



Arnold Hanslmeier

Neue Fenster in das Universum

Von Hubble-, James-Webb-
und anderen Großteleskopen
bis zu Gravitationswellendetektoren

SACHBUCH

 Springer

Neue Fenster in das Universum

Arnold Hanslmeier

Neue Fenster in das Universum

Von Hubble-, James-Webb- und anderen
Großteleskopen bis zu
Gravitationswellendetektoren

 Springer

Arnold Hanslmeier
Institut für Physik
Universität Graz
Graz, Österreich

ISBN 978-3-662-67745-2 ISBN 978-3-662-67746-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-67746-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Gabriele Ruckelshausen

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Vorwort

Astronomie ist die älteste der Naturwissenschaften. Die Beschäftigung mit den Sternen erfolgte bereits in den alten Kulturen aus einem ganz praktischen Bedürfnis heraus: man benötigte eine Einteilung der Zeit, einen *Kalender*, und für die Seefahrt bzw. ausgedehnte Reisen auf dem Lande war eine *Navigation* unerlässlich. Beides beruht auf astronomischen Vorgängen wie z. B. dem Umlauf der Erde um die Sonne (ein Jahr), dem Umlauf des Mondes um die Erde (etwa ein Monat), eine Erdrotation (ein Tag) oder die Höhe des Himmelspols (Polarstern, zeigt gegenwärtig die geographische Breite des Beobachtungsortes an). Neben dieser klassischen Astronomie hat sich die *Astrophysik* insbesondere seit der Erfindung des Teleskops, der Entdeckung des Gravitationsgesetzes und anderer Gesetze der Himmelsmechanik, sowie die Erklärung der Strahlung und der Spektrallinien entwickelt.

In den ersten Teilen des Buches werden diese grundlegenden Gesetze mit einfachen Mitteln erläutert. Für besonders interessierte Leserinnen und Leser gibt es immer wieder kurze mathematische Einschübe, die besonders gekennzeichnet sind, die jedoch – ohne den Zusammenhang zu verlieren- weggelassen werden können. Es werden moderne Großobservatorien vorgestellt: die Teleskope der europäischen Südsternwarte ESO, die Teleskope auf Hawaii und auf den kanarischen Inseln; auch das noch im Bau befindliche 40-m Teleskop der ESO wird vorgestellt. Mit diesen Teleskopen gelangen und gelangen immer noch bahnbrechende Erkenntnisse: Exoplaneten um andere Sterne wurden entdeckt, in seltenen Fällen auch direkt fotografiert. Die von der *allgemeinen Relativitätstheorie* vorhergesagte Krümmung von Raum-Zeit konnte direkt anhand von verzerrten extrem weit entfernten Galaxien beobachtet werden. Sterne nahe des Zentrums unserer Milchstraße zeigten eine Bewegung innerhalb weniger Jahre um etwas, was wir nicht sehen können: ein *supermassives Schwarzes Loch*.

Der Blick in die Tiefen des Universums ist immer auch ein Blick in die Vergangenheit wegen der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes. Noch vor gut 100 Jahren dachte man, das Universum sei so groß wie die Milchstraße, aber E. Hubble konnte mit einem für heutige Verhältnisse nur mittelgroßem Teleskop zeigen, dass es Milliarden von Galaxien gibt, ähnlich der aus mehreren 100 Mrd. Sternen bestehenden Milchstraße und dass sich das Universum ausdehnt.

Aber was wir mit unseren Augen sehen ist nur ein winziger Ausschnitt des gesamten elektromagnetischen Spektrums. Wir widmen uns zunächst der Frage, was Licht eigentlich ist und stoßen dabei auf die Quantenphysik. Wir erklären die dunklen Linien im zerlegten Licht, die es uns ermöglichen die Zusammensetzung von Galaxien anzugeben, die Milliarden Lichtjahre von uns entfernt sind. Und wir zeigen, aus welcher Zeit der Entwicklung des Universums das erste Licht stammt, das wir empfangen können; wegen der starken Rotverschiebung ist diese Strahlung im Mikrowellenbereich zu beobachten. Wir sehen hier die ersten Strukturen im Universum.

Neue Fenster in das Universum bedeutet, dass man heute den Kosmos in praktisch allen Wellenlängen studieren kann: von den extrem kurzwelligen Röntgenstrahlen bis hin zu den langen Radiowellen. Es ist sogar gelungen, was Einstein, der Begründer der allgemeinen Relativitätstheorie nicht für möglich hielt: Gravitationswellen konnten direkt nachgewiesen werden; diese entstanden durch die Kollision zweier schwarzer Löcher in mehreren 100 Mrd. Lichtjahren Entfernung zu uns. Da die Erdatmosphäre nur sichtbares Licht bzw. einen kleinen Bereich im Infraroten und einen Teil des Radiobereichs durchlässt, ist man auf Teleskope im Weltraum angewiesen. Das erste große Weltraumteleskop war das *Hubble Teleskop*, welches mit einer Raumfähre in den Erdumlauf gebracht wurde, was sich als großes Glück herausstellte, denn es musste repariert werden um wirklich die ersehnten scharfen Bilder zu bekommen. Gegenwärtig liefert das *James Webb Teleskop*, *JWST* erstaunliche Bilder, vorwiegend im Infrarotbereich. Wir werden zeigen, weshalb dieser Wellenbereich für AstrophysikerInnen so bedeutsam ist. Aber weiterhin gibts es auch riesige astronomische Projekte auf der Erde. Exotisch anmutende Detektoren, mit deren Hilfe man Neutrinos von der Sonne und mehr als 100 000 Lichtjahre entfernten Supernovae erkennen kann. Weltweit vernetzte Radioteleskope, mit denen man erstmalig ein „Bild“ des sich im Zentrum von Galaxien befindlichen supermassiven schwarzen Lochs erhielt usw.

Eines steht außer Frage: je empfindlicher die Instrumente desto mehr Details wird man erfahren und vielleicht auch die drei großen Fragen der modernen Astrophysik lösen:

- Gibt es Dunkle Materie und wie kann man diese erklären?
- Gibt es Dunkle Energie und wie kann man diese erklären?
- Sind wir alleine im Universum?

Moderne Astrophysik ist ohne die Erkenntnisse der Relativitätstheorie und der Quantenphysik undenkbar. Sie hat aber auch wesentlich zur Weiterentwicklung der modernen Physik beigetragen. Ich lade sie, liebe Leserin, lieber Leser, ein auf einen Streifzug durch die moderne Astrophysik, die moderne Physik, die uns neue Fenster in das Universum bietet, Fantastisches entdecken lässt, zum Staunen führt, aber auch viele neue Fragen aufwirft. Einen Einstieg in die moderne Astrophysik findet man in [5] bzw. [9] und [13].

Nochmals sei betont: man kann das Buch kapitelweise lesen, die mathematischen Einschübe und Beispiele auslassen oder sich natürlich auch darin erfreuen.

Ich bedanke mich sehr herzlich beim Lektorat des Springer Verlages, für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und danke allen Kolleginnen und Kollegen die mich in zahlreichen Diskussionen begleitet haben. Besonderer Dank auch an meine Lebensgefährtin Anita, meinem Sohne Roland der mich musikalisch bei einigen öffentlichen Vorträgen begleitet sowie bei meinen Töchtern Christina und Alina, deren Familien und bei Jacqueline.

Graz, Bad Gleichenberg
Mai 2023

Arnold Hanslmeier

Inhaltsverzeichnis

1 Das Licht der Sterne	1
1.1 Sonne – Sterne – Planeten	1
1.1.1 Die Sonne	2
1.1.2 Planeten	4
1.1.3 Sterne	5
1.2 Die Strahlung der Sterne und Planeten	5
1.2.1 Ein Gesetz für die Strahlung?	5
1.2.2 Die Helligkeit der Sterne wird gemessen	7
1.2.3 Entfernungen der Sterne	7
1.2.4 Die Strahlung der Planeten	8
1.3 Was ist eigentlich Licht	10
1.3.1 Licht als Teilchen	10
1.3.2 Licht als eine Welle	12
1.3.3 Licht und Quantenphysik	13
1.3.4 Spektrallinien im Spektrum	15
1.3.5 Der Dopplereffekt	16
1.3.6 Geschwindigkeiten im Universum messen	18
2 Teleskope – Augen in das Universum	21
2.1 Grundtypen von Teleskopen	21
2.1.1 Linsen	21
2.1.2 Spiegel	24
2.1.3 Linsen- und Spiegelteleskope	26
2.1.4 Vergrößerung und Auflösungsvermögen eines Teleskops	29
2.2 Die Erdatmosphäre	31
2.2.1 Die Durchlässigkeit der Erdatmosphäre	31
2.2.2 Wann gehen Sonne und Mond auf?	32
2.2.3 Die turbulente Erdatmosphäre oder weshalb Sterne funkeln	33
2.2.4 Das menschliche Auge; unser natürlicher Detektor	36
2.2.5 CCD	38

2.2.6	Fotografie	39
2.2.7	Der Blick ins Fernrohr	39
2.3	Die Helligkeiten der Sterne	40
2.3.1	Wie hell leuchten Sterne eigentlich	40
2.3.2	Die absolute Helligkeit	42
2.4	Einige Beispiele für historische Teleskope	43
2.4.1	Von der Erfindung des Teleskops zu ersten großen Fernrohren ...	43
2.4.2	Praktikum für Interessierte: Sonnenflecken beobachten	47
2.4.3	Neue Planeten im Sonnensystem	48
2.5	Moderne Großteleskope	52
2.5.1	Die Brennweite bestimmt die Bildgröße	52
2.5.2	Das größte Sonnentelскоп	52
2.5.3	Die Europäische Südsternwarte, ESO	53
2.5.4	Observatorien auf den Kanarischen Inseln	57
2.5.5	Teleskope auf Hawaii	61
3	Licht vom Rande des Universums – die Welt der Galaxien	67
3.1	Größe und Expansion des Universums	67
3.1.1	Unser Milchstraße- die Heimat im Kosmos	67
3.1.2	Galaxien-Bausteine des Universums	69
3.1.3	Die Expansion des Universums	75
3.1.4	Das Universum hat einen Anfang	76
3.2	Das Universum wird kälter	78
3.2.1	Experiment mit der Fahrradpumpe	78
3.2.2	Der Blick in die Vergangenheit	79
3.2.3	Glühen aus der Zeit des Urknalls	81
3.2.4	Dem ersten Licht auf der Spur	84
3.3	Die Entstehung der chemischen Elemente	85
3.3.1	Die ersten Drei Minuten – oder die primordiale Kernfusion	85
4	Der Radiohimmel	91
4.1	Was beobachtet man im Radiobereich	91
4.1.1	Radarsignale erforschen Planeten	91
4.1.2	Entdeckung der Radiostrahlung aus dem Universum	94
4.1.3	Wie funktioniert ein Radioteleskop	96
4.1.4	Wie entsteht Radiostrahlung	97
4.2	Schwarze Löcher	100
4.2.1	Schwarze Löcher und Sternentwicklung	100
4.2.2	Supermassive Schwarze Löcher	105
4.2.3	Das Monster sichtbar machen	107
4.2.4	ALMA	110

5	Gravitationswellen – ein neues Fenster in den Kosmos	115
5.1	Allgemeine Relativitätstheorie	115
5.1.1	Einstein und die Relativität	115
5.1.2	Von der speziellen zur allgemeinen Relativitätstheorie	119
5.2	Was sind Gravitationswellen?	122
5.2.1	Wellen	122
5.2.2	Wie entstehen Gravitationswellen	123
5.2.3	Wenn Sterne kollidieren	125
5.2.4	Kollision zweier Neutronensterne	126
5.2.5	Eigenschaften und Nachweis der Gravitationswellen	127
5.2.6	Das Spektrum der Gravitationswellen	129
5.3	Die erste direkte Beobachtung von Gravitationswellen	130
5.3.1	Weitere Messungen	132
5.3.2	Dunkle Materie und Gravitationswellen	133
6	Neutrinos – Geisterteilchen	135
6.1	Was sind Neutrinos	135
6.1.1	Ein ganzer Zoo an Teilchen	135
6.1.2	Wie elementar sind Protonen und Neutronen	137
6.1.3	Neutrinos	141
6.2	Neutrinos entdecken	143
6.2.1	Das erste Neutrinoobservatorium	143
6.2.2	Weitere Neutrinooteleskope	144
6.3	Woher kommen Neutrinos aus dem Universum	145
6.3.1	Das Problem der Sonnenneutrinos	145
6.3.2	Neutrinos von einer Supernovaexplosion	150
7	Das Hubble Weltraumteleskop	155
7.1	Planung, Start, Probleme	155
7.1.1	Erste Ideen	155
7.1.2	Vorläufermissionen	156
7.2	Die große Enttäuschung	160
7.2.1	Ein Fehler in der Optik...	160
7.2.2	Der Fehler wird behoben	161
7.3	Instrumente des Hubble Teleskops	161
7.3.1	Wie sieht ein Weltraumteleskop aus?	161
7.3.2	Instrumente an Bord des HST	165
7.4	Einige Beobachtungsergebnisse mit dem Hubble Teleskop	166
7.4.1	Sonnensystem	166
7.4.2	Sterne, Nebel	169
7.4.3	Galaxien	175
7.4.4	Ein Blick in das frühe Universum: Das Hubble Deep Field	178

8 Das James Webb Teleskop	185
8.1 Planung	185
8.1.1 Erste Ideen für den Nachfolger des Hubble Teleskops	185
8.1.2 Schwierigkeiten	187
8.1.3 Der Start	188
8.2 Aufbau und Instrumente des JWST	188
8.2.1 Konstruktion des Teleskops	188
8.2.2 Wo befindet sich das James Webb Teleskop?	189
8.3 Basisversorgung und Instrumente	191
8.3.1 Versorgungseinheit, Energieversorgung	191
8.3.2 Lagekontrolle, Kommunikationssystem	192
8.3.3 Antrieb	193
8.3.4 Das Sonnenschild	194
8.3.5 Die Optik	194
8.4 Instrumente des JWST	196
8.4.1 Die Near Infrared Camera	196
8.4.2 MIRI	196
8.4.3 NIRSpec, FGS-NIRIS	196
8.5 Erste Bilder	197
8.5.1 Planetensystem	198
8.5.2 Exoplaneten	199
8.5.3 Sterne	204
8.5.4 Galaxien und das frühe Universum	206
Literatur	213
Stichwortverzeichnis	215



Astronomie zeichnet sich unter den anderen Wissenschaften durch eine Besonderheit aus: wir sind passive Beobachter. Wegen der großen Entfernungen kann man Planeten, Sterne, Galaxien nur passiv untersuchen. Die einzige Informationsquelle ist deren Strahlung. Aus der Strahlung der Himmelsobjekte muss man also deren Physik herauslesen und typische Größen wie:

- Entfernung,
- Masse,
- Temperatur,
- Zusammensetzung,
- Magnetfelder,
- Alter usw.

bestimmen.

In diesem Kapitel wollen wir einige physikalische Prinzipien erläutern, wie aus dem Licht der Sterne usw. diese Informationen gewonnen werden.

1.1 Sonne – Sterne – Planeten

In diesem Abschnitt behandeln wir die Sonne, die Sterne sowie Planeten. Was ist der Unterschied zwischen einem Stern und einem Planeten? Wie können wir Informationen über weit entfernte Sterne bekommen, die wir wohl nie erreichen werden? Weshalb leuchten Sterne überhaupt? Neben diesen grundlegenden Fragen wird auch dargestellt, wie wir Informationen aus der Strahlung der Sterne bekommen.

1.1.1 Die Sonne

Ein beliebte Frage lautet: „wie heißt unser nächster Stern“. Es kommen dann die unterschiedlichsten Antworten, z. B. Alpha Centauri oder Proxima Centauri. Die meisten vergessen jedoch, dass der nächste Stern unsere Sonne ist. Die Sonne ist jedoch der einzige Stern, dessen Oberfläche wir im Detail studieren können: wir beobachten dunkle Sonnenflecken, deren Durchmesser den Erddurchmesser übertreffen kann, riesige Materieausbrüche, sogenannte *Koronale Massenauswürfe*, wo Milliarden Tonnen Materie in den Weltraum von der Sonne weg geschleudert werden (Abb. 1.1), Energieausbrüche, sogenannte *Flares*, bei denen innerhalb weniger Minuten Energie freigesetzt wird, die mehreren Millionen Wasserstoffbombenexplosionen auf der Erde entspricht und vieles mehr. Die große Bedeutung der Sonne, des Sterns vor unserer Haustüre, für das Leben auf der Erde wurde schon von den alten Kulturvölkern erkannt und die Sonne wurde oft als Gott verehrt (Z. B. der ägyptische Sonnengott Ra).

Ohne Sonne gäbe es kein Leben auf der Erde. Aber die Erforschung der Sonne spielt für die gesamte Astrophysik eine große Rolle. Aktivitätsphänomene wie Sonnenflecken, Magnetfeldschleifen usw. (Abb. 1.2) lassen sich bei anderen Sternen nur indirekt nachweisen. Aber man kann die Sonne auch mit anderen Sternen vergleichen und kommt so zur Frage, ob unsere Sonne ein besonderer Stern ist oder ob viele Sterne ähnlich sind wie unsere Sonne. Dies ist auch wichtig, wenn wir uns mit der Thematik *Leben im Universum* beschäftigen: daraus hat sich ein ganzer Wissenschaftszweig, *Astrobiologie*, entwickelt. Es zeigt sich, dass Leben, wie wir es von der Erde her kennen, einen Planeten voraussetzt, der um einen sonnenähnlichen Stern kreist. Unter einem sonnenähnlichen Stern verstehen wir ein Objekt mit etwa der Masse der Sonne, der Temperatur der Sonne und der Ausdehnung der Sonne. Diese Parameter für die Sonne sind in Tab. 1.1 zusammengefasst. Die Sonne ist

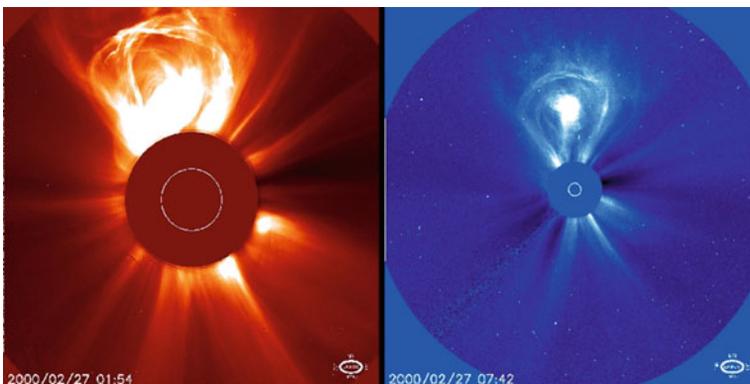


Abb. 1.1 Die Sonne aufgenommen von einem Satelliten. Das Bild zeigt einen koronalen Massenauswurf. Die Sonnenscheibe selbst ist abgedeckt und durch den Kreis skizziert. Man beachte die Dimensionen. Die Sonnenscheibe hat den 109-fachen Erddurchmesser. SOHO/ESA/NASA

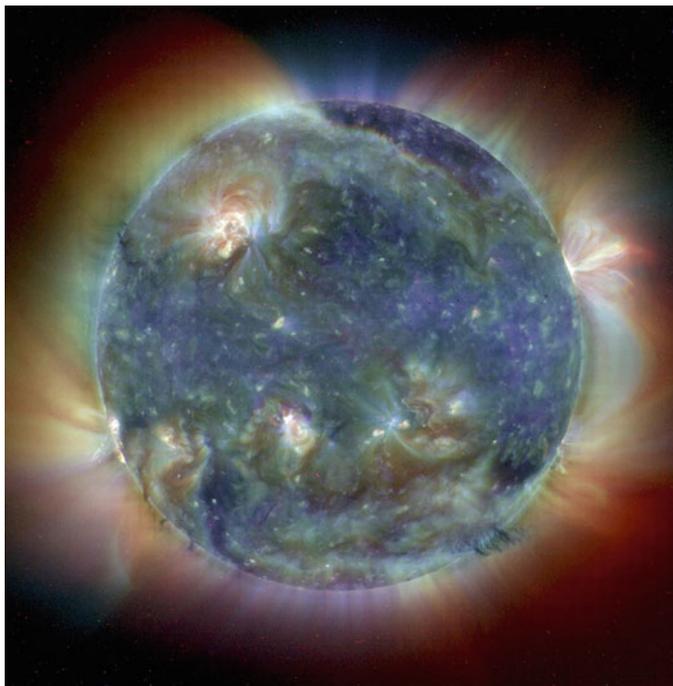


Abb. 1.2 Die Sonne aufgenommen von einem Satelliten. Das Bild zeigt die Sonne im kurzwelligen UV Licht. Die schleifenförmigen Strukturen werden durch Anordnung des heißen Sonnenplasmas durch Magnetfelder in der höheren Atmosphäre der Sonne verursacht. Solar Orbiter, ESA/NASA

das hellste Objekt am Himmel, aber es gibt Sterne, die bis zu 10 000mal und mehr heller leuchten als die Sonne. Die Sonne erscheint uns nur auf Grund ihrer Nähe als hellstes Objekt. Die Entfernung Erde-Sonne beträgt etwa $150\,000\,000\text{ km}^1$. Licht breitet sich mit einer Geschwindigkeit von $300\,000\text{ km/s}$ aus. Man kann leicht ausrechnen, wie lange das Licht von der Sonne zur Erde benötigt:

$$t = \frac{150\,000\,000\text{ km}}{300\,000\text{ km/s}} \sim 500\text{ s} \quad (1.1)$$

Das Licht benötigt also etwa 8 min von der Sonne zur Erde. Wenn wir die Sonne in diesem Augenblick beobachten, sehen wir Licht das vor 8 min zu uns gesandt wurde.

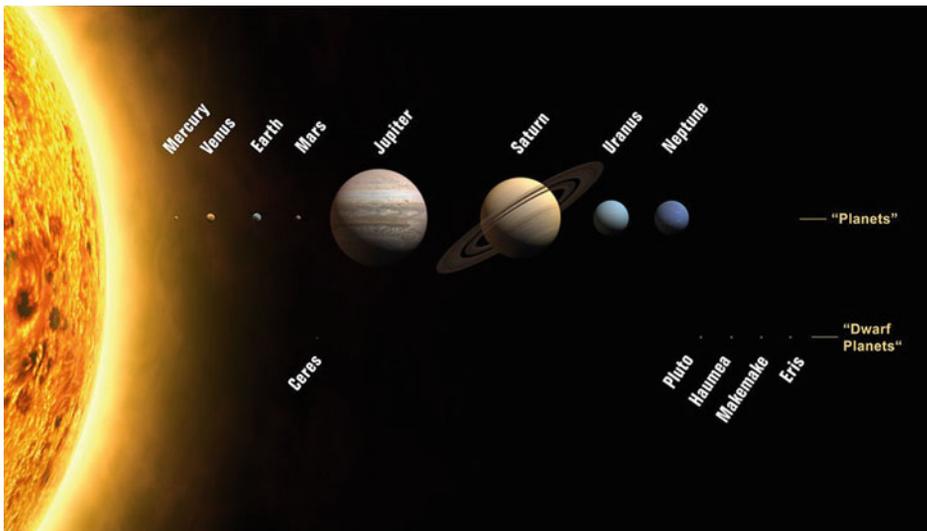
¹ Dies wird auch als *Astronomische Einheit*, *AE*, bezeichnet.

Tab. 1.1 Wichtige Daten für unsere Sonne

Parameter	Wert	bezogen auf die Erde
Größe	1 400 000 km	109
Masse	2×10^{30} kg	330 000
Temperatur	Oberfläche: 6000 K, Zentrum: 12 Mio. K	Erde: global etwa 15 °C

1.1.2 Planeten

Die Sonne ist der größte Körper des Sonnensystem. Fasst man die Masse aller 8 großen Planeten (Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun), sowie aller anderen Himmelskörper (Zwergplaneten, Asteroiden usw.) zusammen, so beträgt diese Masse nur etwa 0,2% der Masse der Sonne. Dies ist auch in Abb. 1.3 skizziert. Diese Abbildung zeigt einen Größenvergleich der Sonne mit den Planeten. Die Abstände von der Sonne nicht maßstabsgetreu. Von der Sonne aus gesehen ist die Erde der dritte Planet. Von der Größe her ist unser Heimatplanet größer als Merkur, Mars und Venus, jedoch kleiner als Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Der größte Planet im Sonnensystem ist Jupiter mit etwa 10-Fachem Erddurchmesser. Der Erddurchmesser beträgt etwa 12 756 km.

**Abb. 1.3** Vergleich Sonne, Planeten und anderer Körper des Sonnensystems

1.1.3 Sterne

Unser nächster Stern, die Sonne, ist nur einer unter mehreren 100 Mrd. Sternen der *Milchstraße*, der *Galaxis*. Aber diese Sterne sind wesentlich weiter von uns entfernt als die Sonne und daher selbst in den größten Teleskopen der Welt nur punktförmig zu sehen. Damit sind wir schon bei dem größten Problem der Astrophysik: man kann mit den Objekten nicht experimentieren, die einzige Information, die wir von den Sternen direkt bekommen, ist deren Strahlung. Aufgabe der Astrophysik ist es, aus der Strahlung der Sterne alle physikalisch relevanten Information abzuleiten. Sterne leuchten selbst, die dazu notwendige Energie stammt meist aus der im Inneren eines Sternes ablaufenden Kernfusion, bei der leichtere Elemente zu schwereren Elementen fusioniert werden.

- ▶ Die Sonne ist unser nächster Stern und einer unter mehreren hundert Milliarden Sternen der Milchstraße, der Galaxis.

1.2 Die Strahlung der Sterne und Planeten

1.2.1 Ein Gesetz für die Strahlung?

Keine leichte Aufgabe, die Physik der Sterne aus der *Strahlung* der Sterne abzuleiten. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts konnte der Physiker *Max Planck* (1848–1947) die Strahlung eines *Schwarzen Körpers* mit einer einfachen Formel beschreiben. Was versteht man unter dem Begriff Schwarzer Körper? Die Definition wurde im Jahre 1859 von *G. R. Kirchhoff* gegeben. Ein Schwarzer Körper ist ein Objekt welches jegliche Strahlung absorbiert und nicht reflektiert. Man könnte sich einen Schwarzen Körper als einen Hohlraum vorstellen, der nur eine winzige Öffnung besitzt. Doch weshalb beschäftigen wir uns mit einem solchen Modell? Zum Glück ist die Strahlung der meisten Objekte (Sterne, Planeten usw.) der eines Schwarzen Körpers sehr ähnlich, und wir können daher die Strahlungsgesetze auf sie anwenden.

Man kann Licht mittels eines Prismas oder Gitters zerlegen. Man kennt dies z. B. vom Regenbogen her. Hier wird Sonnenlicht durch feine Wassertropfchen in der Erdatmosphäre in Farben zerlegt. Die Farben bedeuten nichts anderes als unterschiedliche Wellenlängen. Blaues Licht unterscheidet sich von rotem Licht nur durch die Wellenlänge:

- blaues Licht: Wellenlänge um 400 nm^2
- rotes Licht: Wellenlänge um 600 nm .

² $1 \text{ nm} = 1 \text{ Nanometer} = 10^{-9} \text{ m} = \text{ein Milliardenstel Meter}$.

Der Physiker *W. Wien* (1864–1928) konnte anhand des Planck Gesetzes zeigen, dass das Produkt aus der Wellenlänge, bei der ein Objekt am hellsten leuchtet, und dessen Temperatur konstant ist. Das Wien'sche Gesetz lautet:

$$T \lambda_{\max} = \text{const} \quad (1.2)$$

Daraus folgt: je heißer ein Objekt, desto mehr strahlt es im kurzwelligeren Bereich. Damit sind wir mit *bloßem Auge* in der Lage die *Temperatur von Sternen* abzuschätzen. Betrachten sie doch mal helle Sterne am Himmel. Sie werden erkennen, dass es Sterne gibt, die eher rötlich leuchten, Sterne die gelblich leuchten und sogar Sterne, die weiß bis leicht blau leuchten. Wir wissen nun was das bedeutet: blaue Sterne sind wesentlich heißer als gelb leuchtende, die wiederum heißer als rötlich leuchtende sind.

► Die Farbe der Sterne ist ein Maß für deren Temperatur.

- blaue Sterne: Temperatur etwa 40 000 K³
- gelbe Sterne: Temperatur etwa 6000 K
- rote Sterne: Temperatur etwa 3000 K.

Ein schönes Beispiel für zwei nahe beieinander stehende Sterne ist in Abb. 1.4 gegeben. Die Sterne haben unterschiedliche Farben und somit unterschiedliche Temperaturen.



Abb. 1.4 Der Doppelstern Albireo im Sternbild Schwan. Zwei Sterne unterschiedlicher Temperatur. Die Temperaturen betragen etwa 14 000 K und 4000 K

³ K steht für Kelvin; die Kelvin Skala beginnt bei der tiefsten Temperatur 0 K = −273,2 °C.

1.2.2 Die Helligkeit der Sterne wird gemessen

Wie hell Sterne leuchten hängt von zwei Faktoren ab: (i) deren tatsächlicher Leuchtkraft (ii) deren Entfernung. Sterne könne uns sehr hell erscheinen, obwohl sie in Wirklichkeit nur geringe Leuchtkraft besitzen, weil sie uns sehr nahe stehen. Seit dem Altertum teilt man die *scheinbare Helligkeit* der Sterne in Größenklassen ein: man bezeichnet Sterne, die am hellsten erscheinen, als Sterne erster Größe und Sterne, die gerade noch mit bloßem Auge zu sehen sind (allerdings nur bei völliger Dunkelheit), als Sterne 6. Größe. Diese Skala hat man dann ausgedehnt um auch sehr helle Objekte zu erfassen, sie geht also auch ins Negative: der Vollmond hat z. B. eine scheinbare Helligkeit von -12 Größenklassen.

Neben dieser scheinbaren Helligkeit, die durch ein hochgestelltes m angegeben wird⁴ gibt es die *absolute Helligkeit*. Darunter versteht man die scheinbare Helligkeit, die ein Objekt in einer bestimmten Entfernung haben würde. Die absolute Helligkeit wird durch ein hochgestelltes M angeben.

Eine wichtige Eigenschaft von *Teleskopen* ist es, möglichst viel Licht einzusammeln. Je größer die *Öffnung* (der Linse oder des Spiegels) eines Teleskops, desto mehr Licht wird gesammelt und man kann auch schwächer leuchtende Objekte erkennen.

1.2.3 Entfernungen der Sterne

Die Entfernungen der Sterne haben nichts mit deren Eigenschaften zu tun. Wenn man jedoch den Aufbau der Galaxis untersuchen will, ist es wichtig die Entfernungen der Sterne zu kennen. Eine sehr einfache Methode zur Entfernungsbestimmung von Sternen ist die *Parallaxenmethode*. Parallaxe bedeutet, dass sich die Position eines nahen Objektes von zwei auseinander liegenden Punkten beobachtet, relativ zu einem weit entfernten Hintergrund ändert.

Friedrich Wilhelm Bessel bestimmte im Jahre 1838 die Parallaxe des Sternes *61 Cygni*. Die Erde bewegt sich im Laufe eines Jahres um die Sonne. Deshalb scheinen sich relativ nahe gelegene Sterne vor einem weit entfernten Hintergrund im Laufe eines Jahres hin- und her zu bewegen (Abb. 1.5). Der Winkel der jährlichen Parallaxe ist dann gegeben durch das Verhältnis des Radius der Erdbahn zur Entfernung des Sternes. Da der Winkel kleiner als 1 Bogensekunde⁵ ist, war er nur durch äußerst präzise Messungen bestimmbar. Mit modernen Messungen durchgeführt durch Satelliten kann man heute Winkel unter $1/1000''$ bestimmen.

Die Entfernung der Sterne gibt man in Lichtjahren an. Ein Lichtjahr ist die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt.

Licht breitet sich mit einer Geschwindigkeit von $300\,000\text{ km/s}$ aus. Ein Jahr hat etwa 365 Tage, ein Tag hat 24h, eine Stunde hat 3600 s. Somit hat ein Jahr etwa 30 Mio. Sekunden und wir bekommen für ein Lichtjahr:

⁴ m steht für magnitudo, lat. Größenklasse.

⁵ 1 Bogensekunde = $1'' = 1/3600$ Grad.

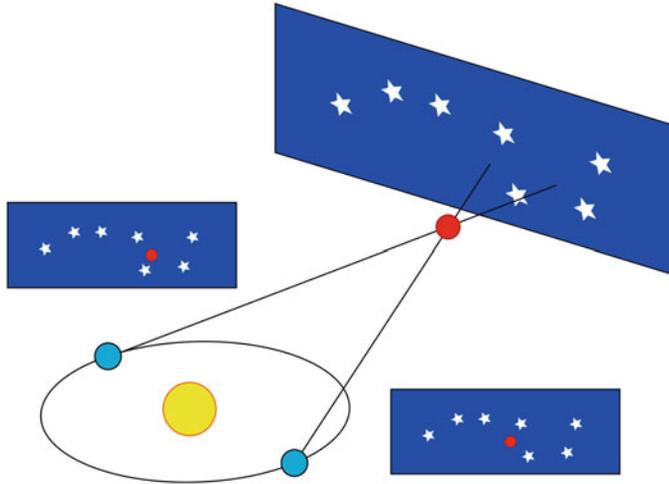


Abb. 1.5 Das Prinzip der jährlichen Parallaxe zur Bestimmung der Entfernung nahe gelegener Sterne (rot) die sich auf Grund der Bewegung der Erde um die Sonne im Laufe eines Jahres vor dem Himmelshintergrund bewegen

$$1 \text{ Lj} = 3 \times 10^5 \text{ km/s} \times 3 \times 10^7 \text{ s} \sim 10^{13} \text{ km} \quad (1.3)$$

Der Stern 61 Cygni ist etwa 11,4 Lichtjahre von uns entfernt. Wir erinnern uns: von der Sonne benötigt das Licht etwa 8 min zur Erde, im Falle von 61 Cygni jedoch 11,4 Jahre. Eine Lichtjahr ist die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Wenn sie also wissen wollen, was auf diesem Stern vor 11,4 Jahren geschehen ist, müssen sie ihn heute Abend beobachten.

► Ein Lichtjahr entspricht 10 Billionen km $= 10^{13}$ km

1.2.4 Die Strahlung der Planeten

Im Gegensatz zu den Sternen leuchten Planeten selbst nicht oder nur sehr schwach. Sie werden von der Sonne (Sonnensystem) bzw. ihrem Mutterstern beleuchtet (Exoplaneten). Seit dem Altertum kennt man 5 Planeten: Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn sowie die Erde, deren Stellung im Sonnensystem aber lange nicht bekannt war. Es gab zwei Vorstellungen:

- *geozentrisches Weltbild*: die Erde ist im Zentrum, alles bewegt sich um die Erde.
- *heliocentrisches Weltbild* (N. Kopernikus 1543): die Sonne ist im Zentrum, Erde und Planeten bewegen sich um diese.

Diese 5 Planeten sind mit bloßem Auge sichtbar. Uranus und Neptun wurden erst im 18. bzw. 19. Jahrhundert mit Teleskopen entdeckt. Planeten, die um andere Sterne kreisen, sind auf Grund der großen Entfernung zu uns immer sehr nahe am Himmel bei ihrem Mutterstern und können kaum gesehen werden. Meist liegt deren Strahlung auch eher im Infraroten, da die Temperaturen gering sind. Aus diesem Grunde ist die Beobachtung von Exoplaneten in diesem Wellenlängenbereich wichtig. Wir erinnern uns an das Wien'sche Gesetz. Je kühler ein Himmelskörper, desto mehr wandert das Maximum seiner Ausstrahlung in den roten Bereich und schließlich in den Infrarotbereich, der jenseits von Rot liegt (Abb. 1.6).

Für Mathematik/Physik Fans: rechnen wir uns aus, wo das Maximum der Sonnenstrahlung ($T = 6000 \text{ K}$) und der Strahlung der Erde liegt ($T = 300 \text{ K}$). Es gilt (Wien'sches Gesetz)

$$T \lambda_{\max} = \text{const} = 2897 \mu\text{m} \quad (1.4)$$

$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$. Wir finden (Zahlenwerte gerundet): (i) Sonne: $\lambda_{\max} = 0,5 \mu\text{m} = 500 \text{ nm}$, (ii) Erde: etwa $10 \mu\text{m}$ also im Infraroten.

Abb. 1.6 Die Erde vom Weltraum aus gesehen. Bereits vom nächsten Stern (abgesehen von der Sonne), Alpha Centauri wäre es einer Zivilisation mit unseren heutigen Mitteln kaum möglich die Erde direkt zu sehen



1.3 Was ist eigentlich Licht

Licht ist elektromagnetische Strahlung könnte man etwas trocken formulieren, aber das verbirgt große Konzepte der modernen Physik. Lange Zeit war nicht klar was denn Licht nun eigentlich sei: eine Welle oder ein Teilchen.

1.3.1 Licht als Teilchen

Was passiert beim Sehen, was ist Licht, wie wird es vom Auge aufgenommen? Es gab sogenannte Emissionstheorien auch als *Korpuskeltheorien* bezeichnet. Man stellte sich vor, dass Licht nichts anderes sei als die Ausbreitung irgendwelcher Teilchen, die man als Korpuskeln bezeichnete. Die ersten bekannten Philosophen die sich mit Licht beschäftigten waren *Pythagoras* (um 570 v.Chr. bis etwa 510 v. Chr.) und *Empedokles* (ca. 495-435 v. Chr.). Weitere Vertreter dieser Theorie waren dann später *Augustinus* (354-430, seiner Ansicht nach gehen beim Sehen Strahlen in Form von Teilchen aus unseren Augen mit denen wir die Umgebung quasi abtasten) und dann die Physiker/Mathematiker *Isaac Newton* (1643–1727, Abb. 1.8), *Pierre Simon de Laplace* (1749–1827), und andere.

Licht hat bestimmte Eigenschaften die eine Theorie erklären muss: es breitet sich geradlinig aus, Lichtstrahlen können reflektiert werden usw. Die Korpuskeltheorie des Lichtes kann diese beiden Phänomene erklären. Die unterschiedlichen Farben erklärte man sich durch unterschiedliche Größe der Korpuskeln. Die Beugung des Lichtes erklärte man sich durch eine Ablenkung der Lichtteilchen; diese werden an Hindernissen angezogen.

Überhaupt vertrat Newton die Ansicht, dass Lichtteilchen von Massen angezogen würden. Man sollte eine Ablenkung des Lichtes durch das Gravitationsfeld der Sonne während einer totalen Sonnenfinsternis messen können. Sterne, die in der Nähe der vom Mond abgedunkelten Sonne sichtbar werden, sollten eine leichte Verschiebung ihrer Position zeigen (Abb. 1.7).

Die Ablenkung des Lichtes durch die Gravitation wurde 200 Jahre später eindrucksvoll bestätigt und auch von Einstein vorhergesagt, allerdings als eine Folge der Raum-Zeitkrümmung. Darauf werden wir noch eingehen. Pierre Simon de Laplace ging noch einen Schritt weiter und glaubte, dass es derart massereiche Sterne geben könnte, sodass auf Grund ihrer starken Anziehung nicht einmal Licht mehr entkommen könne. Wir bezeichnen ein solches Objekt heute als *Schwarzes Loch*.

Johann Georg von Soldner (1776–1833) berechnet die Lichtablenkung bei der Sonne und fand den Wert von $0,84''$. Der Wert der sich aus Einstein's *allgemeiner Relativitätstheorie* ergibt, ist doppelt so groß.

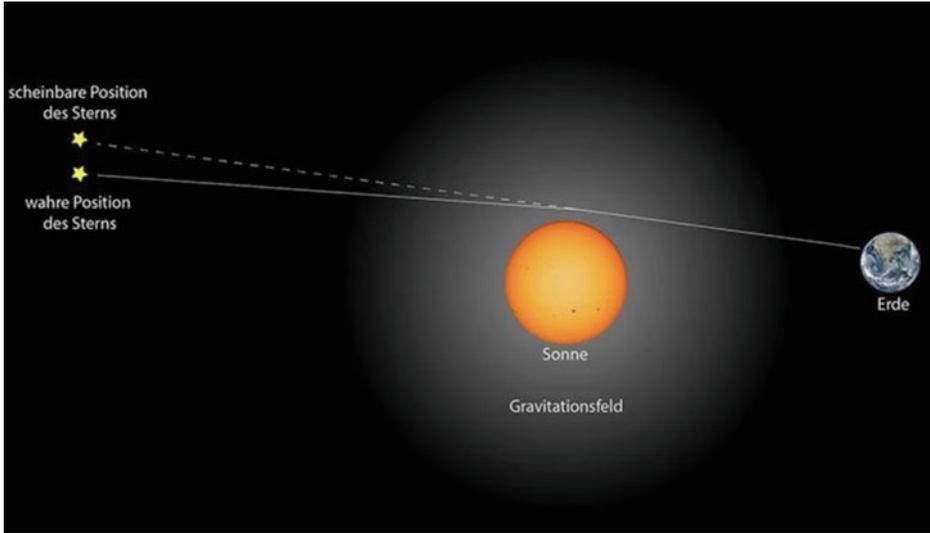


Abb. 1.7 Die Ablenkung eines bei der Sonne vorbeigehenden Lichtstrahls

Abb. 1.8 Isaac Newton, der meinte, dass Licht durch sich ausbreitende Teilchen erklärt werden könnte

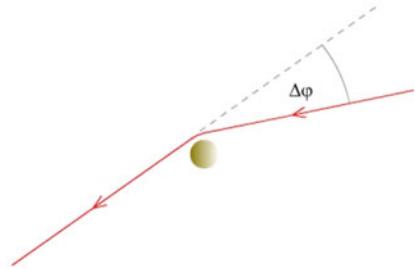


Für mathematisch Interessierte: die Ablenkung eines Lichtstrahls, der in einem minimalen Abstand b an einer Masse M vorbeigeht, beträgt nach der allgemeinen Relativitätstheorie:

$$\Delta\phi = \frac{4GM}{bc^2} \quad (1.5)$$

wobei $G = 6,67 \times 10^{-11}$ die Gravitationskonstante ist und $c = 3 \times 10^8$ die Lichtgeschwindigkeit. Dies ist in Abb. 1.9 skizziert.

Abb. 1.9 Lichtablenkung nahe einer Masse M



1.3.2 Licht als eine Welle

Bestimmte Eigenschaften des Lichtes lassen sich mit der Korpuskulartheorie nicht oder nur unter der Annahme von Hilfshypothesen erklären. Dazu zählt die *Beugung* des Lichtes sowie die *Interferenz* von Licht.

Ganz kurz sei erläutert, wie man eine Welle beschreiben kann:

- Wellenlänge λ Abstand zweier Wellenberge oder Wellentäler
- Auslenkung, *Amplitude*, A . Die Amplitude erreicht die größten Werte bei Wellenberg (positiv) oder Wellental (negativ).

Betrachten wir zwei Wellen, die sich überlagern, man bezeichnet dies als *Interferenz* von Wellen. Wenn die Wellen dieselben Wellenlängen besitzen und die Überlagerung so erfolgt, dass Wellenberge der ersten Welle stets auf Wellenberge der zweiten Welle treffen bzw. dasselbe mit den Wellentälern, dann ist die resultierende Welle von größerer Amplitude. In diesem Falle bezeichnet man beide Wellen als Wellen mit Phasenverschiebung Null (Abb. 1.10 oben).

Doch was geschieht wenn Wellenberge der ersten Welle stets mit Wellentälern der zweiten Welle zusammenfallen? Dann beträgt die Resultierende Null, die beiden Wellen löschen einander aus. Die Phasenverschiebung beträgt hier 90 Grad (Abb. 1.10 unten).

Die Interferenz zweier Wellen kann man z. B. mit 2 Laserstrahlen nachweisen oder direkt bei Wasserwellen beobachten wenn man z.B. zwei Steine in ein ruhiges Gewässer wirft. Wenn Licht ein Wellenphänomen ist, dann kann man die Interferenz zweier Lichtwellen leicht erklären.

Ein weiteres Phänomen von Wellen ist deren Beugung an Hindernissen. Machen wir ein einfaches Gedankenexperiment. Wenn Licht ein Strom von Teilchen wäre der z. B. durch ein Fenster geht, wie kann es dann sein, dass dennoch der gesamte Raum hell wird? Weitere Beugungsphänomene treten auf, wenn eine Welle durch einen Spalt geht. Betrachten wir das berühmte *Doppelspaltexperiment*. Wenn Licht ein Teilchenstrom wäre, müsste man hinter den Spalten 2 Häufungspunkte der Teilchen messen. Ist Licht jedoch ein Wellenphä-