die beschleunigte Expansion des Universums einsetzte. (Vgl. Kap. VII, S. 354)

Auf welche Weise sich Strahlung, Materie und Dunkle Energie auf die Strukturbildung im Universum auswirkten, lernen wir im Kapitel VII „Ursprung und Entwicklung des Universums".

Einstein fügte in seine Feldgleichung eine **Kosmologische Konstante** als antigravitative Wirkung ein, die ein kollabierendes Universum als Lösung verhindern sollte. Als Edwin Hubble 1929 durch seine Beobachtungsergebnisse zur Galaxienflucht die Hypothese eines expandierenden Universums von Georges Lemaître stützte, verwarf Einstein die Kosmologische Konstante. (Vgl. Kap. VIII, S. 457)

Heute halten es manche Astrophysiker für sinnvoll, wieder eine Kosmologische Konstante in die Einsteinsche Feldgleichung einzufügen: Sie soll die konstante Energiedichte der abstoßenden Dunklen Energie mathematisch beschreiben.

Auswertung der am SDSS erstellten dreidimensionalen Kartierung des Universums:

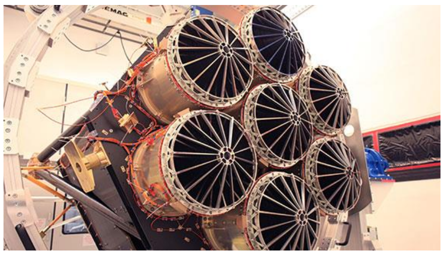
Der von 2006 bis 2012 durch Spektroskopie von 1,2 Millionen Galaxien am SDSS erstellte „**BOSS-Katalog**" (vgl. S. 305) wurde von Wissenschaftlern der Max-Planck-Institute für Astrophysik und für Extraterrestrische Physik in München ausgewertet. Die spezielle Beobachtungsmethode am SDSS ermöglichte es den Astrophysikern, die Eigengeschwindigkeiten der Galaxien zu messen. Damit kann die Mitbewegung der Galaxien bei der Expansion des Universums, für die die Dunkle Energie verantwortlich ist, getrennt von der ausschließlich durch Gravitationswechselwirkungen verursachte Eigenbewegung der Galaxien untersucht werden.

2016 wurde eine wichtige Erkenntnis zur Dunklen Energie veröffentlicht: Die Messungen stimmen innerhalb eines Fehlers von nur 5% mit der Theorie überein, die die Dunkle Energie durch eine Kosmologische Konstante beschreibt.

eROSITA – ein Teleskop zur Erforschung der Dunklen Energie:

Einen weiteren Ansatz zur Erforschung der Dunklen Energie liefern Beobachtungen zum Wachstum von Galaxienhaufen. Galaxienhaufen enthalten nicht nur sehr viele Sterne sondern auch große Mengen intergalaktischen Gases und Dunkler Materie. Aufgrund ihrer großen Masse ziehen sie Materie aus ihrer Umgebung an und wachsen so. Je älter ein Galaxienhaufen ist, das heißt, je kleiner seine Entfernung ist, desto schwerer sollte der Galaxienhaufen sein. Das Wachstum der Galaxienhaufen hängt aber sehr stark von der Zusammensetzung des Universums ab: Ein Übergang von der Dominanz des Universums durch die Materie in eine Dominanz durch die Dunkle Energie müsste an einem langsameren Wachstum der Galaxienhaufen erkennbar sein.

Am Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik in Garching wurde ein Röntgenteleskop mit dem Namen **eROSITA** (extended Roentgen Survey with an Imaging Telescope Array) entwickelt, das im Herbst 2018 an Bord des russischen Röntgen-Gamma-Satelliten SRG ins Weltall geschickt werden soll. Vom Lagrange-Punkt L2 (vgl. Kap. IV, S. 176) aus soll das Teleskop vier Jahre lang Entfernungen und Massen von bis zu 100 000 Galaxienhaufen messen. Ziel der eROSITA-Mission ist es, die Eigenschaften der Dunklen Energie zu entschlüsseln.



Im Bild links sind die sieben Röntgenteleskope von eROSITA erkennbar.

Die mithilfe von eROSITA gewonnen Daten sollen durch Messdaten vom SDSS-Observatorium ergänzt werden.

Die Hypothese von Dragan Haydukovic:

In Bereichen, wo die Naturwissenschaften an ihre Grenzen stoßen, trifft man immer wieder auf Wissenschaftler, die versuchen, andere Wege zu gehen als die Mehrheit der Physiker. Sie formulieren **alternative Hypothesen** und versuchen daraus Gesetzmäßigkeiten abzuleiten, die mit den Beobachtungen möglichst gut im Einklang stehen.

Ein solcher „Querdenker" ist der kroatische Physiker **Dragan Hajdukovic.** Er formulierte eine Hypothese zum Verständnis der Dunklen Energie bzw. eine Hypothese, die die beschleunigte Expansion des Universums ohne Dunkle Energie erklärt. Seine Überlegungen basieren auf einer bisher nicht bestätigten gravitativen Abstoßung von Materie und Antimaterie.

Die große Mehrheit der Naturwissenschaftler geht davon aus, dass Gravitation grundsätzlich anziehend wirkt und sich sowohl Teilchen und Antiteilchen aufgrund ihrer Masse gegenseitig anziehen als auch beide in einem äußeren Gravitationsfeld in dieselbe Richtung beschleunigt werden. Hajdukovic setzt dagegen in seiner Theorie voraus, dass sich zwar Teilchen und Antiteilchen aufgrund ihrer entgegengesetzten elektrischen Ladungen gegenseitig anziehen, dass aber auf ein Teilchen und ein Antiteilchen in einem äußeren Gravitationsfeld, das beispielsweise durch Galaxien erzeugt wird, Kräfte in entgegengesetzten Richtungen wirken.

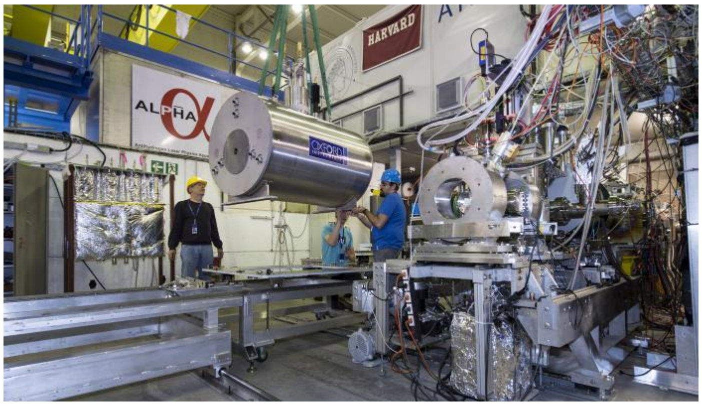
Diese Hypothese wendet Hajdukovic auf das **Quantenvakuum** an, welches überall im Universum vorliegt, wo keine Materie vorhanden ist. Das Quantenvakuum enthält zwar definitionsgemäß keine Materie und auch keine Antimaterie, aber Strahlung, aus der sich durch **Paarerzeugung** ständig **virtuelle Teilchen-Antiteilchen-Paare** bilden. Diese Teilchen-Antiteilchen-Paare annihilieren normalerweise nach kürzester Zeit.

Ausreichend starke äußere Gravitationsfelder, wie sie durch im Universum lokal inhomogen verteilte baryonische Materie erzeugt werden, würden die Teilchen-Antiteilchen-Paare auseinanderziehen. Die elektrische Anziehung zwischen Teilchen und ihren Antiteilchen wirkt diesen entgegengesetzt gerichteten Kräften auf Teilchen und Antiteilchen in äußeren Magnetfeldern wie ein Gummiband entgegen. Dadurch entstünden im Quantenvakuum **gravitative Dipole**, die **Dipolenergie** enthalten.

Ein entsprechender Effekt ist aus der Quantenelektrodynamik bekannt: In einem starken elektrischen Feld entstehen durch Paarerzeugung Elektron-Positron-Paare. Diese ziehen sich zwar aufgrund ihrer entgegengesetzten elektrischen Ladungen an, werden aber durch das äußere elektrische Feld auseinandergezogen und bilden elektrische Dipole. In einem Kondensator kommt es deshalb zu einem Stromfluss, der das Kondensatorfeld schwächt. Dieses Phänomen nennt man „**Schwinger-Mechanismus**“.

Die gravitativen Dipole richten sich in einem äußeren Gravitationsfeld alle gleich aus. Dies führt zur **Polarisation des Quantenvakuums**. Das Quantenvakuum erhält **Polarisationsenergie**.

Nach den Berechnungen von Hajdukovic reicht die durch die Dipolenergien der Teilchen-Antiteilchen-Paare im Quantenvakuum verursachte Energiedichte aus, um das Universum beschleunigt expandieren zu lassen. Damit würde eine „**Dunkle Energie**“ überflüssig bzw. sie ließe sich **als Polarisationsenergie des Quantenvakuums** verstehen.



Momentan wird in der „Antimateriefabrik“ am CERN unter anderem mit Experimenten wie **ALPHA und AEGIS** untersucht, ob sich Wasserstoffatome und Antiwasserstoffatome im Gravitationsfeld der Erde unterschiedlich verhalten. (Vgl. Kap. IX, S. 559)

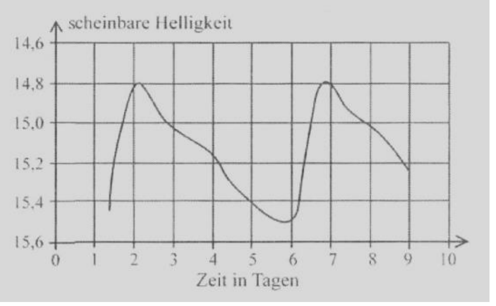
Ein Strahl von Antiwasserstoffatomen wird durch Magnetfelder auf einer waagrechten Bahn durch die Experimentierkammer gehalten. Beim Abschalten des Magnetfeldes beginnt die Messung: Die Antiwasserstoffatome fallen im Gravitationsfeld der Erde und annihilieren in der mit empfindlichen Halbleiterdetektoren ausgekleideten Kammerwand mit Wasserstoffatomen. Die Detektorschichten registrieren die dabei erzeugten Photonen.

Die entscheidende Frage ist, ob die Antiwasserstoffatome nach dem Abschalten des Magnetfeldes nach oben oder nach unten fallen!

Aufgaben zu Kapitel VI Der Aufbau des Universums:

Aufgabe 1: Cepheiden in der Großen Magellanschen Wolke (nach einer Abituraufgabe von 2013)

Die Entfernung der Großen Magellanschen Wolke kann durch Beobachtung von δ-Cepheiden bestimmt werden.



1) Ermittle mithilfe des Diagramms, das die Änderung der scheinbaren Helligkeit eines δ-Cepheiden im zeitlichen Verlauf zeigt, die mittlere absolute Helligkeit dieses Sterns und daraus seine Leuchtkraft in Vielfachen der Sonnenleuchtkraft!

2) Erläutere die Bedeutung der δ-Cepheiden für die Entfernungsbestimmung in der Astronomie!

Lösung:

zu 1) Dem Diagramm entnimmt man die Periodendauer $p = 4{,}7\ d$.

Die mittlere absolute Helligkeit berechnet man mit der Perioden-Helligkeits-Beziehung:

$$\bar{\boldsymbol{M}} = -1{,}67 - 2{,}54 \cdot \lg\left(\frac{p}{1\ d}\right) = -1{,}67 - 2{,}54 \cdot \lg 4{,}7 \approx \mathbf{-3,4}$$

Relative Leuchtkraft L^*: $M - M_\odot = -2{,}5 \cdot L^* \implies \boldsymbol{L}^* = 10^{\frac{M_\odot - M}{2{,}5}} = 10^{\frac{4{,}8-(-3{,}4)}{2{,}5}} \approx \mathbf{1,9 \cdot 10^3}$

zu 2) Die δ-Cephei-Methode eignet sich zur Entfernungsbestimmun für nahe Galaxien. δ-Cepheiden sind Standardkerzen, weil man aus der Periodenlänge ihrer Helligkeitsschwankungen auf ihre mittlere absolute Helligkeit schließen kann. Misst man zusätzlich die mittlere scheinbare Helligkeit mit einem Photowiderstand oder durch Vergleich mit Sternen bekannter scheinbarer Helligkeit, so kann man mithilfe des Entfernungsmoduls die Entfernung des δ-Cepheiden und damit der Galaxie, in der sich dieser befindet, berechnen.

Aufgabe 2: Supernovae vom Typ SN Ia als Standardkerzen

Man unterscheidet verschiedene Typen von Supernovae. Supernovae vom Typ II treten im Spätstadium massereicher Sterne auf. Supernovae vom Typ Ia können sich dagegen in Doppelsternsystemen mit einem Weißen Zwerg ereignen. Supernovae vom Typ Ia beobachtet man sowohl in nahen als auch in fernen Galaxien. Man geht davon aus, dass sie immer die gleiche maximale absolute Helligkeit besitzen.

1) Warum eignen sich Supernovae vom Typ SN Ia als Standardkerzen?

2) Erläutere, wie man die Entfernung einer Supernova vom Typ SN Ia bestimmt!

3) Welche Vorteile haben Supernovae vom Typ SN Ia für die Entfernungsmessung gegenüber den Cepheiden, die ebenfalls als Standardkerzen verwendet werden?

4) Welche Daten weit entfernter Galaxien sind zur Bestimmung der Hubblekonstanten erforderlich? Erläutere, wie man diese Daten erhält. Gehe dabei auch auf die Bedeutung von Supernovae des Typs Ia ein!

Lösung:

zu 1) Eine Besonderheit der SN Ia ist, dass alle Supernovae dieses Typs die gleiche Energie freisetzen. Dies liegt an der kritischen Masse (Chandrasekhar-Grenze), die für alle SN Ia gleich ist und an der Tatsache, dass die Leuchtkraft eines Sterns von der Masse des Sterns bestimmt wird.

Die Leuchtkraft und damit die absolute Helligkeit einer SN Ia steigen innerhalb von 20 bis 30 Tagen auf einen Wert von etwa 100 Milliarden Sonnenleuchtkräften an und fallen dann allmählich wieder ab.

SN Ia eignen sich deshalb hervorragend als Standardkerzen für die Bestimmung kosmologischer Entfernungen, weil sie eine extrem große Leuchtkraft und damit eine sehr große maximale absolute Helligkeit besitzen und diese bei allen SN Ia etwa gleich ist.

zu 2) Man misst die maximale scheinbare Helligkeit m der SN Ia.

Die absolute Helligkeit hat einen festen, für alle SN Ia gleichen Maximalwert. Dieser lässt sich (soweit er nicht bekannt ist) mithilfe des Entfernungsmoduls für eine SN Ia bestimmen, die so nah ist, dass ihre Entfernung mit einem unabhängigen Verfahren (z.B. mit der Cepheidenmethode) gemessen werden kann.
Aus m und M berechnet man nun mit dem Entfernungsmodul $m - M = 5 \cdot \lg \frac{r}{10\,pc}$ die Entfernung der beobachteten SN Ia.

zu 3) Eine SN Ia setzt wesentlich mehr Strahlungsleistung frei als ein Cepheide. Deshalb ist eine SN Ia noch in wesentlich größerer Entfernung sichtbar.

zu 4) Hubble-Konstante: $H_0 = \frac{c \cdot z}{r}$
Es müssen die Rotverschiebung z und die Entfernung r der Galaxie ermittelt werden.
Die Rotverschiebung erhält man mit der relativen Wellenlängenverschiebung einer Absorptionslinie im Spektrum der Galaxie: $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$
Zur Entfernungsbestimmung kann man, wie in **2)** erläutert, eine SN Ia in der Galaxie nutzen.

Aufgabe 3: Supernova vom Typ SN Ia in der Galaxie Centaurus A (nach einer Abituraufgabe von 2013)

Im Sternbild Centaurus befindet sich die elliptische Galaxie Centaurus A. Eine Besonderheit von Centaurus A ist das dunkle Staubband, das sich quer durch diese Galaxie zieht. Innerhalb des Staubbands konnte man im Jahr 1986 eine Supernova vom Typ Ia beobachten, die eine scheinbare Helligkeit von $m = 11{,}5$ und eine absolute Helligkeit von $M = -19{,}2$ erreichte.

1) Erläutere das Zustandekommen einer Supernova vom Typ Ia und die Bedeutung dieser Supernovae für die Entfernungsbestimmung in der Astronomie!

2) Berechne die Entfernung von Centaurus A!

3) Der in Teilaufgabe **2)** berechnete Wert stimmt nicht mit der tatsächlichen Entfernung überein. Begründe dies und erläutere, ob die tatsächliche Entfernung größer oder kleiner als der berechnete Wert ist!

Lösung:

zu 1) siehe S. 292 f.

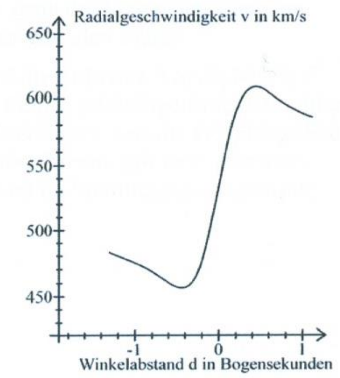
zu 2) Die Entfernung berechnet man mit dem Entfernungsmodul:

$$m - M = 5 \cdot \lg \frac{r}{10\,pc} \Longrightarrow \boldsymbol{r} = 10^{\frac{m-M}{5}} \cdot 10\,pc = 10^{\frac{11,5-(-19,2)}{5}} \cdot 10\,pc \approx \boldsymbol{14\,Mpc}$$

zu 3) Weil das Licht vom Staubband teilweise absorbiert wird, erscheint der Stern weniger Hell, als er ohne Absorption durch den Staub wäre. Deshalb ist die berechnete Entfernung zu groß.

Aufgabe 4: Die Galaxie Centaurus A (nach einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2015)

Um das Zentrum der $1{,}2 \cdot 10^7\ Lj$ entfernten Galaxie Centaurus A im Südsternbild Centaurus rotiert Wasserstoff. Bei einer spektroskopischen Untersuchung des Innenbereichs der Galaxie konnte die Radialgeschwindigkeit v dieses Gases, mit der es sich aus unserer Sicht entfernt, für verschiedene Winkelabstände d zum galaktischen Zentrum ($d = 0$) bestimmt werden. Im nebenstehenden Diagramm wir die Abhängigkeit von v und d graphisch dargestellt.



5) Die Laborwellenlänge der verwendeten Wasserstofflinie beträgt $1281{,}4\ nm$. Diese Linie ist im untersuchten Spektrum abhängig vom Winkelabstand d verschoben. Berechne die Differenz der registrierten maximalen und minimalen Wellenlänge.

6) Zeige, dass die Geschwindigkeit, mit der sich Centaurus A von uns entfernt, nicht allein auf der Expansion des Universums beruht. Erläutere hierfür einen möglichen Grund.

7) Beschreibe eine Methode, mit der die Entfernung von Centaurus A bestimmt werden kann.

Lösung:

zu 1) Dem Diagramm kann man entnehmen: $v_{max} = 610\ \frac{km}{s}$ und $v_{min} = 455\ \frac{km}{s}$

Dopplerverschiebung:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

⟹ Wellenlängenunterschied zwischen Bewegung mit größter und mit kleinster Radialgeschwindigkeit:

$$\boldsymbol{\Delta\lambda} = \frac{\Delta v}{c} \cdot \lambda_0 = \frac{610 \cdot 10^3\ \frac{m}{s} - 455 \cdot 10^3\ \frac{m}{s}}{3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}} \cdot 1281{,}4 \cdot 10^{-9}\ m \approx \boldsymbol{0{,}663\ nm}$$

zu 2)

Abschätzung der Expansionsgeschwindigkeit des Universums mit dem zeitunabhängigen Hubble-Gesetz:

$$v_{exp} = H_0 \cdot r = 69\ \frac{km}{s \cdot 10^6 \cdot 3{,}0857 \cdot 10^{13}\ km} \cdot 1{,}2 \cdot 10^7\ \cdot 9{,}4607 \cdot 10^{12}\ km \approx 254\ \frac{km}{s}$$

Radialgeschwindigkeit als mittlere Geschwindigkeit aus dem Diagramm: $\bar{v} = 550\ \frac{km}{s}$

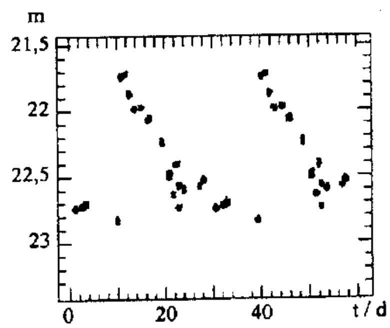
Die Radialgeschwindigkeit des Schwerpunkts der Galaxie ist deutlich höher als die Expansionsgeschwindigkeit des Universums in der Entfernung von Centaurus A. Die Eigenbewegung von Centaurus A wird vermutlich durch eine gravitative Wechselwirkung zwischen der Galaxie und anderen Großstrukturen im Universum verursacht.

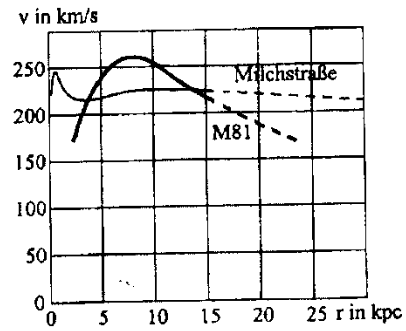
zu 3)

Zur Entfernungsbestimmung bei Galaxien geeignet sind die Cepheiden-Methode (vgl. S. 291) und die Entfernungsbestimmung mithilfe von Supernovae vom Typ SN Ia (vgl. S. 292).

<u>Aufgabe 5</u>: Die Spiralgalaxie M81 (aus einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2003)

In der Nähe des Sternbildes „Großer Wagen“ kann man mit dem Schulteleskop die Spiralgalaxie M81 beobachten. Sie hat die scheinbare Helligkeit $m = 6{,}9$.





1) Das obere Diagramm zeigt Messpunkte der Lichtkurve für den Cepheiden C27 in M81.
Im zweiten Diagramm vergleicht man zwei Galaxien: M81 und die Milchstraße. Aufgetragen sind die Umlaufgeschwindigkeiten v ihrer Sterne gegen deren Abstand r vom Zentrum (Rotationskurven).

Ab $r \approx 16\ kpc$ kann man in beiden Galaxien kaum noch optisch leuchtende Materie beobachten; hier bestimmt man Rotationsgeschwindigkeiten aus Beobachtungen im Radiobereich.

2) Umläuft ein Himmelskörper ein massives Zentrum, dann lässt sich aus seiner Bahngeschwindigkeit v und dem Radius r die Zentralmasse M bestimmen.
Zeige, dass dafür die Beziehung $M = \frac{v^2 \cdot r}{G}$ gilt.

3) Zeige exemplarisch anhand zweier ausgewählter Punkte des Diagramms, dass für die Rotationskurve von M81 ab $r = 10\ kpc$ näherungsweise $v \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$ gilt.
Was bedeutet dies für die Masseverteilung von M81?
Schätze die Masse von M81 innerhalb des Bereichs der leuchtenden Materie in Sonnenmassen ab!

4) Die Rotationskurven von M81 und der Milchstraße unterscheiden sich für große Radien deutlich. Beschreibe den Unterschied!
Welche Folgerung kann man daraus für die Masse in unserer Milchstraße ziehen?

<u>Lösung</u>:

zu 1) Dem Diagramm entnehmen wir:
Periode $p = 30\ d$, mittlere scheinbare Helligkeit $\overline{m} = \frac{22{,}85+21{,}72}{2} \approx 22{,}3$
Mit der Perioden-Helligkeits-Beziehung folgt: $\overline{M} = -1{,}67 - 2{,}54 \cdot \lg\frac{p}{1\ d} \approx -5{,}4$
Das Entfernungsmodul: $\overline{m} - \overline{M} = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\ pc}\right)$ liefert die Entfernung:

$$r = 10^{\frac{\overline{m}-\overline{M}}{5}} \cdot 10\ pc = 10^{\frac{22{,}3+5{,}4}{5}} \cdot 10\ pc \approx 3{,}467\ pc \approx 11{,}3 \cdot 10^6\ Lj$$

zu 2) Zentripetalkraft = Gravitationskraft

$$F_Z = F_G \quad \Rightarrow \quad m \cdot \frac{v^2}{r} = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \quad \Rightarrow \quad M = \frac{v^2 \cdot r}{G}$$

zu 3) Wähle $r_1 = 10\ kpc$ und $r_2 > r_1$ z.B.: $r_2 = 20\ kpc$
Der Rotationskurve entnehmen wir: $v_1 = 255\ \frac{km}{s}$, $\quad v_2 = 185\ \frac{km}{s}$
Durch Einsetzen zeigt man die Quotientengleichheit

$$\frac{v_1}{v_2} \approx 1{,}4 \approx \frac{\frac{1}{\sqrt{r_1}}}{\frac{1}{\sqrt{r_2}}} \quad \Rightarrow \quad v \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$$

Weil für M81 der Zusammenhang $v \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$ näherungsweise erfüllt ist, wird Materie, die weiter als $10\ kpc$ vom Zentrum der Galaxie entfernt ist, bei der Rotation im Wesentlichen durch die Gravitationskraft der Masse innerhalb von $10\ kpc$ beeinflusst.

Es ist also bei M81 innerhalb von $10\ kpc$ der wesentliche Teil der Galaxienmasse enthalten.

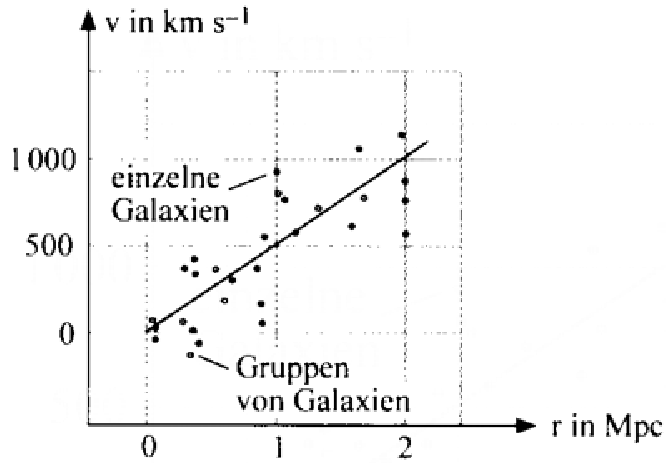
Abschätzung der Masse der Galaxie M81:

$$\boldsymbol{M_{M81}} = \frac{v^2 \cdot r}{G} = \frac{\left(210 \cdot 10^3\ \frac{m}{s}\right)^2 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 3{,}09 \cdot 10^{16}\ m}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2}} \approx 3{,}27 \cdot 10^{41}\ kg \approx \boldsymbol{1{,}6 \cdot 10^{11} \cdot m_\odot}$$

zu 4) Anders als bei M81 bleibt bei der Milchstraße die Umlaufgeschwindigkeit von leuchtender Materie für größere Abstande als $10\ kpc$ vom Zentrum etwa gleich.
Die Masse der Milchstraße ist folglich nicht im inneren Bereich der galaktischen Scheibe konzentriert, sondern es muss sich auch im Bereich der Spiralarme viel Masse befinden. Weil die Sterndichte nach außen hin aber auch bei der Milchstraße stark abnimmt, kann man den Verlauf der Rotationskurve als Hinweis auf Dunkle Materie im Bereich der Spiralarme deuten.

Aufgabe 6: Historische Hubble-Konstante (nach einer Abituraufgabe aus dem Jahr 1996)

1929 veröffentlichte Hubble das untenstehende Diagramm. Er nahm eine lineare Abhängigkeit an, obwohl diese kaum erkennbar ist.



1) Ermittle aus dem Diagramm den damaligen Wert der Hubblekonstanten! Schätze damit eine Obergrenze für das Weltalter ab! Von welcher Voraussetzung muss man dabei ausgehen?

2) Erkenntnisse, die nicht aus der Hubble-Beziehung gewonnen wurden, deuten darauf hin, dass der Wert für das Weltalter tatsächlich größer ist als der von Hubble bestimmte Wert. Nenne eine solche Erkenntnis, und gib an, worauf sie sich gründet!

Lösung:

zu 1) Aus dem Diagramm liest man ab $\Delta v = 1000\ \frac{km}{s}$ und $\Delta r = 2\ Mpc$.

Daraus ergibt sich unter der Annahme einer konstanten Expansionsgeschwindigkeit v und mit $v = z \cdot c$ (vgl. Hinweise auf S. 308!):

$$\boldsymbol{H_0} = \frac{z \cdot c}{r} = \frac{\Delta v}{\Delta r} = \frac{1000\ \frac{km}{s}}{2\ Mpc} = \boldsymbol{500\ \frac{km}{s \cdot Mpc}}$$

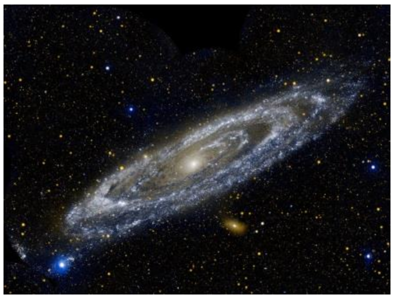
Abschätzung für die Obergrenze des Weltalters:

$$\boldsymbol{t_0} = \frac{1}{H_0} = \frac{1}{500\ \frac{km}{s \cdot Mpc}} \approx \boldsymbol{1{,}9 \cdot 10^9\ a}$$

zu 2) Das größere Weltalter folgt zum Beispiel aus Messdaten des Planck-Satelliten, des Hubble-Teleskops und aus Entfernungsmessungen mithilfe von Supernovae des Typs SN Ia.

Diese Erkenntnisse führten zu einem aktuellen Wert der Hubblekonstanten von $69\ \frac{km}{s \cdot Mpc}$ und zu einem entsprechenden Weltalter von $3{,}8 \cdot 10^9\ a$.

<u>Aufgabe 7</u>: **Andromeda-Galaxie (nach einer Abituraufgabe aus dem Jahr 2003)**



Die Andromeda-Galaxie ist eine Spiralgalaxie, die der Milchstraße ähnlich ist. Für die folgenden Überlegungen soll von einer kreisförmigen galaktischen Scheibe ausgegangen werden. Zusätzlich darf stark vereinfachend angenommen werden, dass die Blickrichtung zur Andromeda-Galaxie in der Scheibenebene liegt und dass die Erde relativ zum Zentrum der Milchstraße ruht.

Die Helligkeitsschwankungen eines bestimmten δ-Cephei-Sterns in der Andromeda-Galaxie besitzen eine Periodendauer von 39 Tagen. Die mittlere scheinbare Helligkeit des Sterns hat den Wert 18,7.

1) Ermittle die Entfernung r der Andromeda-Galaxie von unserem Sonnensystem in Lichtjahren!

Die Laborwellenlänge der H_α-Linie von Wasserstoff beträgt $656{,}47\ nm$. Für denjenigen Rand der Andromeda Galaxie, der sich aufgrund der Scheibenrotation auf die Erde zu bewegt, ermittelt man für die H_α-Linie eine Wellenlänge von $655{,}68\ nm$. Für den anderen Rand, der sich von der Erde weg bewegt, ergeben sich $656{,}65\ nm$.

2) Untersuche, ob sich die Andromeda-Galaxie insgesamt auf die Milchstraße zu oder von ihr weg bewegt! Berechne den Geschwindigkeitsbetrag v dieser Gesamtbewegung!

Ein Stern X im Randbereich der Andromeda-Galaxie ist $1{,}1 \cdot 10^5 Lj$ vom Zentrum der Galaxie entfernt.

3) Zeige, dass der Stern X für einen vollen Umlauf um das Zentrum der Galaxie auf einer kreisförmigen Bahn $9{,}4 \cdot 10^8$ Jahre braucht!

4) Schätze durch Rechnung die Gesamtmasse der Andromeda-Galaxie ab und gib diese in Vielfachen der Sonnenmasse an!

5) Gib an, nach welcher Gesetzmäßigkeit sich weit entfernte Galaxien relativ zur Milchstraße bewegen und begründe, warum die Andromeda-Galaxie ein anderes Verhalten zeigt!

<u>Lösung</u>:

zu 1) Mit der Perioden-Helligkeits-Beziehung für Cepheiden gilt:

$$\overline{M} = -1{,}67 - 2{,}54 \cdot \lg\left(\frac{39\ d}{1\ d}\right) = -5{,}7$$

Mit dem Entfernungsmodul folgt für die Entfernung:

$$\boldsymbol{r} = \frac{\overline{m} - \overline{M}}{5} \cdot 10\ pc = \frac{18{,}7 + 5{,}7}{5} \cdot 10\ pc = \boldsymbol{2{,}5 \cdot 10^5\ Lj}$$

zu 2) Dopplereffekt mit $\Delta\lambda_1 = -0{,}79\ nm$ und $\Delta\lambda_2 = 0{,}18\ nm$:

$$v_1 = \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_0} \cdot c = \frac{-0{,}79\ nm}{656{,}47\ nm} \cdot 3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s} \approx -360\ \frac{km}{s}$$

$$v_2 = \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_0} \cdot c = \frac{0{,}18\ nm}{656{,}47\ nm} \cdot 3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s} \approx 82\ \frac{km}{s}$$

$$\Longrightarrow \quad \boldsymbol{v} = 0{,}5 \cdot (v_1 + v_2) = 0{,}5 \cdot \left(-360\ \frac{km}{s} + 82\ \frac{km}{s}\right) \approx \boldsymbol{-140\ \frac{km}{s}}$$

Die Andromeda-Galaxie bewegt sich mit $140\ \frac{km}{s}$ auf die Milchstraße zu.

zu 3) Für die Sterngeschwindigkeit v_x gilt: $v_x = v - v_1 = 220\ \frac{km}{s}$

Für die Umlaufdauer T folgt:

$$\boldsymbol{T} = \frac{2\pi r}{v_x} = \frac{2\pi \cdot 1{,}1 \cdot 10^5 \cdot 9{,}46 \cdot 10^{15}\ m}{2{,}2 \cdot 10^5\ \frac{m}{s}} \approx 2{,}97 \cdot 10^{16}\ s \approx \boldsymbol{9{,}4 \cdot 10^8\ a}$$

zu 4) Aus dem Kraftansatz „Gravitationskraft = Zentripetalkraft" folgt:

$$\boldsymbol{M_A} = \frac{r_X \cdot {v_x}^2}{G} = \frac{1{,}1 \cdot 10^5 \cdot 9{,}46 \cdot 10^{15}\ m \cdot \left(220 \cdot 10^3\ \frac{m}{s}\right)^2}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2}} \approx \boldsymbol{7{,}5 \cdot 10^{41}\ kg}$$

$$\frac{\boldsymbol{M_A}}{\boldsymbol{M_\odot}} = \frac{7{,}5 \cdot 10^{41}\ kg}{1{,}99 \cdot 10^{30}\ kg} \approx \boldsymbol{3{,}8 \cdot 10^{11}}$$

Die Sternmasse der Andromeda-Galaxie entspricht also etwa 380 Milliarden Sonnenmassen.

zu 5) Nach dem Hubble-Gesetz entfernen sich wegen der Expansion des Universums weit entfernte Galaxien. Die Andromeda-Galaxie und die Milchstraße bilden die zwei größten Galaxien der Lokalen Gruppe. Sie ziehen sich aufgrund ihrer Gravitationskräfte gegenseitig an. Deshalb bewegen sie sich aufeinander zu.

Quellen und weiterführende Literatur:

Andreas Müller: Raum und Zeit, Springer-Verlag 2013

F. Eigenmann: Experimente zum Nachweis der Teilchen Dunkler Materie

Max-Planck-Gesellschaft: 1,2 Millionen Galaxien in drei Dimensionen

www-sinexx.de Das Wissensmagazin: Dunkle Materie als Gerüst des Universums

G- Hasinger: Die Zukunft des Universums

Dragan Hajdukuvic: Dark matter, dark energy and gravitational proprieties of matter

Adalbert W. Pauldrach: Das dunkle Universum

Beckmann, Epperlein: Astronomie Grundkurs, Manz-Verlag, 1989

Reinhardt Lermer, Grundkurs Astronomie, bsv-Verlag, 1993

O. Eberhardt: Entfernungsmessung mit Supernovae

S. Putz: Das Hubble-Gesetz und kosmologische Entfernungsbestimmung

Astronomie und Raumfahrt, Erhard Friedrich Verlag:

Methoden zur Entfernungsbestimmung in der Kosmologie:

Heft 5/2012: Die Bestimmung großer kosmischer Entfernungen (S. 10 bis 16)

Heft 5/2008: Die Rotverschiebung – der Schlüssel zur modernen Kosmologie (Hubble-Gesetz) (S. 34 bis 38)

Heft 6/2009: Die Hubble-Konstante (S. 32 bis 35)

Die Milchstraße:

Heft 3_4/2011: Die Frühgeschichte der Erforschung der Milchstraße (S. 55 bis 60)

Heft 3_4/2011: Bausteine des Milchstraßensystems (S. 23 bis 28)

Heft 3_4/2011: Das Monster im Zentrum der Milchstraße (S. 6 bis 10)

Heft 3_4/2011: Unsere Galaxie und M31 auf Kollisionskurs (S. 69 bis 72)

Heft 3_4/2011: Das Milchstraßensystem als Mitglied der Lokalen Gruppe (S. 61 bis 64)

Galaxien:

Heft 6/2013: Klassifikation und Entstehung heutiger Galaxien (S. 5 bis 8)

Heft 3_4/2011: Erzeugung von Spiralmustern (Dichtewellentheorie) (S. 12 bis 14)

Heft 6/2005: Spiralarm-Dichtewellen in Galaxien (S. 38 bis 40)

Heft 1/2014: Radioastronomie in der Astrophysik (wechselwirkende Galaxien) (S. 8 bis 11)

Quasare:

Heft 1/2001: Quasare – eine permanente Herausforderung der Astronomie (S. 8 bis 11)

Heft 2/2000: Die Entschlüsselung des Quasarlichts (S. 20 bis 23)

Heft 2/2000: Die Entschlüsselung des Quasarlichts (S. 20 bis 23)

Dunkle Materie und Dunkle Energie:

Heft 4/2002: Dunkle Materie (S. 4 bis 7)

Heft 1/2017: Dem Universum ins Netz gegangen – Dunkle Materie auf ganz großen Skalen (S. 21 bis 31)

Heft 1/2017: Der Bullet-Cluster (Dunkle Materie) (S. 32 bis 34)

Heft 5/2014: Das Dunkle Universum (S. 5 bis 10)

Heft 1/2017: Magische Teilchen? Woher kommt der Begriff „Dunkle Materie“? (S. 6 bis 9)

Heft 1/2017: Dunkle Materie auf ganz großen Skalen (S. 21 bis 24 und S. 29 bis 31)

Heft 1/2017: Supernovae und die Dunkle Energie (S. 16 bis 20)

Heft 1/2014: eRosita – Auf den Spuren der Dunklen Energie (S. 8 bis 11)

Kosmos Himmelsjahr:

Kosmos Himmelsjahr 2015: Was sind Galaxie und wie entstehen sie? (S. 222 bis 231)

Kosmos Himmelsjahr 2018: Wie viele Milchstraßen gibt es? (S. 186 bis 191)

Kosmos Himmelsjahr 2016: Die Radiogalaxie Centaurus A (S. 182 bis 185)

Kosmos Himmelsjahr 2018: Der Dunklen Energie auf der Spur (S. 262 bis 267)

Kosmos-Himmelsjahr 2015: Das große Zerreißen (Dunkle Energie) (S. 262 bis 267)

Kosmos Himmelsjahr 2017: Wie leer ist das Weltraumvakuum? (S. 46 bis 54)

Faszination Forschung, Das Wissenschaftsmagazin der TU München

Ausgabe 11, Dezember 2012: Eine Brille für die dunkle Seite der Welt (CRESST-Experiment) (S. 6 bis 16)

Bild der Wissenschaft

Heft 4/2010: Weltall in Schockstarre (Dunkle Energie) (S. 42 bis 51)

Heft 10/2015: Das Yin-Yang-Universum (Dunkle Energie) (S. 38 bis 45)

Heft 4/2010: Dunkle Energie – Alles nur Illusion? (S. 52 bis 57)

Heft 7/2016 Die Fernste Galaxie (GN-z11) (S. 41)

Heft 7/2016: Dunkle Energie ganz nah (S. 48 bis 51)

Naturwissenschaften im Unterricht Physik

Heft 155 Dunkle Materie: Sein oder Schein (S. 21 bis 24)

Filme:

Robert Zimmermann: Blick in die Sterne - Die Entdeckung des Universums

Cecile Denjean: Sand- die neue Umwelt (Dunkle Materie)

Themen für Seminararbeiten und Referate:

- **Die Milchstraße – unsere Heimatgalaxie**

→ Beobachtung der Milchstraße in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen

- **Quasare**

→ Entfernungsbestimmung bei Quasaren

- **Dunkle Materie**

→ Das CRESST-Experiment

- **Dunkle Energie**

→ eROSITA – ein Satellitenteleskop auf der Suche nach der Dunklen Energie

- **Himmelsdurchmusterungen und Simulationen zu Großstrukturen im Universum**

→ Das Sloan Digital Sky Survay (SDSS)

- **Das Hubble-Gesetz**

→ Edwin Hubble: Die Bedeutung der Messung von Fluchtgeschwindigkeiten für die Entwicklung des astronomischen Weltbildes

VII. Ursprung und Entwicklung des Universums

1) Das Kosmologische Prinzip

Als **Kosmologisches Prinzip** bezeichnet man zwei Grundannahmen, auf denen die Vorstellung vom Universum aufbaut:

> **1. Homogenität**
>
> **Das Weltall sieht für einen Beobachter unabhängig von seinem <u>Standort</u> im Universum überall gleich aus.**
>
> **2. Isotropie**
>
> **Das Weltall sieht für einen Beobachter unabhängig von der <u>Beobachtungsrichtung</u> überall gleich aus.**

Folgerungen:

- **Materie und Strahlung sind im Universum gleichmäßig verteilt.**
- **Das Universum besitzt keinen Mittelpunkt. Insbesondere befinden wir uns nicht im Mittelpunkt des Universums.**
- **Es gibt im Universum keine Himmelskörper, die aufgrund ihrer räumlichen Lage eine Sonderstellung einnehmen (auch nicht die Erde!).**
- **An jedem Ort im Universum gelten die gleichen physikalischen Gesetze, sofern ihre Gültigkeitsbedingungen erfüllt sind.**

Ein Modell für ein homogenes und isotropes Universum ist das 2-dimensionale **Torusmodell**:

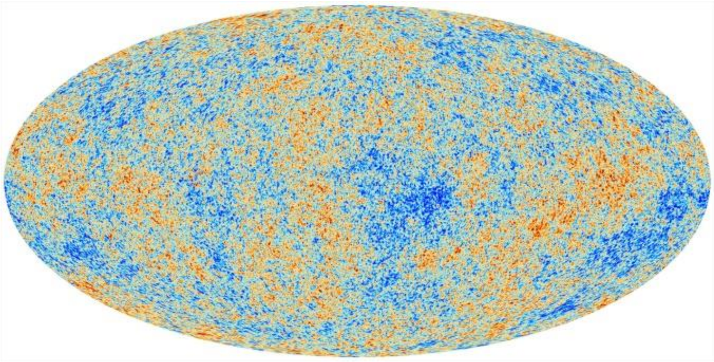
Ein Beobachter, der sich nur in einer Ebene der Torusoberfläche bewegen und Objekte nur in dieser Ebene wahrnehmen kann, sieht unabhängig von seinem Standort auf dem Torus in jeder Richtung das Gleiche.

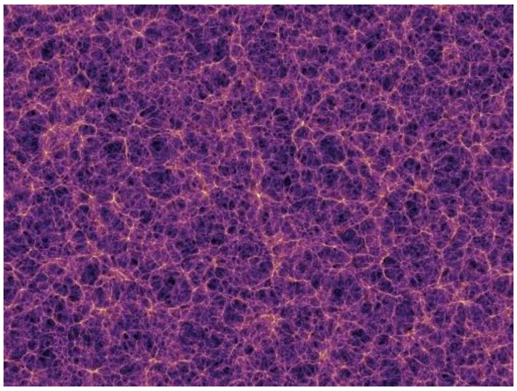
Das Kosmologische Prinzip scheint im Wiederspruch zu der in Kapitel VI behandelten Struktur des Universums zu stehen: Auf „kurzen Distanzen" ist die Materie im Universum keineswegs gleichmäßig verteilt, sondern in Sternen, Galaxien und Galaxienhaufen konzentriert. Es hängt offenbar auch von der Blickrichtung ab, was man im Universum sieht.

Damit das Universum als homogen wahrgenommen wird und in allen Richtungen gleich aussieht, muss man **große Bereiche** des Universums mit einer Ausdehnung von mindestens 100 Millionen Lichtjahren im Überblick betrachten.

Das Kosmologische Prinzip ist ein **Postulat**. Es lässt sich nicht beweisen.

Experimentell gestützt wird das Kosmologische Prinzip beispielsweise durch die nahezu perfekte **Homogenität und Isotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung.** Ebenfalls homogen erscheint die **Verteilung der Galaxien im Universum, wenn man sie unter einem großen Blickwinkel betrachtet.**





2) Urknall, Inflation und Expansion

Die Urknallhypothese:

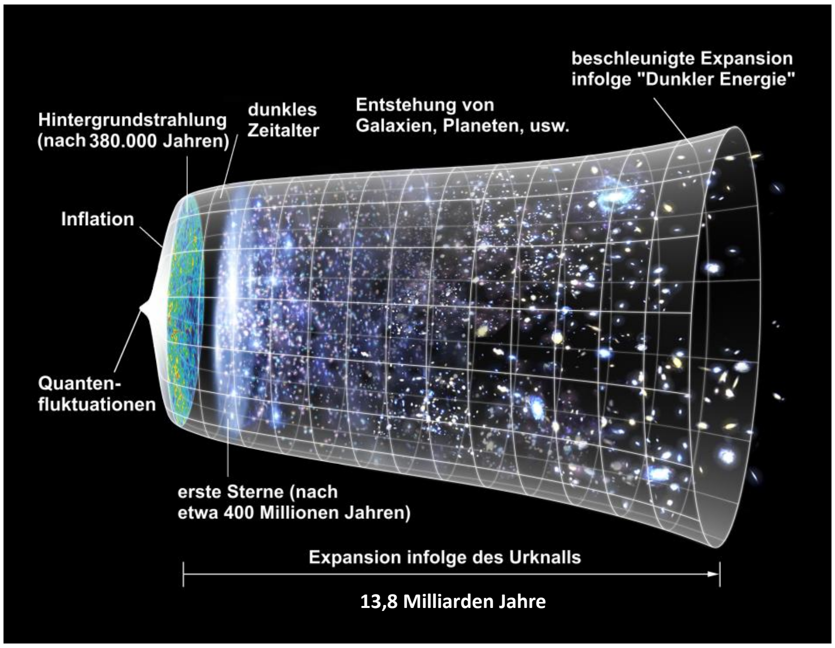
Die Annahme eines Urknalls geht auf **Georges Lemaître** zurück. **Lemaître extrapolierte die Expansion des Universums in die Vergangenheit zu kleinen Radien**. Dabei ergab sich, ähnlich wie bei einem Schwarzen Loch, eine Singularität der Raumzeit (vgl. Kap. VIII, S. 435). Die **Urknallsingularität** ist ein **unendlich heißer, unendlich dichter und unendlich kleiner Zustand**.

Lemaître schrieb: *„Wir könnten uns den Beginn des Universums in Form eines einzigen Atoms vorstellen, dessen Atomgewicht der Gesamtmasse des Universums entspricht.“* Und: *„Wenn die Welt mit einem Quantum begonnen hat, dann können die Begriffe von Raum und Zeit am Anfang überhaupt keinen Sinn haben […], dann hat sich der Anfang der Welt vor dem Anfang von Raum und Zeit ereignet.“*

Lemaître nannte diesen Zustand die „**Geburt des Universums**“. Der Begriff **„Urknall“** stammt von dem Astronomen **Fred Hoyle**, der sich 1949 in einem Radiointerview über die Vorstellung von einem Anfang des Universums lustig machte und diesen als „**Big Bang**“ bezeichnete.

Den Urknall darf man sich allerdings nicht als Explosion in einen bestehenden Raum hinein vorstellen. **Der Urknall ist** nach Lemaître **die Entstehung von Raum und Zeit.**

In der allerersten Zeit nach dem Urknall wurde das Universum durch unbeschreiblich dichte und energiereiche Strahlung dominiert. Im **heißen Quantenvakuum** entstanden aus Strahlungsenergie bei Paarerzeugungsprozessen alle heute bekannten und möglicherweise noch weitere **Elementarteilchen** und ihre Antiteilchen. Teilchen und Antiteilchen wandelten sich in Annihilationsprozessen wieder in Strahlungsenergie um. Vermutlich existierten unmittelbar nach dem Urknall bereits die **Dunkle Energie** und die Menge an **Dunkler Materie**, die auch heute noch vorhanden ist.



Das Horizontproblem:

Die Messdaten der Mikrowellensatelliten COBE, WMAP und Planck zeigen eindrucksvoll, dass die Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung unabhängig von der Blickrichtung immer den gleichen Durchschnittswert von $2{,}275\ K$ mit minimalen Schwankungen im μK-Bereich hat. Die kosmische Hintergrundstrahlung wird als „Nachleuchten des Urknalls" interpretiert. Ihre Eigenschaften entstanden demnach mit dem Urknall. Ausbreiten konnte sich die kosmische Hintergrundstrahlung aber erst etwa $380\ 000$ Jahre nach dem Urknall als das Universum in der Rekombinationsphase durchsichtig wurde. (Vgl. S. 339).

Wenn wir die kosmische Hintergrundstrahlung beobachten, blicken wir bis $380\ 000$ Jahre nach dem Urknall in die Vergangenheit zurück. So lang hat die Strahlung gebraucht, um uns zu erreichen. Das Universum war in der Rekombinationsphase etwa $3000\ K$ heiß. Aufgrund der mit der Expansion des Universums verbundenen kosmologischen Rotverschiebung (vgl. Kap. VI, S. 306) sehen wir die Hintergrundstrahlung im Mikrowellenbereich bei einer mittleren Strahlungstemperatur von nur noch $2{,}275\ K$.

Homogenität und Isotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung erscheinen aber nur plausibel, wenn zwischen allen Bereichen des Universums bis zum Zeitpunkt der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung ein Informationsaustausch über Temperatur und Temperaturfluktuationen stattfinden konnte.

Informationen können sich der Speziellen Relativitätstheorie zufolge nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Wir können uns also um jeden beliebig gewählten Bereich im damaligen Universum eine Kugel mit dem Radius $380\ 000\ Lj$ legen, den **„Horizont" für die Informationsübermittlung**.

$380\ 000$ Jahre nach dem Urknall hatte das sichtbare Universum bereits einen Radius von mehreren Millionen Lichtjahren. Der Radius $r(t)$ des sichtbaren Universums zum Zeitpunkt $t = 380\ 000$ Jahre nach dem Urknall lässt sich aus der kosmologischen Rotverschiebung z der Hintergundstrahlung mit dem zeitabhängigen Hubble-Gesetz $c \cdot z = H(t) \cdot r(t)$ berechnen (vgl. Kap. VI, S. 308):

Die kosmologische Rotverschiebung der kosmischen Hintergrundstrahlung hat den Wert $z = 1089$.

Wir schätzen den Radius $r(t)$ des sichtbaren Universums zur Entstehungszeit der kosmischen Hintergrundstrahlung mit $H(t) = H_0$ ab:

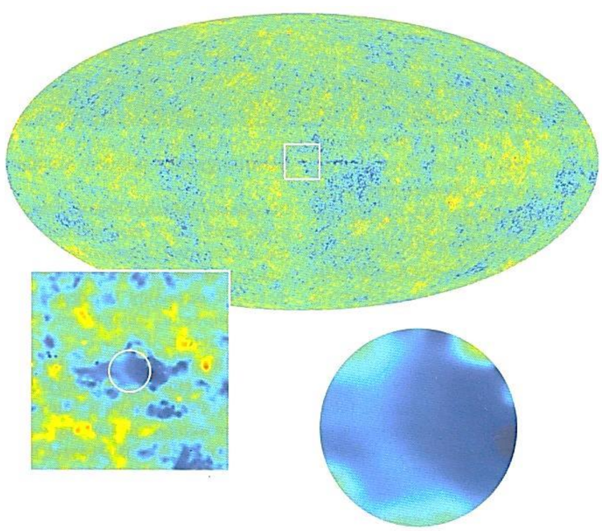
$$r(t) = \frac{c \cdot z}{H_0} = \frac{3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s} \cdot 1089}{69 \cdot \frac{km}{3{,}0857 \cdot 10^{13}\ km \cdot s}} \approx 1{,}46 \cdot 10^{23}\ m \approx 15{,}4 \cdot 10^6\ Lj$$

Berücksichtigt man, dass der Hubble-Parameter $H(t)$ zum Zeitpunkt $t = 380\ 000$ Jahre nach dem Urknall einen kleineren Wert hatte, als heute (vgl. S. 345 und Kap. VI, S. 310), so erhält man

$$r(t) \approx 22 \cdot 10^6\ Lj\ .$$

Der kreisförmige Horizont für die Informationsvermittlung um einen beliebigen Punkt am Himmel erscheint demnach zur Zeit der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung auf der Himmelskarte unter einem Winkel $\alpha = \frac{2 \cdot 380\ 000\ Lj}{2 \cdot \pi \cdot 22 \cdot 10^6\ Lj} \cdot 360° \approx 2{,}0°$. Das ist ein Fleck, der nur ungefähr 4-mal so groß wie der Vollmond ist.

In der Abbildung rechts ist in die Himmelskarte ein Quadrat eingezeichnet, das man unter dem Winkel $10°$ sehen würde. Darunter ist in den vergrößerten quadratischen Ausschnitt als Kreis ein Horizont für die Informationsübertragung eingetragen, der unter einem Winkel von $2°$ erscheint.



Wir fassen zusammen:

> Die kosmische Hintergrundstrahlung hat überall im Universum die gleiche mittlere Temperatur und weist überall die gleichen Temperaturfluktuationen auf. Bis zur Zeit der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung konnte ein Informationsaustausch zwischen zwei Teilbereichen des Universums nur stattgefunden haben, wenn diese bei der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung innerhalb einer Kugel mit dem Radius $380\,000\ Lj$ lagen. Ein solcher Horizont für die Informationsübertragung erscheint jedoch auf der Himmelskarte des damaligen sichtbaren Universums nur als ein kleiner Bruchteil der Gesamtfläche. Daraus ergibt sich ein Widerspruch, den wir „**Horizontproblem**" nennen.

Die kosmische Inflation:

Um das Horizontproblem und andere Widersprüche zwischen der Beobachtung und der Vorstellung der Entstehung des Universums mit dem Urknall in den Griff zu bekommen, wurde die sogenannte **kosmische Inflation** „erfunden": Das Universum war unmittelbar nach dem Urknall so klein, dass es noch keine Bereiche gab, die nicht miteinander im Informationsaustausch standen. Die späteren Temperatur- und Dichtefluktuationen waren dem Universum bereits am Anfang in Form von Quantenfluktuationen aufgeprägt. In einer extrem kurzen Zeit von 10^{-33} bis 10^{-30} Sekunden dehnte sich das Universum gegen seine Eigengravitation in alle Richtungen gleichmäßig mit Überlichtgeschwindigkeit um einen Faktor 10^{30} bis 10^{50} aus.

Die spezielle Relativitätstheorie erlaubt eine **Expansion des Universums mit Überlichtgeschwindigkeit**. Die Lichtgeschwindigkeit ist die obere Grenzgeschwindigkeit für Bewegungen im Raum, aber nicht für die Ausdehnung des Raumes selbst. Informationen können sich nur mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Deshalb ging während der Inflationsphase die Möglichkeit zum Informationsaustausch zwischen den Teilbereichen des Universums verloren. Alle Informationen wurden gewissermaßen „eingefroren" und waren nach der Inflationsphase in allen Teilbereichen des Universums enthalten.

Wie der **Urknall** selbst, ist die **Inflationsphase** am Beginn der Entstehung des Universums eine **Hypothese**, die nicht bewiesen werden kann.

Die kosmische Inflation begründet die Homogenität und Isotropie der kosmischen Hintergundstrahlung.

Wodurch wurde die kosmische Inflation verursacht?

Die **Ursache für die Inflation** ist vermutlich nicht die Dunkle Energie, welche für die heute beobachtete Expansion des Universums verantwortlich gemacht wird (vgl. Kap. VI, S. 321).

1981 wurde eine Theorie entwickelt, nach der die Inflation mit einem Phasenübergang eines sogenannten **Inflatonfeldes** erklärt wird. Das Inflatonfeld befand sich demnach unmittelbar nach dem Urknall in einem energetisch instabilen Zustand mit einer hohen Nullpunktsenergie, die, vielleicht aufgrund einer Quantenfluktuation, mit einer ungeheuren abstoßenden Wirkung abgegeben wurde.

- Einen ähnlichen Phasenübergang zeigt Wasser: Man kann Wasser einige Grad unter $0°C$ abkühlen, ohne dass es gefriert. Die geringste Erschütterung führt allerdings zum schlagartigen Gefrieren des Wassers, was bekanntlich mit einer Volumenzunahme verbunden ist.

Die kosmische Inflation sollte insbesondere **Gravitationswellen** angeregt haben. Der Nachweis von Gravitationswellen, die auf den Urknall bzw. auf die kosmische Inflation zurückzuführen sind, steht noch aus. Nachdem es 2015 mithilfe des LIGO-Interferometers gelang, Gravitationswellen nachzuweisen, die bei der Kollision zweier Schwarzer Löcher erzeugt wurden (vgl. Kap VIII, S. 441ff), hoffen viele Astrophysiker auf experimentelle Ergebnisse aus dem Bereich der Gravitationswellenforschung, die die Inflationshypothese stützen.

Beobachtungen, die für die Urknallhypothese sprechen:

Als Belege für die Hypothesen von Urknall und Inflation werden im Wesentlichen drei Beobachtungen gewertet:

- **Nachweis der Häufigkeiten leichter chemischer Elemente in der kosmischen Materie**

Die in kosmischer Materie (Galaxien, Sterne, Gase, …) spektroskopisch nachweisbaren Häufigkeiten von leichten chemischen Elementen wie Wasserstoff, Helium, Lithium und Beryllium stehen in guter Übereinstimmung mit den Vorhersagen der Urknallhypothese zur Entwicklung der ersten Atomkerne durch Fusionsprozesse (primordiale Nukleosynthese).

- **Beobachtung der kosmischen Hintergrundstrahlung**

Die gleichmäßig über das ganze Universum verteilte kosmische Hintergrundstrahlung wird als „Nachleuchten des Urknalls" betrachtet. Die kosmische Hintergrundstrahlung enthält Temperaturfluktuationen, die vermutlich auf Quantenfluktuationen zurückzuführen sind, die im Quantenvakuum bereits vor der Ausdehnung des Universums vorhanden waren. Homogenität und Isotropie der kosmischen Hintergundstrahlung werden mit der Inflation des Universums begründet und dienen zugleich als Bestätigung der Inflationshypothese.

- **Nachweis der Galaxienflucht über die kosmologische Rotverschiebung**

Die Fluchtbewegung von Galaxien und anderen leuchtkräftigen und weit entfernten Objekten wie Quasaren spricht für die Expansion des Universums. Urknall und Inflation werden als notwendige Initialzündung für die kosmische Expansion betrachtet.

3) Die primordiale Nukleosynthese

Die Entstehung der ersten chemischen Elemente:

Unter **primordialer Nukleosynthese** versteht man die Theorie zur **Entstehung der ersten Atomkerne** (Wasserstoff, Helium, Lithium und Beryllium) vor der Entstehung der ersten Sterne.

Die Phase der primordialen Synthese von Atomkernen **dauerte etwa von 1 Minute bis 3 Minuten nach dem Urknall**. Vor dieser Zeit gab es im Universum neben Elementarteilchen wie Quarks, Elektronen und ihren Antiteilchen Protonen und Neutronen, die aus Quarks und Gluonen, den Austauschteilchen der starken Wechselwirkung bestehen. (Vgl. Kap. IX, S. 469ff)

Protonen sind als Wasserstoffkerne bereits erste und einfachste Atomkerne.

Freie Neutronen zerfallen über β^--Zerfälle in Protonen ($^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^{\ 0}_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$). Die mittlere Lebensdauer freier Neutronen liegt bei etwa 15 Minuten.

Protonen sind etwas leichter als Neutronen. Nach der Äquivalenz von Masse und Energie entspricht der Massenunterschied Δm der Energie, die zugeführt werden muss, um ein Proton in ein Neutron umzuwandeln:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = (m_n - m_p) \cdot c^2 = E_{0,n} - E_{0,p} = 939{,}57\ MeV - 938{,}27\ MeV \approx 1{,}30\ MeV$$

Die **Umwandlung von Protonen in Neutronen** erfolgt über den **inversen Beta-Zerfall** durch den Einfang eines hochenergetischen Neutrinos:

$$^1_1p + {}^0_0\nu_e \rightarrow {}^1_0n + {}^0_1e^+$$

Protonen wandeln sich im heißen Universum nur oberhalb der Temperatur

$$T = \frac{2}{3} \cdot \frac{\Delta E}{k} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1{,}30\ \cdot 10^6 eV}{8{,}6173 \cdot 10^{-5}\ \frac{eV}{K}} \approx 10 \cdot 10^9\ K$$

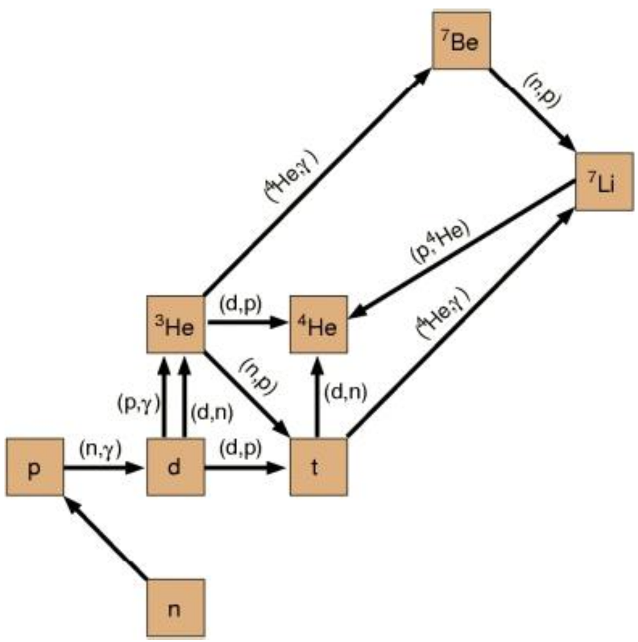
in Neutronen um. Unterhalb dieser Temperatur sind Protonen stabil.

Bis die Temperatur des Universums auf etwa 10 Milliarden Grad gefallen war, wandelten sich Protonen und Neutronen so ineinander um, dass ein **Neutronen-Protonen-Gleichgewicht** bestand.

Weil also freie Neutronen zerfallen und nicht nachgebildet werden, während Protonen nicht zerfallen, **verschiebt sich** unterhalb einer Temperatur von etwa 10 Milliarden Grad **mit sinkender Temperatur das Neutronen-Protonen-Verhältnis immer mehr zugunsten der Protonen**.

Aus mehreren Protonen und Neutronen bestehende Atomkerne bildeten sich im frühen Universum durch **Fusionsreaktionen**. Protonen und Neutronen verschmolzen zu Atomkernen. **In Atomkernen gebundene Neutronen zerfallen nicht.**
Damit Fusionsreaktionen ablaufen konnten, musste die Materiedichte hoch genug und das Universum heiß genug sein. Gleichzeitig musste aber die Temperatur des Universums soweit abgesunken sein, dass die gebildeten Atomkerne nicht durch die Strahlungsenergie sofort wieder aufgespalten wurden.

Die primordiale Nukleosynthese beginnt mit der **Bildung von Kernen der schwereren Wasserstoffisotope Deuterium** (ein Proton und ein Neutron) **und Tritium** (ein Proton und zwei Neutronen). Eine Minute nach dem Urknall hatte sich das Universum auf etwa eine Milliarde Grad abgekühlt, so dass effektiv Deuteriumkerne (d) und Tritiumkerne (t) gebildet werden konnten.

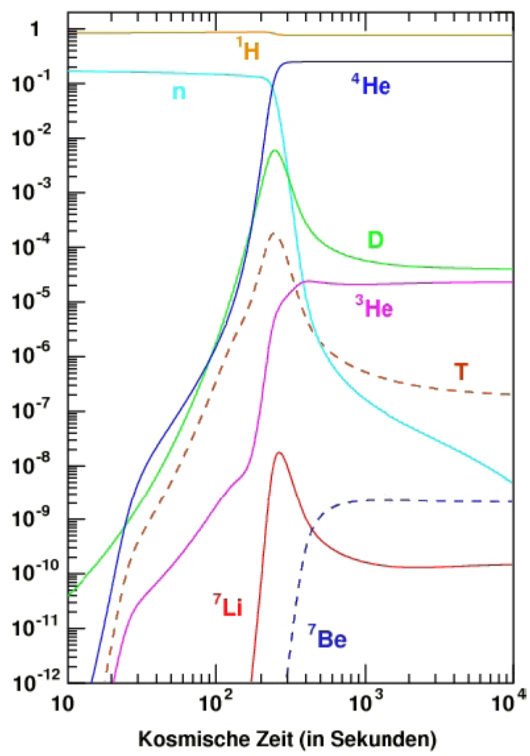


Das **Verhältnis von Neutronen zu Protonen** war bis zu diesem Zeitpunkt auf **1:7** gefallen.

Die verbleibenden Neutronen verbanden sich nun in Fusionsreaktionen zu 99,99% mit Deuterium- und Tritiumkernen zu **Heliumkernen ($\boldsymbol{He3}$ und $\boldsymbol{He4}$)**. In geringem Umfang wurden noch **Lithium-** und **Berylliumkerne** gebildet.

Die primordiale Nukleosynthese erfolgt in 12 grundlegenden Reaktionen (vgl. Bild rechts). Alle Reaktionspfeile führen zum $He4$-Kern. Damit wird verständlich, dass aus Wasserstoffkernen im Wesentlichen $He4$-Kerne und nur zu einem geringen Anteil andere Atomkerne gebildet wurden.

Die primordiale Nukleosynthese war nach etwa **3 Minuten** beendet, als die Temperatur so weit abgesunken war, dass Fusionsreaktionen nicht mehr ablaufen konnten.



Die Theorie der primordialen Nukleosynthese sagt ein **Massenverhältnis 75% Wasserstoff (Protonen) zu 25% Helium $\boldsymbol{He4}$** voraus.

Dieses Verhältnis und auch die relativen Häufigkeiten von Deuterium, ${}^3_2He$ und ${}^7_3Li$ werden noch heute mit spektroskopischen Methoden im interstellaren Gas gemessen. Das am Ende der primordialen Nukleosynthese vorhandene Tritium ${}^3_1T$ und Beryllium ${}^7_4Be$ sind radioaktiv und heute bis unter die Nachweisbarkeitsgrenze zerfallen.

Die Graphik demonstriert den zeitlichen Ablauf der primordialen Nukleosynthese und die resultierenden relativen Häufigkeiten der entstandenen leichten chemischen Elemente während eines Zeitraums von etwa 2,5 Stunden ab Beginn der primordialen Nukleosynthese. Auf den Achsen wurden logarithmischen Skalen gewählt, damit die Häufigkeiten der seltenen Elemente ${}^2_1D$, ${}^3_1T$, ${}^3_2He$, ${}^7_3Li$ und ${}^7_4Be$ überhaupt dargestellt werden können.

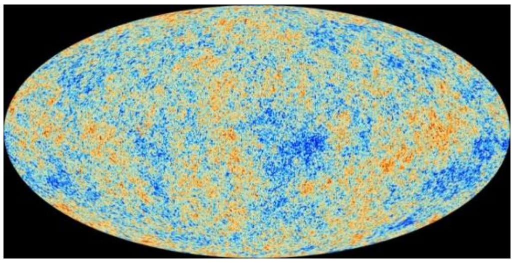
Man geht davon aus, dass die primordiale Nukleosynthese überall im Universum stattfand und praktisch überall im Universum für die gleiche chemische Zusammensetzung der Materie sorgte. Nur in vergleichsweise kleinen Bereichen wurde das Universum durch Supernovae mit schwereren chemischen Elementen angereichert.

Eine wichtige Rolle für die experimentelle Überprüfung der primordialen Nukleosynthese spielt das **Keck-Observatorium** auf Hawaii (vgl. Kap. II, S. 46).

4) Die kosmische Hintergrundstrahlung

Entstehung und Ausbreitung der kosmischen Hintergrundstrahlung:

Zu Entdeckung und Beobachtung der kosmischen Hintergrundstrahlung: Kap. II, S. 59 ff.



Die **kosmische Hintergrundstrahlung entstand**, als das Universum etwa **380 000 Jahre nach dem Urknall** durchsichtig wurde, weil die Temperatur auf etwa 3000 Grad gesunken war, so dass die freien Elektronen sich mit den Atomkernen zu Atomen verbanden (**Rekombination**).

Bis zur Rekombinationsphase bestand das Universum aus Strahlung und geladenen Teilchen (positiv geladene Atomkerne und negativ geladene Elektronen). Weil Photonen mit elektrisch geladenen Teilchen wechselwirken, konnte sich das Licht nicht ausbreiten. Man muss sich das Universum bis zur Rekombinationsphase als hellen aber undurchsichtigen Lichtnebel vorstellen. Uns ist es nicht möglich, Strahlung aus Entwicklungsphasen des Universums vor der Rekombinationsphase zu empfangen, weil das Licht sich noch nicht ausbreiten konnte.

Mit den elektrisch neutralen Atomen wechselwirkten die Photonen nicht mehr, so dass das **Licht sich ab etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall ausbreiteten konnte**.

Verdichtungen der Dunklen Materie während der Rekombinationsphase führten durch ihre Gravitationswirkung zu **geringfügigen Temperaturschwankungen** in der kosmischen Hintergrundstrahlung. Aus der Beobachtung dieser Abweichungen von der Durchschnittstemperatur der Hintergrundstrahlung lassen sich Rückschlüsse auf die **Materieverteilung im Universum 380 000 Jahre nach dem Urknall** ziehen.

Ursachen der Temperaturfluktuationen in der kosmischen Hintergrundstrahlung:

Während sich in der Rekombinationsphase Atomkerne und Elektronen zu neutralen Atomen vereinigten und die Photonen sich ausbreiten konnten, bewirkten vor allem drei Effekte **Wechselwirkungen zwischen Photonen und Materie**, die zu Rot- oder Blauverschiebungen der Photonen und damit zu Temperaturfluktuationen in der kosmischen Hintergrundstrahlung und teilweise zu Veränderungen in der Verteilung der Materiedichte führten:

- **Der Sachs-Wolfe-Effekt**:

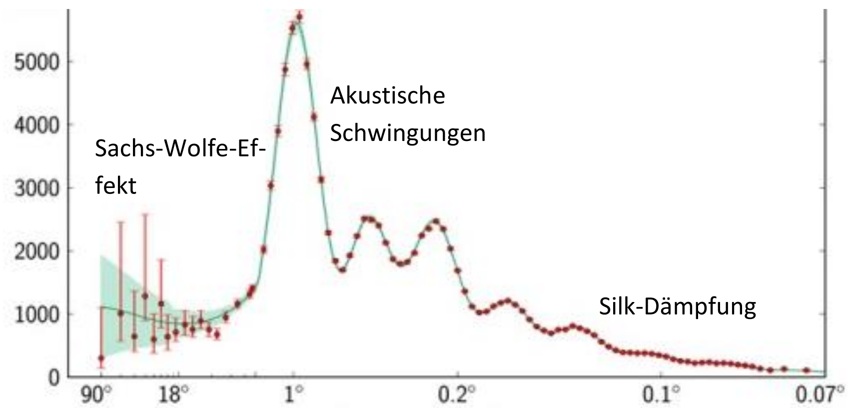
  Als die Rekombination einsetzte, gab es bereits Verdichtungen in der kosmischen Materieverteilung. Photonen, die in einem Bereich größerer Dichte frei wurden, mussten einen Teil ihrer Energie dafür aufbringen, den Bereich mit im Vergleich zur Umgebung größerer Gravitationswirkung zu verlassen. Deshalb erscheinen solche Photonen rotverschoben (Gravitationsrotverschiebung, vgl. Kap. VIII, S. 452). Sie sind im Vergleich zur mittleren Strahlungstemperatur energieärmer (kühler). Photonen, die aus Bereichen mit relativ zur Umgebung geringer Materiedichte kommen, erzielten hingegen beim Verlassen dieses Bereichs einen Energiegewinn. Diese Photonen erscheinen blauverschoben. Sie sind im Vergleich zur mittleren Strahlungstemperatur energiereicher (wärmer). Der Sachs-Wolfe-Effekt erzeugt **große Strukturen** in der Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung.

- **Akustische Schwingungen**:
  Kleine überdichte Materiewolken ziehen sich aufgrund ihrer Gravitationswirkung zusammen. Gleichzeitig erzeugt die höhere Temperatur der Materie in der Wolke einen nach außen gerichteten Druck, der bei einer Kontraktion der Wolke zunimmt. Das Wechselspiel von thermischem Druck und Gravitationsdruck führt zu Schwingungen. Weil sich diese Schwingungen wie Schallwellen als Longitudinalwellen ausbreiten, spricht man von „akustischen" Schwingungen. Aufgrund der Schwingungen der Materiewolke, aus der die Photonen stammen, erscheinen die Photonen rot- bzw. blauverschoben. Der Effekt der akustischen Schwingungen sorgt in **kleineren Bereichen** für charakteristische Minima und Maxima in der Temperaturverteilung der Kosmischen Hintergrundstrahlung.

- **Die Silk-Dämpfung**:
  Solange die Rekombination noch nicht abgeschlossen war, wechselwirkten die Photonen noch stark mit den geladenen Teilchen in einer Materiewolke. Dies führte dazu, dass kleine Materiewolken, deren Eigengravitation zu gering war, auseinandergetrieben und aufgelöst („weggedämpft") wurden. Der Effekt wurde 1968 von Josef Silk entdeckt. Dieser Effekt **löschte kleine Strukturen** in der Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung **aus**.

In einem sogenannten **Leistungsspektrum des Planck-Satelliten** sind diese drei Effekte gut erkennbar. (Bild rechts)

Nach rechts ist der Winkelausschnitt aufgetragen, in dem Temperaturfluktuationen beobachtet werden; nach oben die (zur deutlicheren Darstellung der Unterschiede quadrierten) Temperaturfluktuationen.



5) Die kosmologische Rotverschiebung:

Die Galaxienflucht:

Mit der kosmologischen Rotverschiebung, der Dehnung der Wellenlänge des Lichts aufgrund der Expansion des Universums, haben wir uns bereits in Kapitel VI, S. 306 befasst.

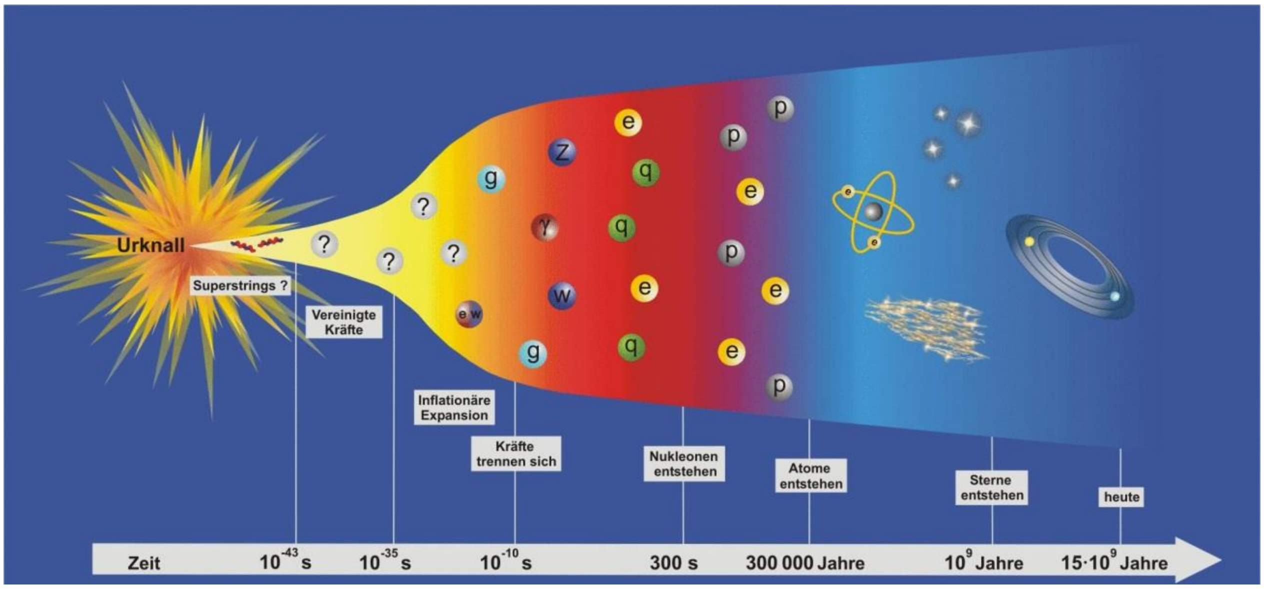
Galaxien machen die Expansionsbewegung des Universums mit. Deshalb entfernen sie sich im Lauf der Zeit voneinander. Dieser Effekt, der nicht mit einer möglichen Eigenbewegung der Galaxien verwechselt werden darf, führt zum Eindruck einer **Fluchtbewegung**, deren Geschwindigkeit über die Wellenlängenverschiebung der Spektrallinien im Spektrum der Galaxien gemessen werden kann. Diese Fluchtgeschwindigkeit ist die Expansionsgeschwindigkeit des Universums zu der Zeit, zu der man zurückblickt, wenn man die Galaxie beobachtet.
Um Expansionsgeschwindigkeiten in frühen Phasen des Universums zu bestimmen, muss man die kosmologische Rotverschiebung bei weit entfernten Objekten beobachten. Hierfür eignen sich besonders leuchtkräftige Objekte wie Supernovae und Quasare.

Der scheinbare Widerspruch des Hubble-Gesetzes zum Kosmologischen Prinzip:

Da sich alle weit entfernten Galaxien von uns weg bewegen, entsteht der Eindruck, wir befänden uns an einem besonderen Ort, nämlich in der Mitte des Universums. Dies empfindet man als **scheinbaren Widerspruch zum Kosmologischen Prinzip** (Das Universum sieht von jedem Standpunkt aus in allen Richtungen gleich aus).

Tatsächlich steht das Hubble-Gesetz nicht im Widerspruch zum Kosmologischen Prinzip, denn die Galaxienflucht wird von jedem Ort im Universum beobachtet.

6) Wichtige Phasen in der Entwicklung des Universums



In einem expandierenden Universum nehmen die Dichten von Strahlung und Materie ab. Die kosmologische Rotverschiebung führt zur Abkühlung des Universums. Welche Teilchen im Universum entstehen bzw. existieren können, hängt von der Temperatur des Universums ab. Mit der Temperatur verändern sich auch die Stärken der Wechselwirkungen zwischen den Teilchen.

Die Entwicklung der Materie im Universum ist somit an **Temperaturschwellen** geknüpft.

Die wichtigsten **Phasen der Materie- und Strukturbildung** im expandierenden Universum sollen im Folgenden dargestellt werden.

Die Phase des Quark-Gluonen-Plasmas (bis etwa 10^{-6} Sekunden nach dem Urknall):

In der **Phase des Quark-Gluon-Plasmas**, die bis etwa 10^{-6} Sekunden nach dem Urknall dauerte, entstanden durch Paarerzeugung aus energiereichen Photonen und Gluonen **freie Quarks und Antiquarks, Elektronen und Positronen**. Möglicherweise entstanden auch noch andere Elementarteilchen, die bis heute noch nicht entdeckt wurden, weil sie zu energiereich sind. Bei Zerfällen von Quarks entstanden **Neutrinos**. Leptonen und Quarks erfüllten während dieser ersten Phase zusammen mit **Gluonen** und **W- und Z-Bosonen** als freie Teilchen das Universum. Gluonen sind die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung zwischen den Quarks. W- und Z-Bosonen sind die Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung, die für Teilchenzerfälle verantwortlich ist. (Vgl. Kap. IX, S. 504)

Energie und Dichte der Photonen waren in diesem Entwicklungsstadium des Universums noch so hoch, dass sich keine Teilchen dauerhaft zu komplexeren Gebilden wie Hadronen oder Atomkernen zusammenschließen konnten. Entsprechende Verbindungen wurden von den energiereichen Photonen sofort wieder aufgespalten.

Die Hadronisierungsphase (10^{-6} bis 10^{-4} Sekunden nach dem Urknall):

Nach etwa 10^{-6} Sekunden war das Universum so weit abgekühlt, dass die Photonenenergie zur spontanen Erzeugung von Quark-Antiquark-Paaren durch Paarerzeugungsprozesse bei Kollisionen energiereicher Photonen nicht mehr ausreichte. Die leichteren Elektron-Positron-Paare wurden weiterhin gebildet.

Quarks schlossen sich nun zu **Hadronen** wie **Protonen** und **Neutronen** zusammen.

Man nennt diese Zeit in der Entwicklung des Universums die **Hadronisierungsphase**. Ab jetzt traten Quarks nicht mehr als freie Teilchen auf. Das Phänomen, dass Quarks sich zu Hadronen aus zwei oder drei Quarks zusammenschließen müssen, nennt man **Confinement**. (Vgl. Kap. IX, S. 489)

Die ersten Sekunden nach dem Urknall:

Mit der Dichte des Universums nahm die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit der energiearmen Neutrinos mit anderen Teilchen ab. Die Neutrinos koppelten vom Rest der Materie ab. Sie bilden die heute noch messbare **Neutrino-Hintergrundstrahlung**. (Vgl. Kap. II, S. 70)

Als die Energie der Photonen im Universum unter die Ruheenergie eines Elektrons von $0{,}511\ MeV$ bzw. unter eine Temperatur von etwa 1 Milliarde Grad abgekühlt war, war auch die **Erzeugung von Elektronen-Positronen-Paaren durch Paarerzeugung nicht mehr möglich**.
Teilchen und Antiteilchen zerstrahlten - bis auf einen geringen Materieüberschuss von etwa einem Milliardstel der ursprünglich erzeugten Materie.

Die Phase der primordialen Nukleosynthese (1 Minute bis 3 Minuten nach dem Urknall):

Etwa 3 Minuten nach dem Urknall war die Energiedichte der Strahlung so weit gefallen, dass sich aus Neutronen und Protonen durch Fusionsreaktionen **leichte aber stabile Atomkerne** bilden konnten. Diesen Vorgang bezeichnet man als **primordiale Nukleosynthese**. Es entstanden Atomkerne der Elemente Wasserstoff, Deuterium, Helium und in geringem Maße Lithium und Beryllium. Etwa **3 Minuten nach dem Urknall** war die primordiale Nukleosynthese abgeschlossen, weil die Strahlungsenergie für die Fusionsreaktionen nicht mehr ausreichte. (Vgl. S. 338)

Die Rekombinationsphase (380 000 Jahre nach dem Urknall):

Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall war die Strahlungstemperatur mit etwa $3\ 000K$ niedrig genug, dass sich aus Atomkernen und Elektronen **elektrisch neutrale Atome** bilden konnten, mit denen die Strahlung nicht mehr wechselwirkte. Erst jetzt konnte das Licht sich ausbreiten. Die Phase, in der sich nach und nach Atome bildeten, nenn man **Rekombinationsphase**. In dieser Entwicklungsphase des Universums entstand auch die kosmische Hintergrundstrahlung. (Vgl. S. 339). Die allmähliche Anlagerung von Elektronen an die Atomkerne dauerte vermutlich etwa $40\ 000$ Jahre. Während dieser Zeit sank die Temperatur des Universums von $3\ 000\ K$ auf $200\ K$.

Etwa **500 Millionen Jahren** nach dem Urknall entstanden die **ersten Sterne**, die durch Kernfusion und am Ende ihrer Lebenszeit als Rote Riesen bzw. bei Supernovae durch s- und r-Prozesse auch die schwereren chemischen Elemente erzeugten. (Vgl. Kap. V, S. 242f)

Unser **Sonnensystem** entstand erst vor ca. 4,6 Milliarden Jahren, also mehr als **9 Milliarden Jahre** nach dem Urknall aus einer kollabierenden Gas-Staub-Wolke.

Die **Entwicklung des Menschen** setzte **vor etwa 1,6 Millionen Jahren** ein. Diese Zeit ist weniger als $1/8500$ der Zeit seit der Entstehung des Universums.

7) Probleme der Urknallhypothese:

Auch, wenn kosmologische Beobachtungen und genaue Messungen, wie sie beispielsweise mithilfe des Planck-Satelliten durchgeführt wurden, die Hypothesen von Urknall und Inflation stützen, handelt es sich doch um Hypothesen. Aus der Beobachtung von Phänomenen, die mehrere hunderttausend Jahre nach dem Beginn der Entwicklung des Universums stattfanden, auf den Urknall als „Geburt des Universums" zu schließen und eine Inflation mit Überlichtgeschwindigkeit anzunehmen, um Widersprüche zwischen Beobachtung und Urknallhypothese aus dem Weg zu schaffen, kann man als wissenschaftlich gesehen fragwürdige Vorgehensweise betrachten.

Physikalische Gesetze setzen die Existenz von Raum und Zeit voraus. Weil der Urknallhypothese zufolge die Raumzeit mit dem Urknall erst entsteht, gelten zum Zeitpunkt des Urknalls noch keine physikalischen Gesetze. Der Urknall entzieht sich also unserer Möglichkeit, ihn zu verstehen oder zu beschreiben.

In der **Allgemeinen Relativitätstheorie** ist der **Urknall eine Singularität der Raumzeit**. An einer Singularität hat die Raumzeit eine Definitionslücke. Die Allgemeine Relativitätstheorie kann über Vorgänge am Ort einer Singularität prinzipiell keine Aussagen treffen (vgl. Kap. VIII, S. 458).

Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Entwicklung des Universums nach seiner Entstehung. Sie versagt aber am Zeitpunkt des Urknalls und liefert keine Antwort auf die Frage, warum der Urknall stattfand.

Quantentheoretische Alternativen zum Urknall:

Dass man den Urknall weder begründen noch physikalisch beschreiben kann, ist eine unbefriedigende Situation. Viele Wissenschaftler arbeiten deshalb an neuen Theorien mit dem Ziel, den Beginn der beobachteten Entwicklung des Universums ohne Urknall und Inflation zu erklären.

Die **Quantentheorie** stellt an die Stelle des Urknalls das **Quantenvakuum**. Dieser Zustand der absoluten Leere ist aus der Sicht der Quantentheorie gar nicht leer. Im Quantenvakuum entstehen aus Strahlung ständig virtuelle Teilchen-Antiteilchen-Paare und verschwinden nach kürzester Zeit wieder. Diesen Vorgang und die daraus resultierenden Dichteschwankungen im Quantenvakuum bezeichnet man als „**Quantenfluktuationen**". Das Quantenvakuum ist von virtuellen Teilchen und Antiteilchen erfüllt. Aus ihnen kann nicht nur ein Universum entstehen, sondern auch die Entstehung vieler Paralleluniversen wäre denkbar. Im Ausgangszustand des Quantenvakuums kann das Universum beliebig lange verharren. Es gibt in dieser Theorie also keinen Zeitpunkt, zu dem Zeit und Raum entstanden. Zeit und Raum waren immer schon da.

Problematisch ist, dass die Quantenphysik, die das Quantenvakuum als Ausgangssituation für die Entwicklung des Universums begründet und die Allgemeine Relativitätstheorie, die die Entwicklung des Universums beschreibt, widersprüchliche Ergebnisse liefern, wenn man sie auf den Ursprung des Universums anwendet.

Gegenstand aktueller Forschung ist die Suche nach einer Theorie, die Quantenphysik und Allgemeine Relativitätstheorie vereinigt, die **Quantengravitation**. Sie könnte eine Beschreibung für den Beginn der Entwicklung des Universums liefern, die ohne Hypothesen auskommt. (Vgl. Kap. VIII, S. 458)

8) Strukturbildung im Universum

Die Rolle der Dunklen Materie bei der Strukturbildung:

Die Entstehung kosmischer Strukturen wie Galaxien und Galaxienhaufen bis hin zu großräumigen Strukturen, wie den Filamenten (vgl. Kap. VI, S. 303) beginnt mit **Dichtefluktuationen** von baryonischer - das heißt, aus Elementarteilchen aufgebauter – Materie und Dunkler Materie. Die Dunkle Materie entstand vermutlich bereits bei der Entstehung des Universums und verdichtete sich in bestimmten Bereichen (vgl. Kap. VII, S. 344). Grundsätzlich bewirkt die Gravitation, dass sich an Bereiche mit größerer Materiedichte weitere Materie anlagert. Je mehr Masse sich dabei verdichtet, desto mehr Materie „rutscht“ nach, so dass sich Bereiche hoher Dichte und hohen Drucks ausbilden, in denen schließlich die Sterne einer Galaxie entstehen können.

Ein Problem an dieser Überlegung ist aber, dass sich das Universum ständig ausdehnt, so dass das **Zusammenfallen von Materiewolken entgegen dem grundsätzlichen Auseinanderdriften der Materie** erfolgte. Dazu musste auf die Materiewolken eine Gravitationskraft wirken, die an bestimmten Stellen des Universums stärker war als die Kraft, die das Universum expandieren ließ. Die Eigengravitation der Materiewolken reichte dafür nicht aus. Man vermutet, dass die benötigte starke Gravitationswirkung von der **Dunklen Materie** ausging.

Baryonische Materie und Dunkle Materie verhalten sich beim Vorgang der Verdichtung unterschiedlich: Die geladenen Teilchen der baryonischen Materie senden, wenn sie beschleunigt werden, Strahlung aus, Dunkle Materie hingegen nicht. Bei der Verdichtung baryonischer Materie baut sich deshalb ein Strahlungsdruck auf, der dem Gravitationsdruck und damit der Verdichtung entgegenwirkt. Weil dieser Strahlungsdruck bei der Verdichtung Dunkler Materie wegfällt, kann sich in Bereichen erhöhter Materiedichte mehr Dunkle Materie ansammeln als baryonische Materie. Somit dominierte die Dunkle Materie von Anfang an die Strukturbildung.

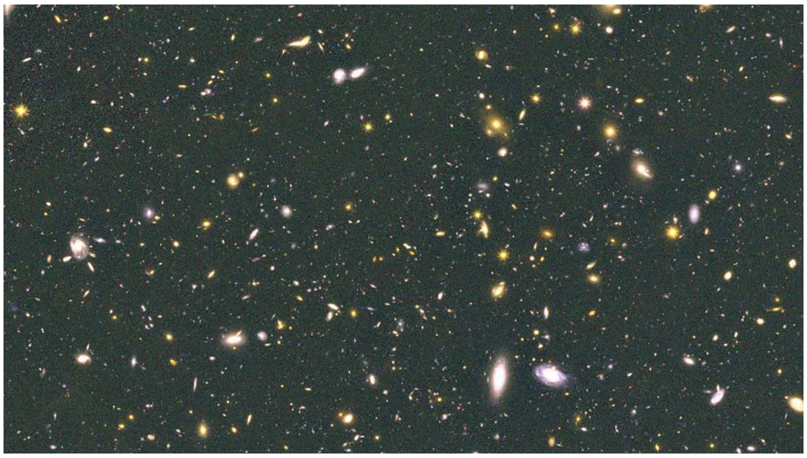
Bereiche überdichter Dunkler Materie ziehen baryonische Materie an, so dass sich die Verteilung der baryonischen Materie nach einigen Millionen Jahren an die Verteilung der Dunklen Materie angleicht. Die Dunkle Materie bildet sozusagen das Grundgerüst kosmischer Strukturen. (Vgl. Kap. VI, S. 317)

Simulationen und Beobachtungen zur Strukturbildung im Universum:

Mit speziell für **Himmelsdurchmusterungen** konstruierten Großteleskopen wie **SDSS** (vgl. Kap. VI, S. 304) werden teilweise weit entfernte Galaxien und Quasare in großer Zahl analysiert.

CANDELS (Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey) ist die bisher aufwändigste Himmelsdurchmusterung, die mit dem Hubble Space Telescope durchgeführt wurde. An diesem Projekt sind 100 Astrophysiker aus 12 Ländern beteiligt. Von 2010 bis 2013 wurden unterschiedliche Himmelsregionen insgesamt vier Monate lang belichtet.

Das Bild rechts zeigt ein für CANDELS vom HST aufgenommenes Deep Field. Die kleinsten Punkte sind Galaxien, deren Licht 12 bis 13 Milliarden Jahre unterwegs war.

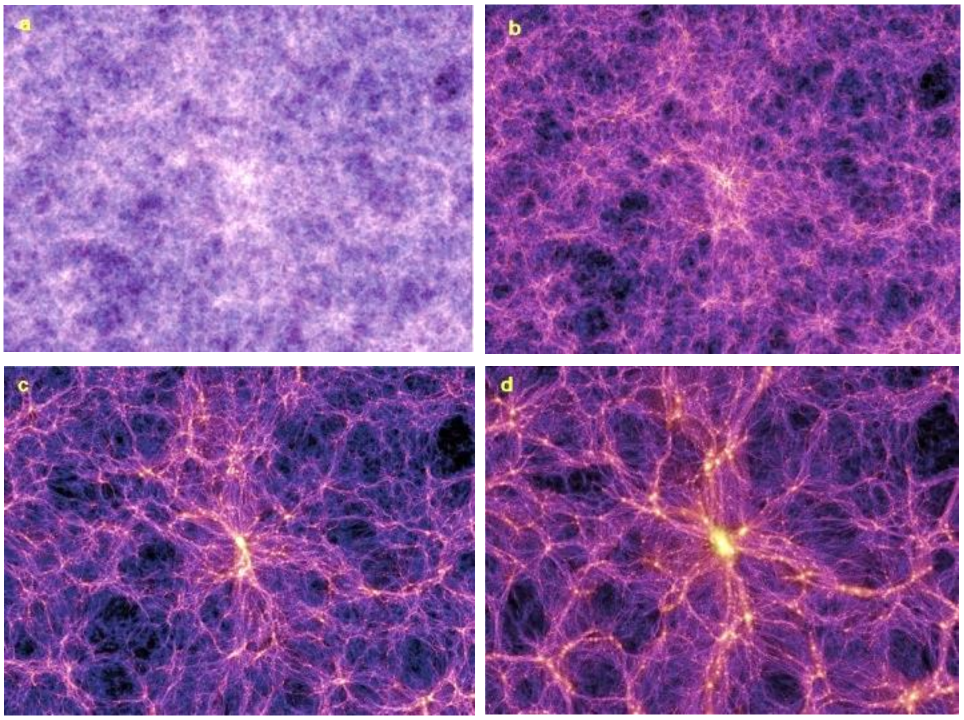


Im Rahmen von CANDELS werden **Protogalaxien** untersucht, die ihr Licht im Zeitraum von 1 bis 4 Milliarden Jahren nach der Entstehung des Universums aussendeten. Es handelt sich dabei noch nicht um elliptische Galaxien oder Spiralgalaxien, sondern um von Halos aus Dunkler Materie umgebene dichte rotierende Wolken aus baryonischer Materie, in denen sich erste Sterne bildeten. 3 Milliarden Jahre nach der Entstehung des Universums war die Sternentstehungsrate etwa 10- bis 20-mal so hoch, wie heute. Auf Grund der hohen Materiedichte in der Frühzeit des Universums konnten sich supermassive Schwarze Löcher bilden, die ungeheure Mengen Gas und Staub akkretierten. Auch die Milchstraße entstand zu dieser Zeit. (Vgl. Kap. VI, S. 301f)

Die Beobachtung junger Galaxien in der Frühphase des Universums ist nicht einfach, weil die weit entfernten jungen Glaxien eine sehr geringe scheinbare Helligkeit haben und ihr Licht wegen der großen Entfernung stark rotverschoben ist. Eine Vorstellung über die Vorgänge bei der Entstehung der ersten Galaxien liefern numerische **Simulationen zur Galaxienentstehung unter Einbeziehung Dunkler Materie**.

Mit der bereits in Kapitel VI „Der Aufbau des Universums“ vorgestellte **Millennium-Simulation** wurde für einen riesigen Ausschnitt des Universums die Strukturbildung von 380 000 Jahren nach dem Urknall bis heute simuliert. (Vgl. Kap. VI, S. 317f)

Die Bilderfolge zeigt die Simulation großräumiger Strukturen im selben Himmelsausschnitt 15 Millionen Jahre, 1 Milliarde Jahre, 4,7 Millarden Jahre nach dem Urknall und heute.



Die wichtigsten **Ergebnisse** der Milliennium-Simulation sind:

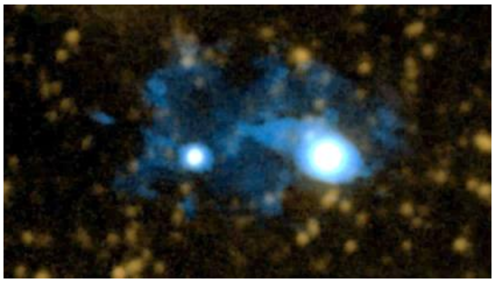
- Aus anfänglichen Dichtefluktuationen bildeten sich im Lauf der Zeit scharf gegeneinender abgegrenzte Bereiche überdichter und unterdichter Materiekonzentration.
- Der nicht strahlenden **Dunklen Materie** kommt die Schlüsselrolle bei der Entstehung großräumiger kosmischer Strukturen zu.
- In den **Knotenpunkten großräumiger Strukturen** sammeln sich die **größten Massen** an.

Die Entstehung von Galaxien:

Seit einigen Jahren geht man davon aus, dass sich die kosmischen Strukturen in der **Reihenfolge Sterne - Galaxien - Galaxienhaufen - Galaxienhaufen** entwickelten („**bottom-up Hierarchie**“).

In den Ansammlungen von Dunkler und baryonischer Materie verliert die baryonische Materie durch Strahlung Energie. Sie zieht sich deshalb zusammen und bildet im Zentrum des Halos der Protogalaxie aus Dunkler Materie eine Scheibe, in der erste Sterne entstehen.

Das Bild rechts zeigt einen Doppelquasar mit einer Protogalaxie. Wissenschaftler vom CALTECH (Californa Institute of Technology) entdeckten mit dem Palomar Observatorium in der Umgebung des Doppelquasars eine einströmende Gaswolke. Die spektroskopische Untersuchung zeigte, dass das System rotiert.



Die Entdeckung wird in einem Film auf http://phys.org/news/2015-08-astronomers-unveil-distant-proto-galaxy-cosmic.html dokumentiert.

Aufgrund der Gravitationskräfte, die benachbarte Protogalaxien aufeinander ausübten, verschmolzen die Halos aus Dunkler Materie. In die in den Halos eingebetteten Sternentstehungsgebiete strömte dabei Gas ein und sie wuchsen zu einer mehr oder weniger kompakten Zentralregion, dem **Bulge**, der in vielen Spiralgalaxien noch heute erhalten ist.

Die durch nachströmendes Gas anwachsenden Bulges waren Regionen heftiger Sternentwicklung, die in der Regel nur wenige 100 Millionen Jahre anhielt und sich dann in äußere Bereiche der jungen Galaxien verlagerte. Beendet wurden die Phasen intensiver Sternentstehung durch explosive und langsame Vorgänge, bei denen interstellares Gas aus dem Zentrum der Galaxie geblasen wurde:

- Supernovae,
- Plasmablasen, die sich in der Umgebung Schwarzer Löcher bilden und, wenn sie nach außen geschleudert werden, Gas mitrissen oder
- von den heißen Sternentstehungsgebieten verursachter thermischer Druck, der ein Nachströmen von Gas verhinderte.

Grundsätzlich unterscheidet man beim Wachsen einer Galaxie zwei Mechanismen:

- Die Sterne entstehen in der Protogalaxie selbst.
- Die Protogalaxie akkretiert benachbarte kleinere Galaxien und sammelt dabei von außen Sterne.

Große Galaxien wie die Milchstraße entstehen durch Verschmelzung kleinerer Galaxien bei Kollisionen oder wenn bestehende Galaxien Begleitgalaxien „aufsaugen“. Computersimulationen legen nahe, dass die Milchstraße bis zu 80% ihrer Masse durch Akkretion gewonnen hat.

Die Akkretion einer kleineren Galaxie durch eine größere ist manchmal sogar mit Amateurteleskopen beobachtbar:

Die 27 Millionen Lichtjahre entfernte **„Whirpool-Galaxie“ M51** im Sternbild „Jagdhunde“, ist ein schönes Beispiel für eine durch Akkretion wachsende Galaxie.

Im Vergleich zur Frühphase des Universums kommen Kollisionen zwischen Galaxien, bei der kleinere Galaxien zu großen Galaxien verschmelzen häufig, heute relativ selten vor.

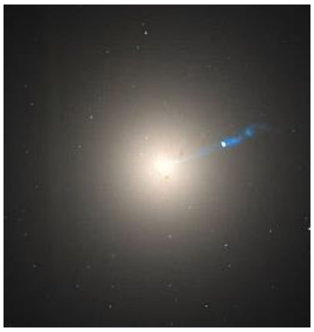
Galaxien umkreisen in Galaxienhaufen gemeinsam das Massezentrum des Haufens. Galaxienhaufen bestehen meist aus wenigen großen und vielen kleinen Galaxien. Auch in der Lokalen Gruppe mit den großen Galaxien Milchstraße und Andromedagalaxie sowie vielen Zwerggalaxien ist das so.

Die Entstehung von Schwarzen Löchern:

Quasare sind aktive Galaxien mit supermassiven Schwarzen Löchern (vgl. Kap. VI, S. 301). Sie werden in großen bis sehr großen Entfernungen beobachtet. Folglich muss es **supermassive Schwarze Löcher bereits im frühen Universum** gegeben haben. Röntgensatelliten wie Chandra oder XMM-Newton beobachten die Röntgenstrahlung von Quasaren. Eine wichtige Rolle spielen auch hier **Deep-Fields**, also lang belichtete Aufnahmen von Himmelsausschnitten. Die Informationen, die in der Röntgenstrahlung von aktiven Galaxien mit unterschiedlichen Rotverschiebungen stecken, ermöglichen den Vergleich unterschiedlich alter Schwarzer Löcher. Man kann so die Entwicklung Schwarzer Löcher studieren.

Die Leuchtkraft einer aktiven Galaxie wird durch die Akkretionsrate der Galaxie bestimmt und lässt damit auf die Masse des Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie schließen. Es zeigte sich, dass es in großen Entfernungen besonders viele sehr leuchtkräftige aktive Galaxien gibt, während in geringeren kosmischen Entfernungen leuchtschwächere aktive Galaxien überwiegen.

Folglich scheinen sich die meisten supermassiven Schwarzen Löcher bereits früh gebildet zu haben, wärend später weniger schwere Schwarze Löcher entstanden sind.



Die supermassiven Schwarzen Löcher aus der Frühzeit des Universums sind auch heute noch da. Sie bilden die Zentren besonders großer Galaxienhaufen an den Knotenpunkten der großräumigen Strukturen im Universum (vgl. Kap. VI, S. 303). Ein Beispiel ist die **Galaxie M87 im Virgo-Haufen** (Bild rechts). Die 54 Millionen Lj entfernte aktive Galaxie ist eine starke Radio- und Röntgenquelle mit einem $5\ 000\ Lj$ langen Jet. Bei einer Ausdehung von etwa $100\ 000\ Lj$ hat sie eine Gesamtmasse von 2 bis 3 Billionen Sonnenmassen. Das Schwarze Loch im Zentrum der Galaxie wird auf 6,6 Milliarden Sonnenmassen geschätzt.

Schwarze Löcher können nicht direkt beobachtet werden. Man kann immer nur aus der Beobachtung einer Galaxie auf ein Schwarzes Loch im Zentrum schließen. Deshalb stellt sich die Frage, was vorher existierte: Die Sterne der Galaxie oder das Schwarze Loch? Diese Frage ist in der Kosmologie bekannt als **„Hen-Egg-Problem“**. Wie bei Huhn und Ei geht es um die Frage: „Was war vorher da?“

Sorgfältige Auswertungen von Deep Field-Aufnahmen des Hubble Space Teleskops führten zur gängigen Meinung, dass **die meisten supermassiven Schwarzen Löcher vor den meisten Sternen entstanden**. Wie allerdings die ersten Schwarzen Löcher entstanden, ist eine der noch ungeklärten Fragen der Kosmologie.

9) Kosmologische Weltmodelle

Weltmodelle beschreiben die physikalischen Eigenschaften und die Geometrie des Universums. Insbesondere das zukünftige Verhalten des Universums wird durch Weltmodelle beschrieben. Wir betrachten zuerst das klassische Newtonsche Weltmodell und dann die relativistischen Weltmodelle von Friedmann, Lemaître, Walker und Robertson, die auch als FLRW-Universen zusammengefasst werden. Die relativistischen Weltmodelle sind Lösungen der Einsteinschen Feldgleichung. Man nennt sie auch Metriken. (Vgl. Kap. VIII, S. 454)

Das Newtonsche Weltmodell:

Wir stellen uns das Universum als mit der Geschwindigkeit v expandierende Kugel mit dem Radius R und der Gesamtmasse M vor. Weil die Masse M gleichmäßig auf das Universum verteilt ist, liegt sein Schwerpunkt in der Kugelmitte.

Die **zeitliche Entwicklung des Universums** wird im Wesentlichen von zwei Energien beeinflusst:

- **Gravitationsenergie E_{grav}**
  Die im Universum enthaltene Materie führt dazu, dass das Universum sich aufgrund seiner eigenen Gravitationskraft zusammenzieht.
- **Bewegungsenergie E_{kin}**
  Das expandierende Universum enthält Bewegungsenergie, die antigravitativ wirkt.

Die **Gravitationsenergie E_{grav}** erhalten wir durch Integration der auf einen Körper der Masse m im Abstand R vom Kugelmittelpunkt wirkenden Gravitationskraft:

$$E_{grav} = \int_R^\infty G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}\, dr = G \cdot m \cdot M \cdot \left[-\frac{1}{r}\right]_R^\infty = -G \cdot \frac{m \cdot M}{R}$$

Das negative Vorzeichen von E_{grav} bringt zum Ausdruck, dass die Gravitationsenergie eine der Expansion des Universums entgegen gerichtete Kraft $\vec{F}_{grav}$ bewirkt. Im Zusammenhang mit der Dunklen Energie werden wir auf S. 352 auf das Vorzeichen der Gravitationsenergie noch einmal zurückkommen.

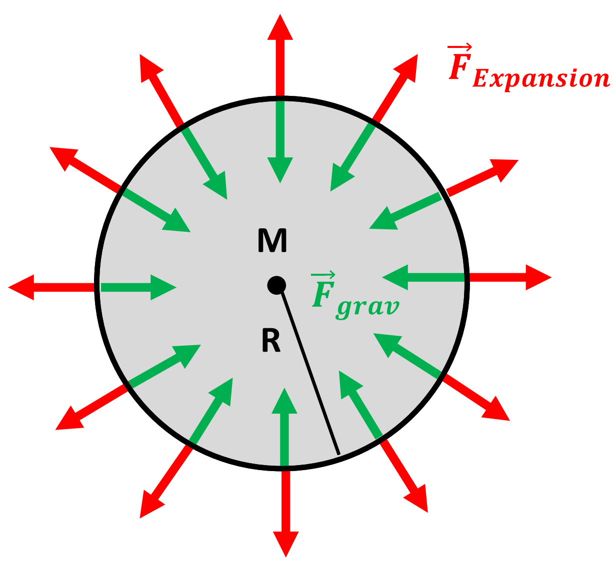
Weil aber in die folgenden Berechnungen nur der Betrag von E_{grav} eingeht, bezeichnen wir im Folgenden mit E_{grav} den Betrag der Gravitationsenergie:

$$\boldsymbol{E_{grav} = G \cdot \frac{m \cdot M}{R}}$$

Für die **Bewegungsenergie E_{kin}** eines (nicht-relativistischen) Universums gilt:

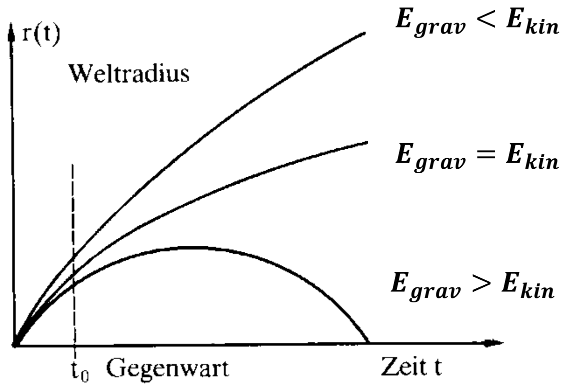
$$\boldsymbol{E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2}$$

Die Bewegungsenergie E_{kin} bewirkt eine nach außen gerichtete Kraft $\vec{F}_{Expansion}$.



Die Entwicklung des Universums hängt davon ab, welche der beiden Energieformen E_{grav} oder E_{kin} in Zukunft die andere überwiegt.

Es ergeben sich drei Möglichkeiten:



- $\boldsymbol{E_{grav} > E_{kin}}$: Die Gravitation ist in der Lage, die Expansion soweit abzubremsen, dass sie zum Stillstand kommt und sich umkehrt. Das Universum zieht sich am Ende auf einen winzigen Punkt zusammen. Es würde also zu einer Umkehrung des Urknalls kommen (**Big Crunch**).
- $\boldsymbol{E_{grav} = E_{kin}}$:
  Die Gravitation verlangsamt die Expansion immer weiter, bringt sie aber nicht um Stillstand.
- $\boldsymbol{E_{grav} < E_{kin}}$:
  Die Expansion des Universums verläuft beschleunigt.

Entscheidend für das Überwiegen der einen oder der anderen Energieform ist die **Energiedichte $\boldsymbol{\rho}$** des Universums.

Die Energiedichte, bei der gilt $\boldsymbol{E_{grav} = E_{kin}}$, heißt **kritische Dichte $\boldsymbol{\rho_K}$**.

Aus dem Energie-Ansatz $\boldsymbol{E_{grav} = E_{kin}}$ berechnen wir den Wert der kritischen Dichte ρ_K:

$$E_{grav} = E_{kin} \quad \Leftrightarrow \quad G \cdot \frac{m \cdot M}{R} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Die **Expansionsgeschwindigkeit $\boldsymbol{v_{Exp}}$** des Universums lässt sich durch das **Hubble-Gesetz** beschreiben:
Zum heutigen Zeitpunkt gilt: $\quad \boldsymbol{v_{Exp}} = z \cdot c = \boldsymbol{H_0 \cdot R}$ (Vgl. Kap. VI, S. 308f)

Für die **kritische Dichte des Universums** gilt: $\quad \boldsymbol{\rho_K = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}} \Longrightarrow \; M = \frac{4}{3}\pi R^3 \cdot \rho_K$

Damit folgt:

$$G \cdot \frac{\frac{4}{3}\pi R^3 \cdot \rho_K}{R} = \frac{1}{2} \cdot {H_0}^2 \cdot R^2 \quad \Longrightarrow \quad \boxed{\boldsymbol{\rho_K = \frac{3}{8 \cdot \pi \cdot G} \cdot {H_0}^2}}$$

Die kritische Dichte des Universums hängt also ausschließlich vom Wert der **Hubblekonstanten $\boldsymbol{H_0}$** ab!

Für die **kritische Dichte des Universums** erhalten wir mit $H_0 = 69 \, \frac{km}{Mpc \cdot s}$:

$$\boldsymbol{\rho_K} = \frac{3 \cdot {H_0}^2}{8 \cdot \pi \cdot G} = \frac{3 \cdot \left(69 \cdot \frac{1000 \, m/_s}{10^6 \cdot 3{,}26 \cdot 9{,}5 \cdot 10^{15} \, m}\right)^2}{8 \cdot \pi \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11} \, \frac{m^3}{kg \cdot s^2}} \approx \boldsymbol{8{,}9 \cdot 10^{-27} \, \frac{kg}{m^3}}$$

➢ Diese Dichte entspricht etwa der Masse eines Atoms, verteilt auf $1 \, m^3$ Volumen.
Im intergalaktischen Gas ist die Dichte noch geringer, in den Galaxien deutlich höher.

Ist die mittlere Dichte des Universums größer als die kritische Dichte ρ_K, so überwiegt die Gravitationsenergie und das Universum kollabiert. Ist die mittlere Dichte des Universums jedoch kleiner als die kritische Dichte ρ_K, so überwiegt die Bewegungsenergie der Expansion. Das Universum dehnt sich dann immer weiter aus und löst sich irgendwann auf.

Das oben beschriebene kosmologische Weltmodell bezeichnet man als **Newtonsches Weltmodell**. Es hat den Vorteil, dass wir die Argumentation mithilfe von Schulmathematik und Schulphysik nachvollziehen können. Der grundlegende Nachteil des Newtonschen Weltbildes ist, dass es von einer **Expansion des Universums in einen bestehenden Raum hinein** ausgeht. Wir wissen aber, dass man unter Expansion die Ausdehnung der Raumzeit selbst versteht.

Die Friedmann-Weltmodelle:

In der Allgemeinen Relativitätstheorie, die die Newtonschen Mechanik als Spezialfall beinhaltet, sind Universen Lösungen der Einsteinschen Feldgleichung (vgl. Kap. VIII, S. 453). Lösungen mit bestimmten geometrischen Eigenschaften sind Raumzeiten, die durch die im Universum enthaltene Masse und Energie gekrümmt werden. Nach $E = mc^2$ sind Masse und Energie äquivalent. Die Energiedichte ρ hängt also vom Massen- und Energieinhalt des Universums ab. Dabei müssen insbesondere Dunkle Materie und Dunkle Energie berücksichtigt werden. Die Energiedichte ρ bestimmt die Krümmung der Raumzeit und damit des Universums.

In der Zeit von 1917 bis 1922 fanden unter anderen **Alexander Friedmann**, **Georges Lemaître**, **Howard Robertson** und **Arthur Walker** verschiedene Lösungen der Einsteinschen Feldgleichung, die das Universum für unterschiedliche Energiedichten ρ beschreiben. Man nennt diese relativistischen Weltmodelle **Friedmann-Weltmodelle**. Den Anfangsbuchstaben der Nachnamen ihrer Entdecker entsprechend bezeichnet man diese Weltmodelle auch als **FLRW-Universen**.

Die Bilder zeigen von links nach rechts Friedmann, Lemaître, Robertson und Walker.




Die Friedmann-Modelle sind **4-dimensionale Raumzeiten**.

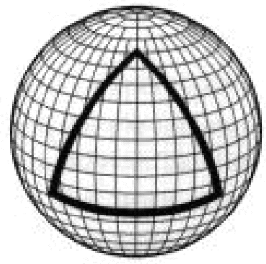
Weil wir im Alltag in 3 Dimensionen denken, fällt es uns schwer, uns eine 4-dimensionale Raumzeit vorzustellen.

Wie wir es beim Hubble-Gesetz bereits gemacht haben (vgl. Kap. VI, S. 307), reduzieren wir den 3-dimensionalen Raum auf eine 2-dimensionale Ebene. Diese Ebene kann - wie zum Beispiel eine Kugeloberfläche - gekrümmt sein.

Sterne, Galaxien usw. befinden sich in diesem auf eine Ebene reduzierten Raum ausschließlich in dieser Ebene und auch wir können uns nur in der Ebene bewegen. Die in den folgenden Skizzen eingetragenen Linien sind Geodäten, auf denen sich Körper und Licht in der Raumzeit bewegen können. (Vgl. Kap. VIII, S. 436)

Die Friedmann-Weltmodelle lassen sich hinsichtlich ihrer geometrischen Form drei Typen zuordnen:

1. Weltmodell: sphärisches Universum mit **positiver Krümmung**



Energiedichte: $\rho > \rho_K$

In 2 Dimensionen kann ein sphärisches Universum als **Kugelfläche** dargestellt werden.

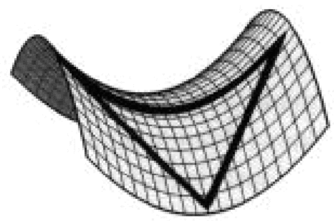
Ein sphärisches Universum ist **unbegrenzt aber endlich**.

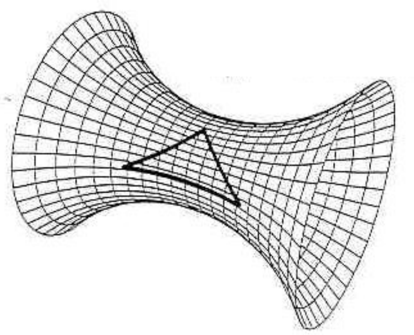
Das heißt: Wenn man sich in einem sphärischen Universum bewegt, stößt man nie an eine Grenze, kehrt aber, wenn man sich in einer Richtung auf einer Geodäte bewegt, wieder an den Ausgangspunkt zurück.

2. Weltmodell: hyperbolisches Universum mit **negativer Krümmung**

Energiedichte: $\rho < \rho_K$

In 2 Dimensionen kann ein hyperbolisches Universum als **Sattelfläche** dargestellt werden.



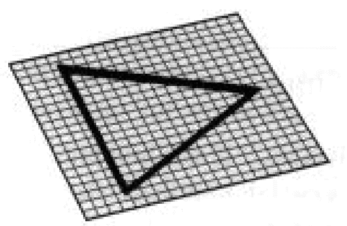


Ein hyperbolisches Universum kann **begrenzt und unendlich** (rechtes Bild) oder **unbegrenzt und endlich** sein (zu einer Hyperboloid-Fläche geschlossene Sattelfläche, links).

Im ersten Fall stößt man, wenn man sich im hyperbolischen Universum in einer Richtung auf einer Geodäte bewegt, an Grenzen, kommt aber nicht mehr zum Ausgangspunkt zurück. Im zweiten Fall kann man Wege auf Geodäten wählen, bei denen man an keine Grenze stößt aber an den Ausgangspunkt zurückkehrt.

3. Weltmodell: flaches Universum

Energiedichte: $\rho = \rho_K$



In 2 Dimensionen kann ein flaches Universum als **Ebene** dargestellt werden.

Je nachdem, ob die Ebene **endlich oder unendlich groß** ist, ist ein flaches Universum **begrenzt oder unbegrenzt**.

Weil in einem flachen Universum die Gesetze der Euklidischen ebenen Geometrie gelten, heißen flache Universen auch **Euklidische Universen**.

- ➢ Ein Beispiel für ein Gesetz der Euklidischen Geometrie ist der Satz: „Die Innenwinkelsumme eines Dreiecks beträgt 180°.“. Die in die Flächen eingezeichneten **Dreiecke** haben je nach Krümmung der Raumzeit unterschiedliche Innenwinkelsummen. Auf der Kugeloberfläche ist die Innenwinkelsumme des Dreiecks größer als 180°, auf der Sattelfläche kleiner als 180°. Nur im flachen Universum hat jedes Dreieck die Innenwinkelsumme 180°.

Welche Geometrie hat unser Universum?

Die verlässlichsten Messungen der Dichte des Universums, die insbesondere die Dunkle Materie miteinbeziehen, stammen von den Satelliten **WMAP** und **Planck** und somit aus der Bobachtung der **kosmischen Hintergrundstrahlung**.

Die gemessene mittlere Energiedichte ρ des Universums liegt mit einem Wert zwischen $5 \cdot 10^{-27}\ \frac{kg}{m^3}$ und $8 \cdot 10^{-26}\ \frac{kg}{m^3}$ so nah an der kritischen Energiedichte $\rho_K = 8{,}9 \cdot 10^{-27}\ \frac{kg}{m^3}$, dass es die mit den Messungen verbundene Unsicherheiten schwer machen, zu entscheiden, ob wir in einem sphärischen, einem hyperbolischen oder in einem flachen Universum leben. Die Daten des Planck-Satelliten lassen aber ein **flaches Universum** als am wahrscheinlichsten erscheinen.

Die Zeitliche Entwicklung von Universen:

Neben der geometrischen Form des Universums, also der Krümmung der Raumzeit, ist die zukünftige Entwicklung unseres Universums von besonderem Interesse.

Beim Newtonschen Weltbild haben wir bereits gesehen, dass die Zusammensetzung der Energiedichte aus einem kontrahierenden gravitativen und einem expandierenden kinetischen Anteil darüber entscheidet, ob sich ein Universum in Zukunft zusammenzieht oder ob es expandiert. Grundsätzlich gilt dies auch für relativistische Weltbilder. Wir wollen uns im Folgenden genauer ansehen, welche Faktoren die Entwicklung eines Universums bestimmen und wie diese sogenannten **kosmologischen Parameter** gemessen werden.

> Unser Universum besteht aus **Strahlung**, **Materie** (baryonische Materie und Dunkle Materie) und **Dunkler Energie**. Diese drei Komponenten bestimmen die **Energiedichte $\boldsymbol{\rho}$** unseres Universums.

Die **prozentualen Anteile an der Energiedichte $\boldsymbol{\rho}$ bezogen auf die kritische Energiedichte $\boldsymbol{\rho_K}$** werden mit $\boldsymbol{\Omega_r}$ (Strahlung), $\boldsymbol{\Omega_m}$ (Materie) und $\boldsymbol{\Omega_\Lambda}$ (Dunkle Energie) bezeichnet.

$\Omega_\Lambda = 0{,}685$ bedeutet zum Beispiel, dass ein Universum zu 68,5 % aus Dunkler Energie besteht.

Wie groß die **Expansionsgeschwindigkeit $\boldsymbol{v_{Exp}(t)}$ des Universums in früheren Entwicklungsphasen des Universums** war, hängt nach dem **zeitabhängigen Hubble-Gesetz**

$$\boldsymbol{v_{Exp}(t) = z(t) \cdot c = H(t) \cdot r(t)}$$

vom Wert des Hubble-Parameters $$\boldsymbol{H(t) = \frac{\dot{\mathcal{R}}(t)}{\mathcal{R}(t)}}$$

und damit von der zeitlichen Entwicklung des kosmischen Skalenfaktors $\boldsymbol{\mathcal{R}(t)}$ **ab**.

Die Dichteanteile $\boldsymbol{\Omega_r(t)}$ und hauptsächlich $\boldsymbol{\Omega_m(t)}$ und $\boldsymbol{\Omega_\Lambda(t)}$ bestimmen die Werte des **Skalenfaktors** $\boldsymbol{\mathcal{R}(t)}$ zu verschiedenen Zeiten t.

Mit dem Hubble-Gesetz und dem kosmischen Skalenfaktor $\mathcal{R}(t)$ haben wir uns in Kapitel VI auf S. 308ff genauer befasst.

> Ohne die **antigravitative Wirkung der Dunklen Energie** müssen sphärische Universen kollabieren, während sich hyperbolische Universen immer weiter ausdehnen und flache Universen sich im Lauf der Zeit immer langsamer ausdehnen, bis ein Stillstand eintritt.
> Erst die **Dunkle Energie** macht es möglich, dass auch ein sphärisches Universum expandiert und ein flaches Universum beschleunigt expandiert.

Deshalb ist auch das **Vorzeichen der gravitativen Energie** maßgeblich für die Entwicklung eines Universums.

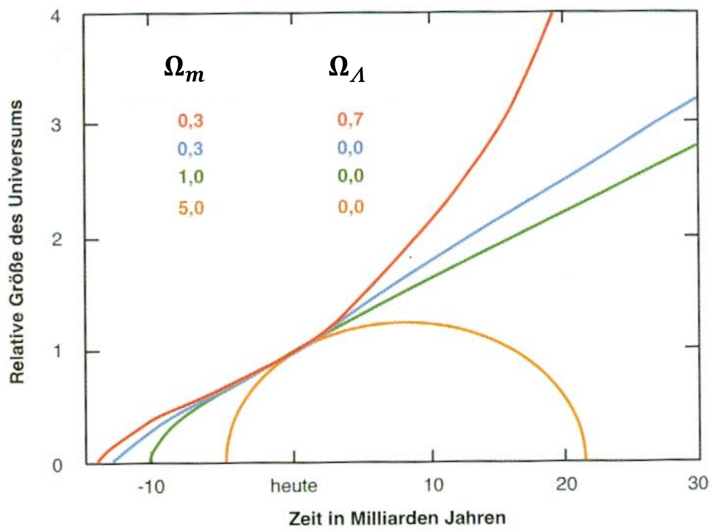
Im Newtonschen Weltmodell (vgl. S. 348) würde die Dunkle Energie einen <u>positiven</u> Beitrag zur Gravitationsenergie E_{grav} beitragen, der eine nach außen gerichtete, expandierende Kraft bewirkt.

Für die **quantitative Beschreibung der Expansion oder Kontraktion** eines Universums sind der **Hubble-Paramater $H(t)$** und der **Abbremsungsparameter $q(t)$** wichtig.

Form und zeitliche Entwicklung eines Universums werden also durch folgende **kosmologischen Parameter** bestimmt:

- $\boldsymbol{\Omega_r}$ (Anteil der Strahlungsdichte Strahlung an der Energiedichte ρ)
- $\boldsymbol{\Omega_m}$ (Anteil der Dichten von baryonischer und Dunkler Materie an der Energiedichte ρ)
- $\boldsymbol{\Omega_\Lambda}$ (Anteil der Dichte der Dunklen Energie an der Energiedichte ρ)
- **Vorzeichen der Raumzeitkrümmung** (positiv für ein sphärisches Universum, negativ für ein hyperbolisches Universum und 0 für ein flaches Universum)
- **Hubble-Parameter $H(t)$**
- **Abbremsungsparameter $q(t)$**

In der Abbildung rechts werden **Friedmann-Universen mit unterschiedlichen zeitlichen Entwicklungen** dargestellt. Auf der Rechtswertachse ist die von heute aus in die Zukunft bzw. in die Vergangenheit gemessene Zeit aufgetragen, auf der Hochwertachse die relative Größe des Universums bezogen auf die heutige Größe.
Die Entwicklung der Universen wird offenbar durch die kosmologischen Parameter $\boldsymbol{\Omega_m}$ und $\boldsymbol{\Omega_\Lambda}$, also durch die Anteile von Materie und Dunkler Energie an der Gesamt-Energiedichte ρ, bestimmt.



Die Strahlung beeinflusste die Entwicklung des Universums mehrere Tausend Jahre nach dem Urknall entscheidend. Diese strahlungsdominante Zeit ist aber zu kurz, um sie im Diagramm darstellen zu können. Heute hat der Strahlungsanteil an der Energiedichte den vernachlässigbar kleinen Wert $\boldsymbol{\Omega_r \approx 10^{-5}}$.

Die vier eingezeichneten **Universen sind unterschiedlich alt**. Der Zeitpunkt der Entstehung des Universums liegt jeweils links von „heute“ am Schnittpunkt der Kurve mit der Zeitachse.

Interpretation der unterschiedlichen Universen:

Gelbe Kurve:

Das Universum enthält **sehr viel Materie** aber **keine Dunkle Energie**.
Für die Energiedichte gilt $\rho > \rho_K$. Es handelt sich also um ein **sphärisches Universum**.
Das Universum **entstand vor etwa 5 Milliarden Jahren** und **kollabiert**, weil es keine Dunkle Energie enthält, die der Gravitationsenergie entgegenwirkt. Man nennt das Universum deshalb ein **geschlossenes Universum**.

➢ Die gelbe Kurve kann unser Universum nicht beschreiben, weil beispielsweise die Altersbestimmung von Gesteinsproben zeigt, dass unser Universum älter als 5 Milliarden sein muss.

Grüne Kurve:

Das Universum enthält **Materie** aber **keine Dunkle Energie**.
Für die Energiedichte gilt $\rho = \rho_K$. Es handelt sich also um ein **flaches Universum**.
Das Universum **entstand vor etwa 10 Milliarden Jahren**. Es expandiert, aber die Expansion wird immer langsamer. Die Gravitationsenergie reicht gerade nicht aus, um das Universum kollabieren zu lassen. Ein expandierendes Universum heißt **offenes Universum**.

Blaue Kurve:

Das Universum enthält **relativ wenig Materie** und **keine Dunkle Energie**.
Für die Energiedichte gilt $\rho < \rho_K$. Es handelt sich also um ein **hyperbolisches Universum**.
Das Universum **entstand vor etwa 13 Milliarden Jahren**. Es expandiert, aber die Expansion wird durch die Gravitationsenergie der Materie abgebremst. Auch dieses Universum ist ein **offenes Universum**.

Kosmologische Messungen in unserem Universum:

Eine Aufgabe der Kosmologen ist es, durch Messdaten zu überprüfen, welches Weltmodell unser Universum am besten beschreibt. In die Zukunft kann man nicht schauen und in der Umgebung der heutigen Zeit verlaufen die Kurven sehr ähnlich. Deshalb muss man weit in die Vergangenheit blicken, wo sich die skizzierten Universen deutlich unterscheiden. Weit in die Vergangenheit zu schauen, bedeutet in der Kosmologie aber, dass Daten von sehr weit entfernten Objekten gesammelt werden müssen.

Mithilfe von **Supernovae des Typs Ia** wurden die **Entfernungen** zahlreicher Galaxien gemessen. Über deren **Rotverschiebung** wurde mithilfe des Hubble-Gesetzes die **Expansionsgeschwindigkeit** unseres Universums zu verschiedenen Zeiten bestimmt.

Auf die Anteile von Materie und Dunkler Energie an der Energiedichte unseres Universums kann man aus Messdaten des **Planck-Satelliten** schließen.

Diese Messungen lieferten den Teil der **roten Kurve** vom Alter der ältesten beobachteten Galaxien bis heute.

Rote Kurve:

Das Universum enthält **etwa 30 % Materie** und etwa **70 % Dunkle Energie**.
Für die Energiedichte gilt $\rho = \rho_K$. Es handelt sich also um ein **flaches Universum**.
Das Universum **entstand vor etwa 13,8 Milliarden Jahren**.
Unser Universum expandiert, ist also ein **offenes Universum**.
Auffällig ist, dass die **Expansionsgeschwindigkeit bis vor etwa 5 Milliarden Jahren abnahm** und **dann** eine **beschleunigte Expansion** einsetzte. Diese beschleunigte Expansion wird in der roten Kurve für die Zukunft extrapoliert.

Das Diagramm auf S. 353 (mögliche zeitliche Entwicklungen des Universums) beschreibt insbesondere die zugehörige **Zeitabhängigkeit des kosmischen Skalenfaktors $\boldsymbol{\mathcal{R}(t)}$**. $\mathcal{R}(t)$ ist die Längeneinheit des Raums (vgl. Kap. VI, S. 310). Die Expansionsgeschwindigkeit $v_{Exp}(t)$ und die Beschleunigung $a_{Exp}(t)$ der Expansion des Universums zum Zeitpunkt t nach der Entstehung des Universums lassen sich mithilfe des kosmischen Skalenfaktors beschreiben:

$$v_{Exp}(t) = \dot{\mathcal{R}}(t) \cdot r_0 \qquad \text{und} \qquad a_{Exp}(t) = \dot{v}_{Exp}(t) = \ddot{\mathcal{R}}(t) \cdot r_0$$

Das Universum expandiert $\Leftrightarrow$ $\dot{\mathcal{R}}(t) > 0$ $\Leftrightarrow$ Das t- $\mathcal{R}(t)$-Diagramm steigt.

Das Universum kontrahiert $\Leftrightarrow$ $\dot{\mathcal{R}}(t) < 0$ $\Leftrightarrow$ Das t- $\mathcal{R}(t)$-Diagramm fällt.

$v_{Exp}(t)$ des Universums nimmt zu $\Leftrightarrow$ $\ddot{\mathcal{R}}(t) > 0$ $\Leftrightarrow$ Das t- $\mathcal{R}(t)$-Diagramm ist linksgekrümmt.

$v_{Exp}(t)$ des Universums nimmt ab $\Leftrightarrow$ $\ddot{\mathcal{R}}(t) < 0$ $\Leftrightarrow$ Das t- $\mathcal{R}(t)$-Diagramm ist rechtsgekrümmt.

In der Vergangenheit ($t < t_0$) hat das t- $\mathcal{R}(t)$-Diagramm bei $t \approx 8$ Milliarden Jahre einen Wendepunkt, bei dem $\ddot{\mathcal{R}}(t) < 0$ in $\ddot{\mathcal{R}}(t) > 0$ übergeht. Zu diesem Zeitpunkt setzt die beschleunigte Expansion des Universums ein.

Für die **Vergangenheit** ($\boldsymbol{t < t_0}$) kann man den Verlauf der Funktion $\mathcal{R}(t)$ durch Beobachtung (kosmologische Rotverschiebung, Entfernung) bestimmen.
Für die **Zukunft** ($\boldsymbol{t > t_0}$) kann man über den Verlauf der Funktion $\mathcal{R}(t)$ nur spekulieren.

Die weitere Entwicklung des Universums hängt von der zukünftigen Zeitabhängigkeit des kosmologischen Skalenfaktors $\mathcal{R}(t)$ ab:

rote Kurve (beschleunigte Expansion): $\ddot{\mathcal{R}}(t)$ bleibt positiv.

blaue Kurve / **grüne Kurve**
(Expansion mit gleichbleibender oder abnehmender Expansionsgeschwindigkeit): $\ddot{\mathcal{R}}(t) \to 0$

gelbe Kurve (Kontraktion): $\ddot{\mathcal{R}}(t)$ wird negativ.

Offenbar bestimmten drei Phasen die Entwicklung unseres Universums:

- **Strahlungsdominierte Phase:**

  Während einer kurzen Zeit nach dem Urknall (mehrere Tausend Jahre) hatte die Strahlungsenergiedichte den größten Anteil an der Gesamt-Energiedichte ρ. Die Strahlungsenergie bewirkte die Expansion des Universums. Infolge der Ausdehnung des Universums nahm aber die Energiedichte der Strahlung immer weiter ab, bis sie unter die Energiedichte der Materie gesunken war.

- **Materiedominierte Phase:**

  Bis etwa 5 Milliarden Jahre nach dem Urknall bildete die Energiedichte der Dunklen Materie und der aus der Strahlung entstanden baryonischen Materie den Hauptanteil an der Gesamt-Energiedichte ρ. Die Gravitationswirkung des Materieüberschusses bremste die Expansionsbewegung in dieser Entwicklungsphase ab. Weil die Gesamtmenge an Materie unveränderlich ist und sich das Universum weiter ausdehnte, nahm aber auch die Materiedichte im Lauf der Zeit ab.

- **Dominanz der Dunklen Energie:**

  Die **Dunkle Energie** scheint eine **Eigenschaft der Raumzeit** zu sein. Ihre **Energiedichte $\boldsymbol{\Omega_\Lambda}$ ist vermutlich konstant**.

  Wenn dies stimmt, musste mit zunehmender Ausdehnung des Universums und der damit verbundenen Abnahme der Energiedichten von Strahlung und Materie der Anteil der Energiedichte der Dunklen Energie an der Gesamt-Energiedichte ρ automatisch wachsen und schließlich überwiegen. Die Dunkle Energie übernahm die tragende Rolle in der weiteren Entwicklung unseres Universums.

  Die antigravitative Wirkung der Dunklen Energie ist die Ursache für die beschleunigte Expansion unseres Universums.

Unser Universum:

Momentan werden unserem Universum folgende Eigenschaften zugeschrieben:

- Unser Universum ist etwa **13,8 Milliarden Jahre alt**.
- Wir leben in einem **flachen Universum**, das zu **4,9% aus baryonischer Materie, zu 26,8% aus Dunkler Materie und zu 68,3% aus Dunkler Energie** besteht.
- Der hohe Anteil an Dunkler Energie bewirkt eine **beschleunigte Expansion** unseres Universums.
- Unser Universum wird sich immer **weiter ausdehnen** und dabei immer mehr **abkühlen**.

Mögliche zukünftige Entwicklung unseres Universums:

In der „näheren" Zukunft wird es zur **Kollision der Milchstraße mit** ihrer Nachbargalaxie, **der Andromedagalaxie** kommen. Mit 2,5 Millionen Lichtjahren sind sich die beiden Galaxien so nahe, dass ihre gravitative Anziehung die Expansionswegung überwiegt. Die Andromedagalaxie bewegt sich momentan mit einer Geschwindigkeit von etwa $140\ \frac{km}{s}$ auf uns zu (Blauverschiebung!).
In 4 bis 10 Milliarden Jahren dürfte es zu einem Zusammentreffen der beiden Galaxien kommen.

Galaxienkollisionen sind in der Kosmologie ein oft beobachteter Vorgang. Er verläuft häufig überraschend unspektakulär, weil sich wegen der großen Entfernungen zwischen den einzelnen Sternen die Galaxien gegenseitig durchdringen können, ohne sich gegenseitig wesentlich zu beeinflussen. Wenn sich allerdings die Zentren der beiden Galaxien mit ihren Schwarzen Löchern und ihrer hohen Sterndichte genügend nahe kommen, dann treten intensive Wechselwirkungen auf, die zu Sternentstehungsgebieten führen. Die Schwarzen Löcher umkreisen sich gegenseitig und vereinigen sich schließlich zu einem supermassiven Schwarzen Loch.

Mit 13,8 Milliarden Jahren ist das Alter des Universums, verglichen mit Zeiträumen, mit denen wir es im Alltag zu tun haben, unvorstellbar groß. Dennoch befinden wir uns **heute noch in der Frühphase des Universums**. Das Universum wird momentan dominiert von der Entstehung und Entwicklung von Sternen. Man spricht auch vom „**Goldenen Zeitalter der Sterne**".

Die folgende Beschreibung der **Zukunft des Universums** ist sehr spekulativ. Sie geht von einem Universum aus, das sich für alle Zeiten weiter ausdehnt und dabei immer dünner und kälter wird:

Sterne entstehen aus interstellarer Materie. Aufgrund der kosmischen Expansion wird die mittlere Dichte der interstellaren Materie abnehmen. Außerdem wird der Vorrat an zur Sternentstehung notwendigem Wasserstoffgas kleiner. Deshalb werden sich im Lauf der Zeit **immer mehr Sterne in Endstadien** befinden und schließlich erkalten. Das **Universum wird dunkel**. Es bilden sich **Supergalaxien aus Sternleichen**. Bis dahin dauert es schätzungsweise noch $\mathbf{10^{13}}$ **Jahre**.

Protonen sind sehr stabile Objekte. In sehr langen Zeiträumen zerfallen aber auch sie. In $\mathbf{10^{32}}$ **Jahren** werden sich die baryonische Materie und mit ihnen die Supergalaxienhaufen auflösen. **Materie ist jetzt nur noch in Schwarzen Löchern konzentriert**.

Schwarze Löcher zerstrahlen nach etwa $\mathbf{10^{66}}$ **Jahren** über die Hawking-Strahlung. (Vgl. Kap. V, S. 248)

In $\mathbf{10^{100}}$ **Jahren** dürften **alle kosmischen Strukturen verschwunden** sein.

Das Weltall ist dann leer, dunkel und kalt.
Die Dichte des Universums wird so gering sein, dass von den verbliebenen Photonen, Neutrinos, Elektronen und Positronen nur noch alle paar Millionen Jahre ein Teilchen auf ein anderes trifft.

Zyklische Universen:

Einen grundsätzlich anderen Ansatz verfolgen die Modelle **zyklischer Universen**. Sie gehen davon aus, dass Universen in einem Urknall entstehen und nach langer Zeit wieder zu einem extrem dichten Objekt zusammenfallen um in einem neuen Urknall wieder neu zu entstehen. Dieser Vorgang wiederholt sich periodisch. Es gibt mehrere Modelle zyklischer Universen.

Dragan Hajdukovic stellte 2011 eine interessante Hypothese vor, die die Entwicklung des Universums **ohne** die umstrittenen Grundannahmen der **kosmischen Inflation** und der **Dunklen Energie** beschreibt. Außerdem **löst** Hajdukovic mit seiner Hypothese **das Problem der Asymmetrie von Materie und Antimaterie**. Wie seine in Kap. IV, auf S. 139f vorgestellten Überlegungen zum Wesen der Dunklen Energie, beruht Hajdukovics Vorstellung von zyklischen Universen auf der Hypothese, dass **auf Antimaterie in einem von Materie erzeugten Gravitationsfeld eine abstoßende Kraft wirkt**. Ebenso wirkt auf Materie in einem von Antimaterie erzeugten Gravitationsfeld eine abstoßende Kraft.

Ohne Dunkle Energie würde die Dichte des Universums nicht ausreichen, um das Universum für alle Zeiten expandieren zu lassen. Das **Universum müsste irgendwann zu einem gigantischen Schwarzen Loch zusammenfallen**. Nach der Theorie von Dragan Hajdukovic führt der **gravitative Schwinger-Mechanismus** (vgl. Kap. VI, S. 323) in dem extremen Gravitationsfeld im Inneren des Ereignishorizonts dieses Schwarzen Lochs zur **Erzeugung von Teilchen-Antiteilchen-Paaren im Quantenvakuum**. Diese Paare werden im Gravitationsfeld getrennt. Weil das Schwarze Loch aus Materie besteht, schleudert seine Gravitationswirkung die Antiteilchen nach außen weg. Es entsteht ein neues Universum, das aber aus Antimaterie besteht. Hajdukovic berechnete, dass dieser Vorgang, bei dem sich ein **Materie-Universum in ein Antimaterie-Universum umwandeln** würde, nur etwa 10^{-44} Sekunden dauern würde. Das Schwarze Loch würde dabei eine Größe behalten, die etwa der Größe des Universums nach der kosmischen Inflation entspricht. Damit würde die kosmische Inflation überflüssig.

Ob sich Materie und Antimaterie tatsächlich hinsichtlich ihres Verhaltens in einem äußeren Gravitationsfeld unterscheiden, wird am CERN in zwei Experimenten erforscht: **AEgIS** und **ALPHA** (vgl. Kap. VI, S. 323). Das **IceCube-Experiment** am Südpol (vgl. Kap. II, S. 72) untersucht unter anderem Neutrinos, die aus dem Schwarzen Loch im Zentrum der Milchstraße stammen könnten. Auch dieses Experiment könnte Erkenntnisse liefern, Hypothesen wie die von Hajdukovic stützen.

Aufgaben zu Kapitel VII Ursprung und Entwicklung des Universums:

Aufgabe 1: Das Kosmologische Prinzip

1) Erläutere das Kosmologische Prinzip!

2) Warum gilt das Kosmologische Prinzip nur auf großen Distanzen? Was versteht man in diesem Zusammenhang unter „großen Distanzen“?

3) Die Beobachtung der Galaxienflucht steht scheinbar im Widerspruch zum Kosmologischen Prinzip. Erläutere diesen Sachverhalt und mache plausibel, dass Kosmologisches Prinzip und Galaxienflucht sich tatsächlich nicht gegenseitig ausschließen!

4) Erkläre, warum das auf S. 333 vorgestellte Torusmodell für ein 2-dimiensionales Wesen ein geschlossenes, das heißt, unbegrenztes aber endliches Universum darstellt!

Lösung:

zu 1) Das Universum ist homogen und isotrop. Das heißt: Das Weltall sieht für einen Beobachter unabhängig von seinem Standort im Universum und unabhängig von der Beobachtungsrichtung immer gleich aus.

zu 2) Die sichtbare Materie ist im Universum nicht gleichmäßig verteilt, sondern in Filamenten, Superhaufen, Galaxienhaufen, Galaxien usw. konzentriert.
Ein von jedem Standpunkt in jeder Richtung gleiches Bild vom Universum erhält man erst, wenn man Ausschnitte mit einem Durchmesser von mindestens 100 Millionen Lj betrachtet.

zu 3) Vgl. S. 340

zu 4) Wie auf einer Kugel kann ein zweidimensionales Wesen zwar unendlich weit in eine Richtung laufen, ohne an eine Grenze zu kommen (Unbegrenztheit), wenn es lang genug in eine Richtung läuft, kommt es aber irgendwann wieder zum Ausgangspunkt zurück (Endlichkeit).

Eine anschauliche Erläuterung zum Torusmodell findest du im Internet auf der Seite
http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/bonn2/de/inhalt-b-Torus.html

Aufgabe 2: Die Entstehung des Universums

1) Warum ist es prinzipiell unmöglich, physikalische Aussagen über den Zeitpunkt des Urknalls zu treffen?

2) Grenze die kosmologischen Phänomene „Inflation“ und „Expansion“ gegeneinander ab!

3) Bei Temperaturen von mehr als 10 Milliarden Kelvin standen Protonen und Neutronen in Thermischem Gleichgewicht. Was bedeutet dies? Warum nahm mit absinkenden Temperaturen die Neutronen-Häufigkeit im Vergleich zur Protonen-Häufigkeit stark ab?

4) Galaxienflucht und kosmische Hintergrundstrahlung liefern wertvolle Informationen über die Frühzeit des Universums. Erläutere, warum diese Informationen sich nur auf Zeiten von mehr als 380 000 Jahren nach dem Urknall beziehen können!

5) Etwa 500 Millionen Jahre nach dem Urknall war die Sternentstehungsrate wesentlich höher als heute. Wie lässt sich dies begründen?

Lösung:

zu 1) Der Urknall ist der Beginn von Raum und Zeit. Es gibt also beim Urknall weder Raum noch Zeit. Physikalische Gesetze setzen für ihre Gültigkeit aber Raum und Zeit voraus.

zu 2) Infolge seiner extrem hohen Energiedichte dehnte sich das Universum beim Urknall gegen seine Eigengravitation in alle Richtungen mit Überlichtgeschwindigkeit und gleichmäßig aus. Diesen Vorgang bezeichnet man als kosmische Inflation.
Auch heute dehnt sich das Universum aus, allerdings mit einer geringeren Geschwindigkeit als der Lichtgeschwindigkeit (kosmische Expansion). Man kann durch die Messung der Fluchtgeschwindigkeiten von Supernovae des Typs Ia zeigen, dass die die Ausdehnung des Universums beschleunigt erfolgt. Als treibende Energie für die kosmische Expansion definiert man die Dunkle Energie.

zu 3) Thermisches Gleichgewicht bedeutet, dass Protonen und Neutronen gleich häufig waren, weil sie sich ständig ineinander umwandelten.
Die Umwandlung von leichteren Protonen in schwerere Neutronen ist endotherm und wurde bei genügend hohen Temperaturen durch Wechselwirkungen mit energiereichen Neutrinos ermöglicht. Bei Temperaturen unter 10 Milliarden Kelvin fand nur noch die exotherme Umwandlungsreaktion von Neutronen in Protonen statt. Immer mehr Protonen zerfielen.

zu 4) Erst 380 000 Jahre nach dem Urknall konnte das Licht sich frei ausbreiten. Vorher war die Temperatur zu hoch, als dass sich stabile und elektrisch neutrale Atome bilden können hätten. Die Photonen wechselwirkten mit den elektrisch geladenen Atomkernen und Elektronen.

zu 5) 500 Millionen Jahre nach dem Urknall war die kosmische Expansion noch lange nicht so weit fortgeschritten wie heute. Deshalb waren die Galaxien wesentlich näher beisammen und es kam viel öfter zu Wechselwirkungen zwischen Galaxien. Diese führten zu Verdichtungen der interstellaren Materie, bei denen sich Sterne bildeten.

Aufgabe 3: Die primordiale Nukleosynthese

Die primordiale Nukleosynthese beschreibt, wie sich in der Zeit vor der Entstehung der ersten Sterne leichte Atomkerne bildeten.

1) Erläutere die Unterschiede zwischen der primordialen Nukleosynthese, der „Erbrütung“ chemischer Elemente bis hin zum Eisen in Sternen und der Entstehung der chemischen Elemente, die schwerer als Eisen sind!

2) Welche Bedingungen musste das frühe Universum erfüllen, damit sich erste Atomkerne bilden konnten?

3) Warum war die primordiale Nukleosynthese etwa 20 Minuten nach dem Urknall abgeschlossen?

Lösung:

zu 1) Elemente, bis hin zum Eisen werden in Sternen durch Kernfusion erzeugt.
Schwerere chemische Elemente entstehen in Supernovae: Unter den extremen Druck- und Temperaturbedingungen einer Sternexplosion werden Neutronen gebildet, die sich an Atomkerne anlagern und zu Protonen zerfallen.
Der Vorgang wird im Alpha-Centauri-Film „Woher kommt unser Gold“ anschaulich erklärt:
http://www.br.de/fernsehen/br-alpha/sendungen/alpha-centauri/alpha-centauri-gold-2000_x100.html

zu 2) Die Temperatur musste soweit abgesunken sein, dass die hochenergetischen Photonen die Nukleonen nicht sofort wieder auseinander schießen. Das war etwa 3 Minuten nach dem Urknall der Fall. Gleichzeitig musste die Temperatur aber hoch genug sein, um die Fusionsreaktionen zu ermöglichen, bei denen aus Protonen bzw. aus leichteren Atomkernen Helium-, Lithium- und Berylliumkerne entstanden.

zu 3) Etwa 20 Minuten nach dem Urknall war die Temperatur so weit abgesunken, dass keine Fusionsreaktionen mehr stattfinden konnten.

Aufgabe 4: Experimente zur kosmischen Hintergrundstrahlung

1) Die mittlere Strahlungstemperatur der Kosmischen Hintergrundstrahlung liegt bei $2{,}275\ K$.
Bei welcher Wellenlänge ist das Intensitätsmaximum der Kosmischen Hintergrundstrahlung zu erwarten?
Zu welcher Art von Strahlung gehört die kosmische Hintergrundstrahlung deshalb?

2) Erläutere, wie es zur Abkühlung der Hintergrundstrahlung von $3000\ K$ auf $2{,}275\ K$ kam!

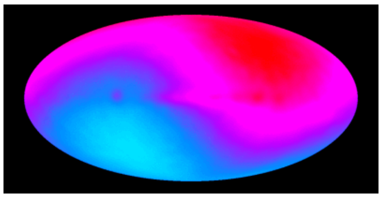
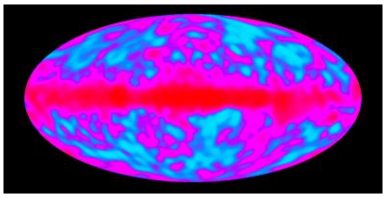
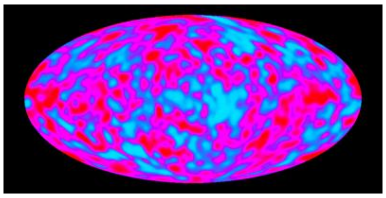
Richtungsweisende Experimente zur Untersuchung der Kosmischen Hintergrundstrahlung vor dem Planck-Satelliten waren COBE, Boomerang und WMAP.

3) Informiere dich im Internet über diese Forschungsprojekte!

4) Welcher Aspekt der Kosmischen Hintergrundstrahlung wurde mit diesen Experimenten untersucht?

5) Erläutere, inwiefern die Messergebnisse von COBE, Boomerang und WMAP einen klaren Hinweis auf die Dunkle Materie geben!

6) Erläutere, wie man vom COBE Originalbild von der Temperaturverteilung im Universum zur „Landkarte“ der Kosmischen Hintergrundstrahlung kommt!

Lösung:

zu 1) Strahlungsenergie: $E = \frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T = \frac{3}{2} \cdot 8{,}62 \cdot 10^{-5}\ \frac{eV}{K} \cdot 2{,}275\ K = 2{,}94 \cdot 10^{-4} eV$
Wellenlänge der Photonen:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{\lambda} = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{4{,}1357 \cdot 10^{-15}\ eVs\ \cdot 3{,}0 \cdot 10^{8}\ \frac{m}{s}}{2{,}94 \cdot 10^{-4} eV} \approx \mathbf{4{,}2\ mm}$$

Es handelt sich um Mikrowellenstrahlung.

zu 2) Die kosmische Expansion führt zur kosmologischen Rotverschiebung, also zu einer Dehnung der Wellenlänge der Strahlung. Dies bedeutet aber ein Absinken der Strahlungstemperatur (vgl. Teilaufgabe **1)**).

zu 3) Eigene Recherchen im Internet. Man geht am besten von Wikipedia aus.

zu 4) Es wurden Temperaturfluktuationen in der Kosmischen Hintergrundstrahlung gesucht.

zu 5) Weil die sichtbare Materie im Universum ausgeprägte und inhomogene Strukturen bildet, müssten die Schwankungen um den Mittelwert der Strahlungstemperatur im mK-Bereich liegen. Tatsächlich wurden aber lediglich Temperaturschwankungen im μK-Bereich gemessen. Dies weist darauf hin, dass ein Großteil der Masse des Universums gleichmäßig verteilt ist. Es handelt sich dabei um die unsichtbare Dunkle Materie.

zu 6) Vgl. Kapitel II „Licht, Spektroskopie und Teleskope“, S. 60.

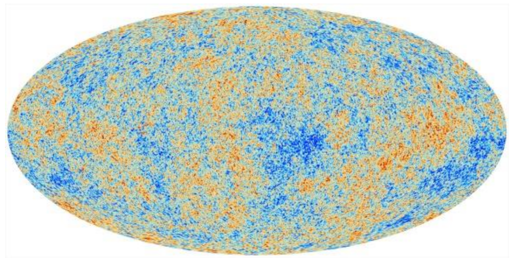
<u>Aufgabe 5</u>: Kosmischen Hintergrundstrahlung (nach einer Abituraufgabe von 2016)

Als $380\,000$ Jahre nach dem Urknall die Temperatur des Universums auf $3000\ K$ gesunken war, konnte sich Licht erstmals ungehindert ausbreiten. Die zu dieser Zeit emittierte Strahlung erreicht uns heute als kosmische Hintergrundstrahlung. Heute hat die kosmische Hintergrundstrahlung eine mittlere Temperatur von $2{,}725\ K$.

1) Erkläre, weshalb die Temperatur der Strahlung so stark gesunken ist!

2) Die Milchstraße bewegt sich im Kosmos und mit ihr die Erde. Erkläre, wie sich der für die Hintergrundstrahlung ermittelte Wert der Temperatur ändert, je nachdem, ob die Strahlung in oder gegen die Bewegungsrichtung der Erde im Kosmos untersucht wird!

Die Abbildung zeigt eine Darstellung der kosmischen Hintergrundstrahlung über das Firmament. Die Darstellung ist nach Abzug aller Störeffekte ein „Fleckenteppich" unterschiedlicher Temperaturen bzw. Photonenenergien. Die Unterschiede lassen sich unter anderem damit erklären, dass bereits im frühen Kosmos Bereiche mit unterschiedlicher Massenkonzentration existierten.



3) Erkläre, wie sich aufgrund der Gravitation die Energie, die Frequenz sowie die Wellenlänge eines Photons ändert, wenn sich dieses von einem Bereich mit hoher Massenkonzentration entfernt!

<u>Lösung</u>:

zu 1) Die Abnahme der Temperatur der kosmischen Hintergundstrahlung ist eine Folge der kosmologischen Rotverschiebung infolge der Expansion des Universums.

zu 2) Siehe Kap. II, S. 60.

zu 2) Die Wellenlänge des Photons wird größer und die Frequenz kleiner. Beim Verlassen einer hohen Massenkonzentration verliert die Strahlung Energie (Gravitationsrotverschiebung).

Quellen und weiterführende Literatur:

Steven Weinberg: Die ersten drei Minuten – Die Entstehung des Universums, Piper-Verlag, 1997

Harald Fritzsch: Vom Urknall zum Zerfall – Die Welt zwischen Anfang und Ende, Piper-Verlag, 1990

Andreas Müller: Schwarze Löcher, Spektrum-Akademischer Verlag, 2010

Andreas Müller: Raum und Zeit, Spektrum-Verlag, 2013

Ralf Klessen: Sternentstehung, Spektrum-Verlag, 2007

Harald Lesch: Ohne Quantenmechanik geht gar nichts, schon gar kein Universum, in „Quanten 3", herausgegeben von Konrad Kleinknecht, Hirzel-Verlag, 2015

M. Camenzind, Astronomie und Kosmologie, S. 401 bis 428 (kosmische Hintergrundstrahlung)

G. Hasinger: Die Zukunft des Universums

Nadine Wehmeier: Skript zum Seminarvortrag: Primordiale Nukleosynthese

Matthias Bartelmann, Elena Sellentin: Kosmologische Kuriositäten, Teil2: Entfernungsbestimmung und Blick in die Vergangenheit, in „Sterne und Weltraum", März 2013 (S. 50 bis 61)

Astronomie und Raumfahrt, Erhard Friedrich Verlag:

Heft 6/2015: Kosmische Inflation (S. 29 bis 35)

Heft 2/2000: Die Entwicklung der Materieverteilung im Universum (S. 23)

Heft 1/2011: Kosmochemie – wie die Teilchen in die Welt kamen (S. 11 bis 16)

Heft 2/2000: Der kosmische Mikrowellenhintergrund (S. 8 bis 11)

Heft 5/2008: Strukturen am Mikrowellenhimmel (S. 10 bis 13)

Heft 9/2013: Der Himmelscode, Das Echo des Urknalls (S. 40 bis 51)

Heft 2/2000: Die Entstehung von Galaxien (S. 12 bis 15)

Heft 6/2013: Klassifikation und Entstehung heutiger Galaxien (S. 5 bis 8)

Heft 6/2013: Raumzeitliche Galaxienbildung im primordialen Universum (S. 21 bis 25)

Heft 2/2000: Vom Urknall zu großen Strukturen (S. 4 bis 7)

Heft 6/2015: Albert Einstein und Georges Lemaître - Begründer der modernen Kosmologie (S. 8 bis 11)

Heft 5/2008: Die Zukunft des Universums (S. 14 bis 18)

Heft 3_4/2017: Der statische Kosmos von Einstein aus dem Jahre 2017 (S. 10 bis 13)

Heft 6/2015: Eine Reise durch das expandierende Universum (S. 12 bis 17)

Heft 6/2008: Die Zukunft der Galaxis (S. 42 bis 7)

Heft 3_4/2011: Unsere Galaxie und M31 auf Kollisionskurs (S. 69 bis 72)

Kosmos Himmelsjahr:

Kosmos Himmelsjahr 2016: Auf den Spuren des Urknalls (S. 69 bis 75)

Bild der Wissenschaft:

Heft 11/2009: Urknall (S. 40 bis 56)

Heft 7/2008: Die Korrektur (Steven Hawkings Alternative zum Urknall) (S. 48 bis 55)

Heft 2/2009: Kurz nach dem Urknall (Inflation) (S. 38 bis 47)

Heft 2/2009: Als der Weltraum flüssig war (Quark-Gluonen-Plasma) (S. 48 bis 53)

Heft 9/2013: kosmische Hintergrundstrahlung (S. 40 bis 59)

Heft 7/2016: Die schwere Geburt der Galaxis (S. 38 bis 47)

Heft 4/2010: Weltall in der Schockstarre (Dunkle Energie) (S. 42 bis 51)

Heft 7/2016: Die schwere Geburt der Galaxis (S. 38 bis 47)

Spektrum der Wissenschaft:

August 2011: Kosmische Inflation auf dem Prüfstand (S. 40 bis 48)
Juni 2012: Die ferne Zukunft der Sterne (S. 40 bis 47)

Naturwissenschaften im Unterricht Physik

Heft 155 Spuren des Urknalls (S. 18 bis 20)

Filme:

Robert Zimmermann: Blick in die Sterne - Die Entdeckung des Universums

Themen für Seminararbeiten und Referate:

- **Die Urknallhypothese**

→ Schwächen der Urknallhypothese und Alternativen zum Urknall

- **Die kosmische Hintergrundstrahlung**

→ Der Planck-Satellit

- **Die kosmische Inflation**

→ Das Horizontproblem

- **Die primordiale Nukleosynthese**

→ Die Entstehung der ersten Atomkerne

- **Kosmologische Weltmodelle**

→ Das Newtonsche Weltmodell