



Präsentationen der Professoren

[Elektromagnetische Wellen, Optische Teleskope](#) 

[Andere Teleskoparten](#) 

Inhaltsverzeichnis

Überblick	2
Elektromagnetische Wellen (Überblick)	2
Gammawellen ($> 10\text{pm}$)	9
Röntgenwellen ($10\text{pm} - 10\text{nm}$)	11
Sichtbares Licht ($400 - 800\text{nm}$)	11
Infrarotwellen ($1 - 500\mu\text{m}$)	14
Radiowellen ($500\mu\text{m} - 30\text{m}$)	15
Neutrinos.....	15
Gravitationswellen.....	16
Indirekte Messungen	18

Überblick

Die meisten Informationen übertragen sich nur durch unsere Atmosphäre. Beispielsweise überträgt sich der Schall nur dadurch, dass immer ein Teilchen das nächste anstößt. Im Weltall passiert das nicht, weil es dort keine Teilchen gibt, im Weltall ist es also immer leise. So ähnlich ist das mit den meisten anderen Informationsflüssen auch. Deshalb gibt es insgesamt nur drei Informationsflüsse, auf die sich die Astronomen beziehen können:

Elektromagnetische Wellen: Zu den elektromagnetischen Wellen gehört auch unser Licht, die meisten sind aber so kurzwellig oder so langwellig, dass sie für unser Auge nicht sichtbar sind. Sie können sich durch das Vakuum ausbreiten, weil immer abwechselnd ein elektrisches von einem magnetischen Feld erzeugt wird und umgekehrt.

Gravitationswellen: Ähnlich wie eine 1-dimensionale Kurve oder eine 2-dimensionale Fläche im 3-dimensionalen Raum gekrümmt sind, so ist auch unsere 4-dimensionale Raumzeit gekrümmt, wobei die Krümmung bei hohen Massen stärker ist. Wenn sich gravitativ etwas ändert, wellt sich dadurch die Raumzeit und das kann man bis zu uns messen.

Neutrinos: Neutrinos sind kleine Elementarteilchen. Das besondere an ihnen ist, dass sie praktisch alles durchdringen können. Das ist einerseits ein Vorteil, weil man dann durch massive Objekte „durchschauen“ kann, andererseits ist es auch sehr schwer, sie zu messen, weil sie auch durch unsere Instrumente durchgehen.

Auch wenn man nichts dergleichen messen kann, kann man etwas über eine Substanz aussagen: Sie beeinflusst ein anderes Objekt und diese Auswirkungen können wir messen. Das nennt man indirekte Messung. Der Großteil unseres Universums (die dunkle Materie und die dunkle Energie) können nur indirekt gemessen werden.

Elektromagnetische Wellen (Überblick)

Bei der Kernfusion in einem Stern wird ein elektrisches Feld erzeugt. Auf diesem elektrischen Feld baut sich ein magnetisches Feld auf. Auf dem magnetischen Feld baut sich wiederum ein elektrisches Feld auf. So geht das abwechselnd hin- und her und dadurch kann diese sogenannte elektromagnetische Welle auch große Distanzen bis zu unserer Erde zurücklegen. Der ganze Vorgang passiert mit Lichtgeschwindigkeit, also mit 300.000km/s.

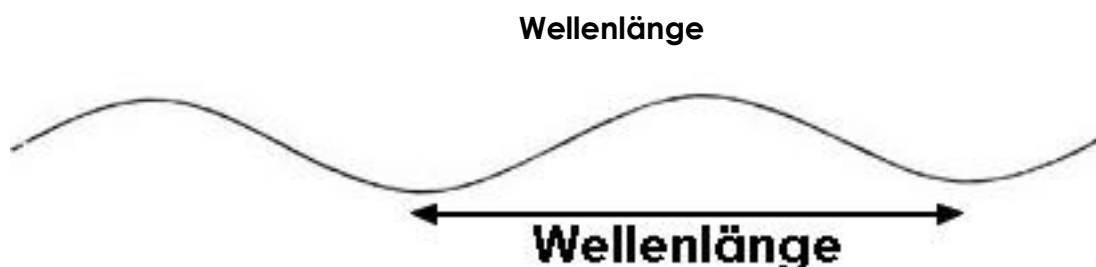


Abb. 5.1.: Wellenlänge

Die Wellenlänge ist die Distanz bis sich die Welle wiederholt. Sie wird in einer Längeneinheit wie zum Beispiel Meter gemessen. Häufig verwendet man aber kleinere Einheiten als Meter (wie in der nachfolgenden Tabelle angeführt), weil die Wellenlänge meistens viel kürzer ist.

Einheit	Abkürzung	In Meter
Pikometer	pm	$1 \times 10^{-12} \text{ m}$
Nanometer	nm	$1 \times 10^{-9} \text{ m}$
Mikrometer	μm	$1 \times 10^{-6} \text{ m}$
Millimeter	mm	$1 \times 10^{-3} \text{ m}$

Elektromagnetische Wellen können Wellenlängen von 10pm bis zu 10m haben. Wenn die Wellenlänge zwischen 400nm und 800nm lang ist, können wir sie als Licht wahrnehmen (je nach Wellenlänge in einer unterschiedlichen Farbe). Auch für alle anderen Wellenlängen haben wir Instrumente entwickelt, die das messen können.

Frequenz

Die Frequenz gibt an, wie oft sich eine Welle innerhalb einer Sekunde wiederholt. Die Einheit dafür ist Hertz. Wenn man die Wellenlänge (in Meter) mit der Frequenz (in Hertz = Wellen pro Sekunde) multipliziert, erhält man die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle (in Meter pro Sekunde). Diese Formel ist logisch, wenn man sich die Einheiten anschaut.

Arten elektromagnetischer Wellen

Die Wellen haben je nach Wellenlänge bzw. Frequenz unterschiedliche Namen, wobei die Abgrenzungen nicht ganz eindeutig sind. In der unten stehenden Tabelle finden sich dazu Richtwerte.

Name	Wellenlänge in Meter	Frequenz in Herz
Gammawellen	$> 10\text{pm}$	$< 10^{20} \text{ Hz}$
Röntgenwellen	$10\text{pm} - 1\text{nm}$	$10^{20} - 10^{17} \text{ Hz}$
UV-Wellen	$1 - 400\text{nm}$	$10^{17} - 10^{16} \text{ Hz}$
Optische Wellen	$400 - 800\text{nm}$	10^{15} Hz
Infrarotwellen	$800\text{nm} - 10\mu\text{m}$	$10^{14} - 10^{13} \text{ Hz}$
Radiowellen	$10\mu\text{m} - 10\text{m}$	$10^{13} - 10^8 \text{ Hz}$

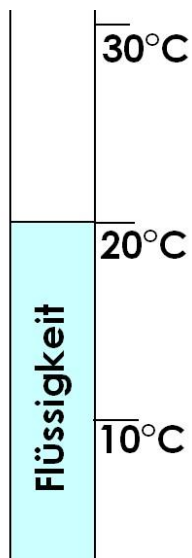
Wir wissen (siehe oben), dass Wellenlänge mal Frequenz die Ausbreitungsgeschwindigkeit ergibt. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit für Licht immer ungefähr 300.000km/s beträgt, können wir das einsetzen und so immer eindeutig die Wellenlänge in die Frequenz und umgekehrt umrechnen.

Weiter unten werden die Wellenlängen, in denen wir messen, genauer erklärt. Dem aufmerksamen Leser wird auffallen, dass dabei Lücken existieren und manche Wellen (wie zum Beispiel die UV-Strahlung) ganz fehlen. Das liegt nicht daran, dass in diesen Wellenlängen nicht gemessen wird, sondern daran, dass in diesem Bereich im Vergleich zu den anderen Wellenlängen wenig interessantes gemessen werden kann. Damit der Stoff nicht zu viel wird, wurden die unwichtigeren Strahlen weggelassen.

Detektion von elektromagnetischen Wellen

Photonendetektoren: Elektromagnetische Wellen bestehen aus Teilchen, den so genannten Photonen. Auf den ersten Blick erscheint es eigenartig, dass etwas Welle und Teilchen gleichzeitig sein kann, aber das liegt nur an unserer Alltagserfahrung, weil in den Maßstäben die wir sehen können, nichts existiert, das sich wie Welle oder Teilchen gleichzeitig verhält. Bei

den elektromagnetischen Wellen ist es aber schon so, dass sie sich wie Wellen überlagern und trotzdem wie Teilchen gezählt werden können. Die Zählung erfolgt sowohl in unserem Auge als auch in zahlreichen technischen Geräten zur Erstellung von Bildern.



Bolometer: Wie wir aus dem Alltag wissen, erzeugen Sonnenstrahlen nicht nur Licht, sondern auch Wärme. Diese Wärme wird von allen elektromagnetischen Wellen erzeugt. Bolometer messen diese Wärme.

Abb. 5.2.: Messung von Wärme

Wärme führt dazu, dass sich ein Stoff ausdehnt. Beispielsweise wäre die Flüssigkeit aus der linken Abbildung bei 30°C größer und würde deshalb weiter hinauf reichen. Bei 10°C wäre die Ausdehnung kleiner und die Flüssigkeit würde weniger hoch steigen.

Diese Technik steckt zum Beispiel in Thermometern. Da die elektromagnetischen Wellen die einzigen Wellen sind, die Wärme erzeugen, kann man aus der Temperatur auf elektromagnetische Wellen schließen.

Kohärente Detektoren: Wenn die Strahlen zu schwach sind, um wahrgenommen zu werden, kann man sie mit Hilfe von kohärenten Detektoren verstärken. Dabei werden die Strahlen mehrmals hin- und her reflektiert, wobei sich die Wellen immer konstruktiv überlagern. Das heißt, dass sie ihr Maximum immer an der gleichen Stelle haben, so dass sich der Ausschlag vergrößert. Diese Technik benötigen wir zum Beispiel um den Rundfunk zu empfangen.

Photometer: Photometer messen die Helligkeit von Objekten. Durch Filter ist es möglich, nur die Helligkeit, die ein Stern auf einer gewissen Wellenlänge hat, zu messen. Das ist eine der wichtigsten astronomischen Forschungsmethoden.

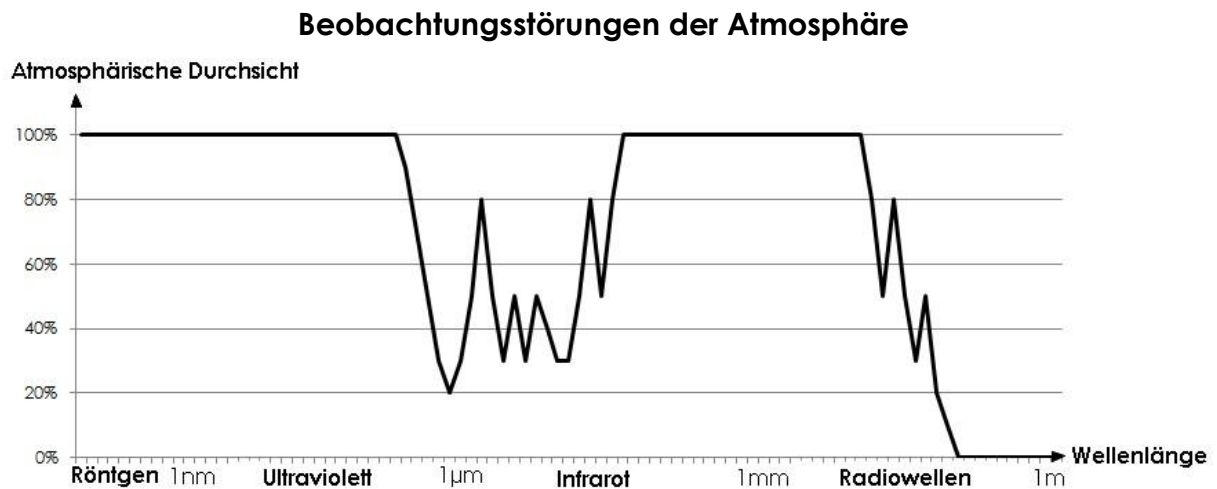
Kameras: Kameras sind wie Photometer, nur dass sie 2D-Detektoren besitzen, mit denen sie auch den Ort eines Objekts in 2 Dimensionen darstellen können.

Spektrographen: Bei Spektrographen wird die Kamera noch mit einem anderen Element, wie zum Beispiel einem Prisma oder einem Gitter kombiniert. Dadurch kann man aus dem Licht Informationen ablesen, wie zum Beispiel über Temperatur, Druck, Bewegungen des Objekts und Magnetfelder.

Die Formel für die spektrale Auflösung (R) lautet:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

Wobei λ die Wellenlänge und $\Delta\lambda$ die Änderung der Wellenlänge ist.

**Abb.5.3.: Atmosphärische Durchsicht**

Manche elektromagnetische Wellen werden von der Atmosphäre blockiert. In dieser Abbildung wird der prozentuale Anteil der blockierten Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt.

Schuld für diese Undurchlässigkeit sind die Stoffe, die sich in der Erdatmosphäre befinden. Beispielsweise blockieren Wasser (H_2O), Kohlendioxid (CO_2) und Stickstoff (N_2) die Infrarotstrahlung. Sauerstoff (O_2) und Ozon (O_3) verhindern, dass UV-Strahlung eintritt. Weil die UV-Strahlen für unseren Körper schädlich sind, ist diese Ozonschicht so wichtig.

Gamma, Röntgen und UV-Strahlen kommen überhaupt nicht durch die Atmosphäre durch, sodass Instrumente, die auf diese Wellenlänge ausgelegt sind, immer aus der Erdatmosphäre gebracht werden müssen. Selbst dann kommt es manchmal zu atmosphärischen Problemen, weil sich auch zwischen den Sternen Material, das so genannte Interstellare Medium befindet.

Sichtbares Licht und Infrarotstrahlung durchdringen nur teilweise die Atmosphäre. Auch bei diesen Teleskopen ist es von Vorteil, wenn man sie ins Weltall befördert. Das ist für viele wichtige Forschungsfragen, wie zum Beispiel bei der Suche nach Exoplaneten oder bei der Messung von Entfernungen mittels Sternparallaxen, notwendig.

Anm.: Alle die sich diese Kapitel im Skriptum durchgelesen haben, können sich vorstellen, dass man für solche Vorhaben extrem genau messen muss.

Wenn man die Instrumente aus finanziellen Gründen nicht ins All schicken kann, baut man sie auf einen Berg, weil dort weniger Atmosphäre das Licht behindert als im Tal.

Radiowellen werden von der Atmosphäre vollständig durchgelassen. Deshalb werden Radiowellen für den Rundfunk verwendet. Es bringt daher überhaupt nichts, Radioteleskope auf einem Berg zu bauen oder gar ins All zu schicken. Radioteleskope stehen normalerweise in der Wüste, damit sie nicht von den Radiowellen des Rundfunks gestört werden.

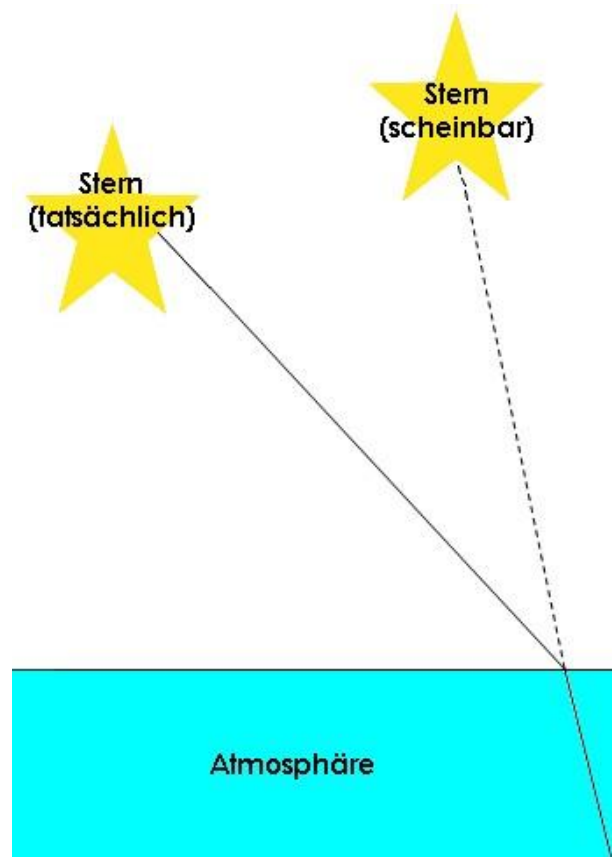


Abb.5.4.: Lichtbrechung:

Zusätzlich zu dem Effekt, dass manche Lichtstrahlen gar nicht oder nur teilweise die Atmosphäre durchdringen, werden auch alle Elektromagnetischen Wellen vom Übergang von einem dünneren zu einem dichteren Medium (in dem Fall von Vakuum zu Luft) gebrochen. Das Auge glaubt immer, dass sich Lichtstrahlen geradlinig ausbreiten. Deshalb sehen wir den Stern an einer anderen Position, als er tatsächlich ist. Um diesen Effekt auszugleichen, rechnet man mit Hilfe des Sinellius'schen Brechungsgesetzes

$$n_1 \sin(\alpha) = n_2 \sin(\beta)$$

den tatsächlichen Herkunftsort des Lichtstrahles aus. Die Brechzahlen n_1 bzw. n_2 sind von der genauen Stoffzusammensetzung abhängig. Wenn man das ganz exakt berechnen will, muss man sowohl die Poldistanz als auch die Wellenlänge berücksichtigen. Diese Berechnungen können gar nicht ganz exakt sein, weil sich Luft nicht immer gleich verhält. Besonders einleuchtend ist das, wenn man an die Wetterphänomene denkt, die sich in der Atmosphäre abspielen. Ein Gerät, das diese Brechungseffekte herausrechnen kann hat eine "adaptive Optik".

Die Brechungseffekte kennen wir auch aus dem Alltag: Tagsüber haben die Lichtstrahlen einen steilen Einfallswinkel und der Himmel erscheint blau. Am Abend ist der Einfallswinkel flacher und der Himmel wird rot. Auch bei einer Mondfinsternis erreichen den Mond nur noch die flach einfallenden Strahlen, weil die Erde die steil einfallenden Strahlen blockiert. Deshalb erscheint der Mond bei einer Mondfinsternis rötlich.

[Erklärung der Lichtbrechung im Physiksriptum ab Seite 37](#) 

[Erklärung der Lichtbrechung in der Zusammenfassung des Physiksriptums ab Seite 5](#) 

Seeing (Turbulenzen): In der Atmosphäre gibt es immer Turbulenzen, weil die durch den Treibhauseffekt aufgewärmte Luft von der kälteren Luft, die wegen der Gravitation zu Boden fällt, verdrängt wird. Oben kühlt die warme Luft ihrerseits ab und fällt deshalb wieder hinunter. Diese Turbulenzen fühlen wir als Wind.

Für die Teleskope sind diese Turbulenzen sehr unpraktisch, weil sie auch das Licht abändern. Deshalb schaut es für uns auch manchmal so aus, als würden die Sterne funkeln. In der Astronomie werden solche Störungen danach unterschieden, was man ungenau sieht.

Name (Latein)	Name (Deutsch)	Ungenauigkeit
Szintillation	Funkeln	Helligkeit
Agitation	Bildbewegung	Ort
Seeing	Aufblähen/Unschärfe	Rand
Speckles	Zerfallen	Oberfläche

Theoretisches Auflösungsvermögen

Neben der Atmosphäre kann auch der Aufbau des Teleskops die Schärfe der Bilder beeinflussen. Das theoretische Auflösungsvermögen gibt an, wie unscharf ein Teleskop wäre, wenn es weder eine Atmosphäre noch ein interstellares Medium gäbe. Man gibt das Auflösungsvermögen entweder im Bogenmaß (weil es eine SI-Einheit ist) oder in Bogensekunden (weil dann die Zahlen nicht so klein sind) an. Aus langjährigen Erfahrungen mit Teleskopen weiß man, dass das Auflösungsvermögen in Bogenmaß mit der Formel

$$\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

berechnet werden kann, wobei λ die Wellenlänge, D der Durchmesser des Teleskops und α das theoretische Auflösungsvermögen ist.

[Erklärung der Einheit Bogenmaß im Rechenmethodenskript ab Seite 25 ①](#)

Spektrale Auflösung

Die spektrale Auflösung gibt die Schärfe eines Teleskops bei der Beobachtung von Spektren an. Man kann so aus der spektralen Auflösung herauslesen, wie weit zwei Fraunhoferlinien voneinander entfernt sein müssen, damit man sie voneinander unterscheiden kann. Das errechnet man mit der Formel:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

In dieser Formel steht λ für die Wellenlänge, bei der gemessen wird, $\Delta\lambda$ für den Unterschied der Wellenlängen zwischen den beiden Fraunhoferlinien und R für die spektrale Auflösung.

Beobachtungstechniken

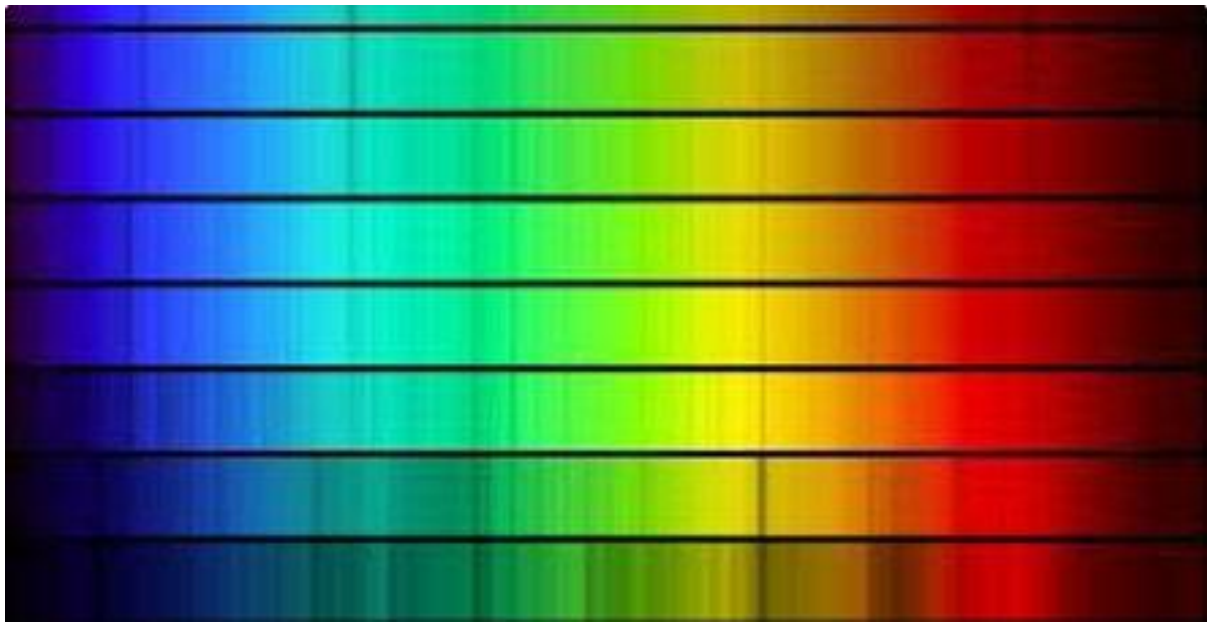


Abb. 5.5.: Spektren:

Wie wir schon beim Kapitel „Atmosphärische Durchsicht“ festgestellt haben, blockieren alle Stoffe bestimmte Wellenlängen. Die Lichtstrahlen, die bis zur Erde durchgelassen werden, können wir messen, sie erscheinen deshalb in der Abbildung farbig. Die Stellen mit Lichtwellen, die nicht bis zur Erde durchkommen, bleiben schwarz.

Jeder Stoff lässt ein bisschen andere Wellenlängen durch. Daraus, welche Wellenlängen nicht bei uns ankommen, kann man schließen, welche Stoffe in dem Stern existieren. Diesen Vorgang nennt man Spektralanalyse. Die abgebildeten Farbbänder nennt man Spektren (Einzahl: Spektrum) oder P-Cygni-Profile. Die schwarzen Linien nennt man Fraunhoferlinien.

Aus einem Spektrum erkennt man außerdem, wie stark ein Stoff ionisiert ist, also wie viele Elektronen dem Stoff fehlen. Wenn einem Stoff überhaupt keine Elektronen fehlen schreibt man einen römischen 1er hinter das Stoffkürzel, sonst schreibt man immer eine römische Ziffer, die um eins größer ist als die Anzahl der fehlenden Elektronen dahinter. Zum Beispiel bezeichnet man ein 7-fach ionisiertes Eisen mit FeVIII. Aus den Eigenschaften dieser Stoffe kann man weitere Eigenschaften des Sterns wie zum Beispiel Dichte, Temperatur, Druck, Geschwindigkeit, Magnetfeld und Rotation herausfinden.

Bei weit entfernten Sternen sind die Wellenlängen rotverschoben, aber man kann anhand der Abstände zwischen den blockierten Wellenlängen immer noch die Stoffe (und damit verbunden auch die Eigenschaften) erkennen.

Nachführung eines Teleskops: Die Erde dreht sich bekanntlich sowohl um sich selbst als auch um die Sonne. Wenn man ein fixes Objekt am Himmel beobachtet, muss man die Teleskope dementsprechend nachführen. Wenn das Teleskop um die Erde kreist, muss es zusätzlich noch seine Eigenbewegung ausgleichen. Moderne Teleskope haben eine Automatik dabei, die das eigenständig erledigt. Die größte mechanische Herausforderung ist, dass die Drehachsen stabil sind und bei der Drehung möglichst wenig vibrieren. Wenn man ein sich bewegendes Objekt betrachtet, muss man zusätzlich zur Erdrotation noch die Bewegung des Objektes dazu addieren.

Zusammenschaltung von Teleskopen: In der Rechenmethodenvorlesung habt ihr bestimmt schon gelernt, wie man in der Physik mit Messunsicherheiten umgeht: Man misst mehrmals und nimmt davon den Mittelwert. Das macht man mitunter auch in der Astronomie. Da man

den Versuch nicht mehrmals durchführen kann (das zu beobachtende Ereignis findet ja nur einmal statt), muss man dieses Ereignis eben mehrmals gleichzeitig messen. Dazu richtet man lauter gleiche Teleskope, die am gleichen Ort stehen, auf die gleiche Stelle am Himmel. Das bekannteste Beispiel dafür sind die unzähligen Radioantennen im ALMA Array.

[Erklärung der Fehlerrechnung im Rechenmethodenskript ab Seite 151](#) 

Gammawellen (> 10pm)

Gammastrahlen sind die kürzesten Lichtstrahlen die es gibt. Sie sind kleiner als das Milliardstel eines Zentimeters. In diesem Wellenlängenbereich finden einige interessante Phänomene statt.

Was man alles mit Gammawellen messen kann

Das wohl faszinierendste davon sind Gammastrahlenausbrüche. Dabei wird so viel Energie frei, wie bei keinem anderen Vorgang sonst. Dabei sind sie gar nicht lang: Die kürzesten sind schon nach einer hundertstel Sekunde wieder um, länger als 20 Minuten dauert so ein Vorgang nie. Wodurch das ausgelöst wird, ist trotz großer wissenschaftlicher Anstrengungen ungeklärt. Was auch immer es auslöst, es dürfte zumindest nicht auf die Gravitation reagieren: Gammastrahlenausbrüche treten überall gleich oft auf, sowohl innerhalb, als auch außerhalb von Galaxien.

[Weitere interessante Informationen über Gammastrahlenausbrüche](#) 

Was Sterne angeht, kann man im Gammabereich vieles Erforschen: Man verwendet Gammastrahlen sowohl bei jungen Sternen wie unserer Sonne, als auch bei Sternen im Endstadium. Bei entfernten Galaxien sind die Anwendungen schon eingeschränkter. Man kann Galaxien mit Gammastrahlen nur erforschen, wenn darin sehr viel Energie umgesetzt wird, oder wenn es sich gleich um ganze Galaxienhaufen, also Galaxien, die durch ihre Gravitation nah beieinander sind, handelt.

Gammateleskope

Es gibt viele unterschiedliche Methoden um Gammastrahlen aufzuzeichnen, die aber alle recht aufwendig sind. Sie werden bei Missionen wie zum Beispiel „Integral“ oder „Fermi“ angewandt. Bei den meisten Messmethoden wird die Energie der Gammawellen sichtbar gemacht.

Alle Elektromagnetischen Wellen haben Energie. Sie haben beispielsweise Bewegungsenergie (andernfalls könnten sie ja gar nicht bis zu uns herkommen). Diese Energie merken wir im Alltag auch: Wir wissen, dass Sonnenstrahlen warm sind und auch, dass UV-Strahlen einen Sonnenbrand auslösen können.

Kalorimeter: Ein Kalorimeter versucht durch Folien die Gammawellen aufzuhalten. Dabei wandelt die Reibung die Energie des Lichts in Wärme um.

Funkenkammer: Wenn eine Gammawelle durch ein Atom (zwischen Atomkern und Elektron) durchgeht, wird die Anziehungskraft zwischen dem Atomkern und seinen Elektronen unterbrochen und die Elektronen verlassen ihren Atomkern. Diesen Effekt nennt man Ionisation. In

der Funkenkammer werden zwei Platten nah beieinander positioniert. Die Elektronen, die ihrem Atomkern entkommen sind, wechseln teilweise durch die Luft zu einer anderen Platte und werden als Funken messbar.

Szintillationszähler: Den Effekt, dass Elektronen von ihrem Atomkern getrennt werden, wurden schon bei der Funkenkammer beschrieben. Manche Moleküle versuchen, wie ihr vielleicht noch aus dem Chemieunterricht wisst, ein zusätzliches Atom aufzunehmen um ihre Umlaufbahn voll auszufüllen und dadurch stabiler zu werden. Dabei werden sie zu einem anderen Element, das man mit dem Szintillationszähler messen kann.

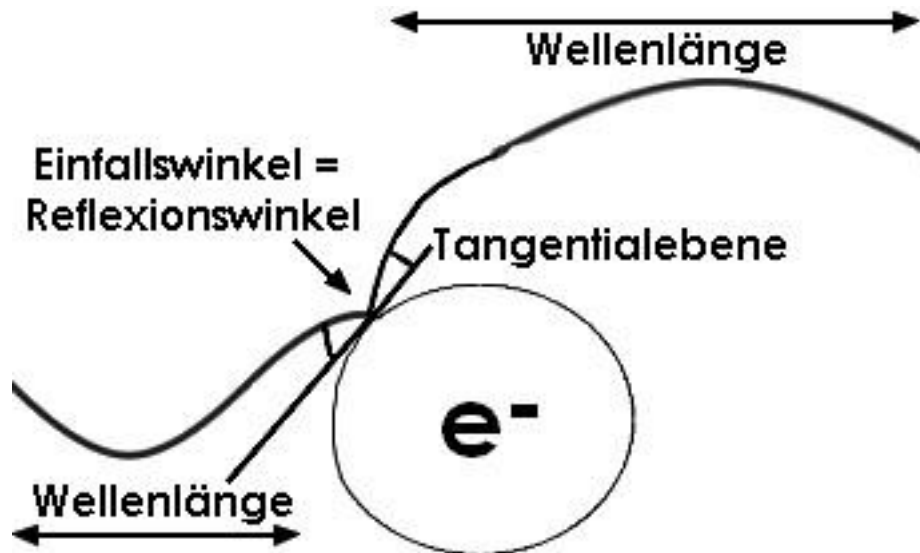


Abb.5.6.: Comptoneffekt:

Wenn Gammastrahlung auf ein Elektron trifft, werden diese Strahlen reflektiert. Da der Winkel des Strahls jetzt ein anderer ist, hat sich auch seine Wellenlänge geändert. Man erhält also längerwelliges Licht, das man dann mit Teleskopen messen kann, die für längere Wellenlängen ausgelegt sind.

Čerenkovteleskope

Viele Leute glauben, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant ist. Das ist aber nicht richtig: Das was konstant ist, ist die Einsteingeschwindigkeit, also jene Geschwindigkeit, die man aufgrund der Relativitätstheorie nicht überschreiten kann. Wenn das Licht durch das Vakuum geht, ist es mit Einsteingeschwindigkeit unterwegs (eigentlich erreicht es die Einsteingeschwindigkeit nie, weil nirgendwo ein perfektes Vakuum herrscht). In unserer Atmosphäre wird das Licht durch den Luftwiderstand minimal langsamer. Um wie viel es langsamer wird, hängt von der Energie des Lichts ab. Normalerweise ist das vernachlässigbar, weil das Licht durch unsere Atmosphäre wirklich nur ganz wenig aufgehalten wird. Nur die Gammawellen sind so kurz, dass sie besonders viele Umwege machen. Die weniger energetischen Gammastrahlen bleiben zurück. Normalerweise würden sich die Lichtwellen gleich wieder gegenseitig auslöschen (deshalb verschwindet auch das Licht nachdem die Sonne untergegangen ist, und bleibt uns nicht erhalten), aber die hochenergetischen Gammastrahlen haben die weniger energetischen abgehängt. Es bleiben Positronen über. Positronen haben genau die gegenteiligen Eigenschaften wie Elektronen. Wenn ein Positron und ein Elektron aufeinander treffen, gleichen sich deren Eigenschaften aus, ähnlich wie sich auch gleich große Kräfte ausgleichen. Das ist nichts Ungewöhnliches: Auf Elementarebene ist jede Eigenschaft nur eine

Kraft und so gibt es zu jeder Materie eine so genannte Antimaterie die diese Materie auslöscht. Bis die weniger energetischen Gammastrahlen die hochenergetischen Gammastrahlen eingeholt haben, haben sich Elektron und Positron schon längst ausgeglichen. Dieses fehlende Elektron können wir mit so genannten Čerenkovteleskopen messen.

Hochenergetisch sind diese Gammawellen nur im Vergleich zu anderen Gammawellen. Dieses Verfahren funktioniert schon bei 10^{12}eV . Um ein Kilogramm auf ein Meter pro Sekunde zu beschleunigen, braucht es 10-Millionenmal so viel Kraft, wie die hochenergetischen Gammawellen haben.

Das bekannteste Čerenkovteleskop ist HESS-Array in Namibia. Dabei werden gleich 4 Teleskope zusammengeschaltet. Jedes dieser Teleskope hat 100m^2 Detektorfläche und kann Zeitabstände von einer Milliardstel Sekunde messen. Zum Vergleich: Wenn eine Sekunde 30 Vergleichsjahre dauern würde, könnte dieses Teleskop immer noch die Vergleichssekunden voneinander unterscheiden. Seine Auflösung beträgt 5 Bogensekunden. Zum Vergleich: Der Mond hat einen Durchmesser von 31 Bogenminuten.

Röntgenwellen (10pm – 10nm)

Wenn ihr zum Arzt geht und ein Röntgenbild von eurem Körper anfertigen lasst, dann sieht man das innere des Körpers, weil die Röntgenstrahlen durch Objekte wie eure Haut durchgehen. Diesen Effekt macht man sich auch in der Astronomie zunutze: Wenn irgendwo im Weltall massive Körper die Sicht versperren, kann man die dahinterliegenden Objekte trotzdem noch beobachten: Man nimmt einfach ein Röntgenteleskop und kann damit durch dieses Objekt durchsehen.

[Was da alles die Sicht versperren kann, erfährt ihr im Skriptum über das Interstellare Medium \(i\)](#)

Wolterteleskope

Die Teleskope, die Röntgenstrahlen messen, nennt man Wolterteleskope. Mit Wolterteleskopen kann man ungefähr dasselbe beobachten, wie mit Gammateleskopen. Der entscheidende Vorteil gegenüber Gammateleskopen ist, dass man mit Röntgenwellen praktisch überall durchschauen kann. Damit die Röntgenwellen messbar werden, muss man sie allerdings bündeln. Das erledigen kleine Nickelspiegel, die mit Gold beschichtet sind. Die derzeit wichtigsten Wolterteleskope heißen „Newton“ und „Chandra“.

Sichtbares Licht (400 – 800nm)

Wenn die elektromagnetischen Wellen zwischen 400 und 800nm lang sind, können wir sie als Licht wahrnehmen. Die Farbe ist nichts anderes als die Wellenlänge: Die besonders langen Lichtwellen erscheinen uns rot, die besonders kurzen violett. Diese Wellen sind in der Astronomie vor allem historisch relevant, schließlich hat die Astronomie mit sichtbarem Licht begonnen. Erst im 18. Jahrhundert hat man erkannt, dass es auch nicht sichtbares Licht gibt. Damals hat Herschel die Wärme der unterschiedlichen Lichtstrahlen gemessen. Zufälligerweise hat er auch hinter der roten Strahlung gemessen und hat dabei entdeckt, dass es dort wärmer ist. Dadurch wusste er, dass auch ein anderes, für uns unsichtbares Licht existiert.

Detektion von sichtbarem Licht

Grundsätzlich können wir ja das sichtbare Licht auch ohne ein astronomisches Gerät sehen. Das einzige Problem ist, dass unser Auge aufgrund der großen Entfernung alles im Weltall extrem klein und ungenau sieht. Um das zu ändern, brechen wir das Licht so, dass die Lichtstrahlen des Sterns nicht mehr so nah beieinander zu unserem Auge kommen (Funktion des Fernrohrs mit Linsen und/oder Spiegeln). Wir können den Stern dadurch größer und genauer als ohne Fernrohr sehen.

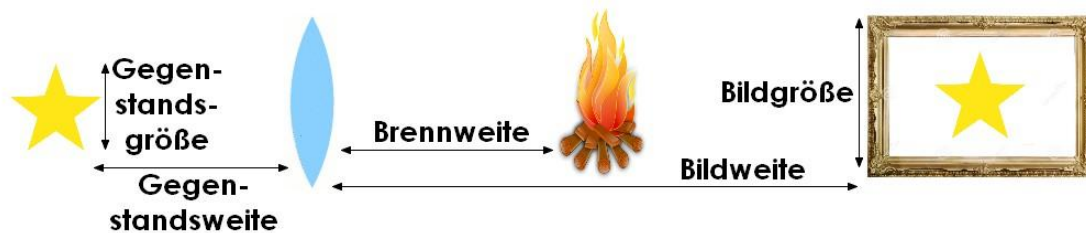


Abb.5.7.: Parameter der Linsengleichung

Damit die Lichtstrahlen so gebrochen werden, dass wir Objekte größer wahrnehmen können, benötigt man eine Konvexlinse. Um auszurechnen, wie stark die Strahlen gebrochen werden, verwendet man folgende Formeln:

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$$

Bildgröße (B): Größe des Objekts am Bild

Gegenstandsgröße (G): Tatsächliche Größe des Objekts

Bildweite (b): Entfernung des Beobachters vom Fernrohr

Gegenstandsweite (g): Entfernung des Objekts vom Fernrohr

Brennweite (f): Entfernung des Schnittpunkts der Lichtstrahlen vom Fernrohr

[Erklärung der Lichtbrechung im Physikskriptum ab Seite 37](#)

[Erklärung der Lichtbrechung in der Zusammenfassung des Physikskriptums ab Seite 5](#)

Abbildungsfehler: Die Abbildungsfehler bei optischen Teleskopen werden nach ihrer Ursache unterschieden

Name	Ursache
Sphärische Aberration	Die Lichtstrahlen treffen sich nicht im Brennpunkt
Chromatische Aberration	Bei der Lichtbrechung verändert sich die Wellenlänge
Bildfeldwölbung	Die Projektionsfläche ist gekrümmt
Verzeichnung	Vergrößerung hängt vom Abstand ab
Astigmatismus	Schräg einfallendes Licht

Wenn sowohl sphärische Aberration als auch Astigmatismus auftreten, nennt man das Koma.

Linsenfernrohre: Es gibt 2 Arten von Linsenfernrohren.

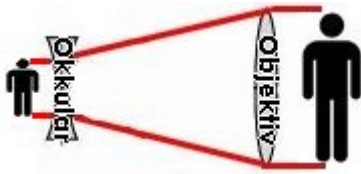


Abb.5.8.: Holländisches Fernrohr

Beim Holländischen Fernrohr werden die Lichtstrahlen gleich zweimal gebrochen: Das eine Mal, damit man das Bild vergrößert sieht und das zweite Mal, damit das Bild wieder richtig herum steht. Bei jeder Brechung wird die Bildqualität schwächer. Als es erfunden wurde, war es dennoch das beste Teleskop, dass es gab, sodass Galilei damit einige Entdeckungen machen konnte. Inzwischen ist es aber viel zu ungenau, sodass es nur noch für kurze Entfernungen verwendet wird.

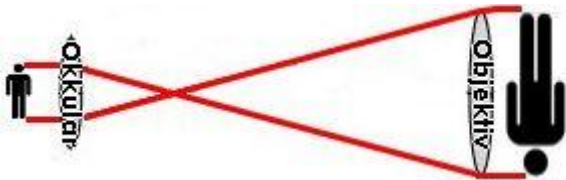


Abb.5.9.: Astronomisches Fernrohr

Das Astronomische Fernrohr bricht das Licht nur zum Vergrößern. Deshalb ist es auch um einiges genauer. Der Nachteil ist, dass das Bild auf dem Kopf steht. Das ist aber nicht so schlimm, weil man das Bild mit jedem gewöhnlichen Zeichenprogramm drehen kann. Inzwischen wird auch dieses Linsenfernrohr nicht mehr wissenschaftlich verwendet, weil Spiegelteleskope noch genauer sind.

Spiegelteleskope: Bei Spiegelteleskopen werden vorher die Lichtstrahlen durch einen Spiegel gebrochen, um etwaige Farbfehler zu korrigieren. Die Arten, wie man die Lichtstrahlen bricht, werden als Fokuse bezeichnet.

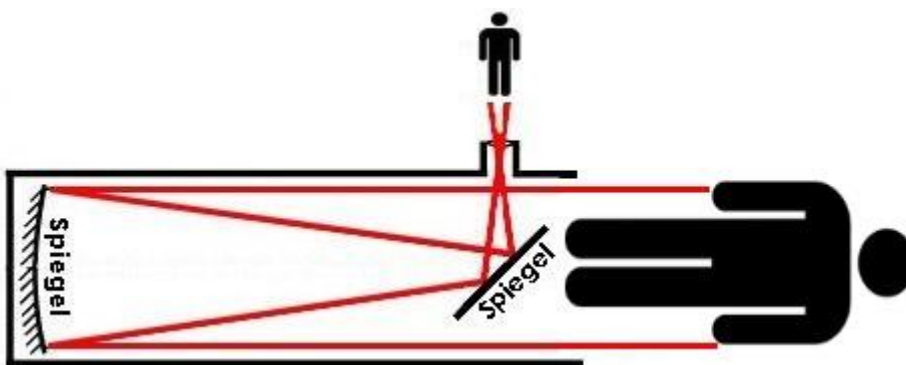
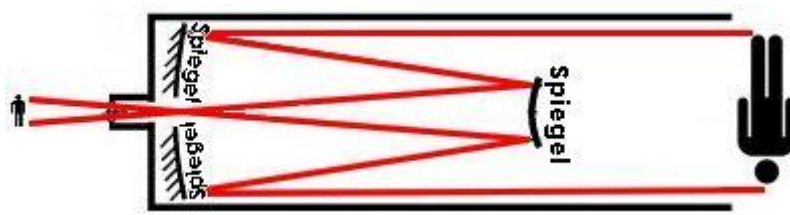
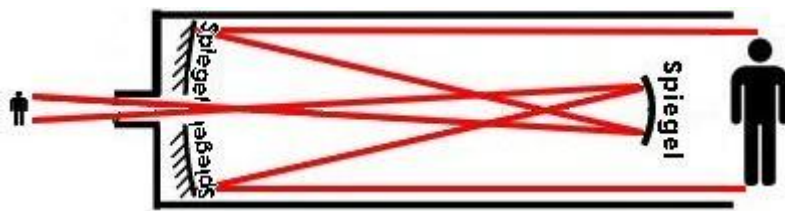


Abb.5.10.: Newton-Fokus

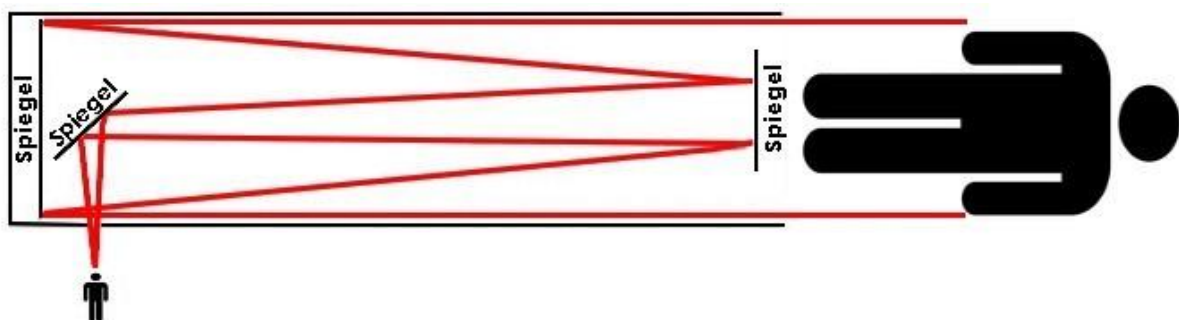
Das Licht fällt auf einen Spiegel, der um 45° geneigt ist. Deshalb wird es im rechten Winkel gebrochen. Man verwendet diesen Fokus heute nur noch in der Privatastronomie.

**Abb.5.11.: Cassegrain-Fokus**

Das Licht fällt auf einen Hauptspiegel der die Form einer verkürzten Parabel hat. Die Lichtstrahlen werden auf beide Seiten reflektiert. Auf den Seiten steht je ein Fangspiegel, der die Lichtstrahlen wieder parallel zurückwirft.

**Abb.5.12.: Gregory-Fokus**

Im Gegensatz zum Cassegrain-Fokus ist der Hauptspiegel genau in die andere Richtung gekrümmt. Die Lichtstrahlen werden also auch genau in die entgegengesetzte Richtung reflektiert. Das hat den Vorteil, dass das Bild aufrecht erscheint.

**Abb.5.13.: Coudéfokus**

Der Coudéfokus ist eine Kombination aus Cassegrain-Fokus und Newton-Fokus. Zuerst werden die Lichtstrahlen so wie beim Cassegrain-Fokus parallel gebrochen. Dann werden sie, so wie beim Newtonfokus, rechtwinklig gebrochen.

Nasmythfokus: Der Nasmythfokus funktioniert genauso wie der Coudé-Fokus, nur dass die Anordnung um 90° gedreht ist.

Infrarotwellen (1 - 500µm)

Die Infrarotwellen sind für die Astronomie die wichtigsten Lichtwellen überhaupt. Schließlich befindet sich der Großteil der Strahlung im infraroten Bereich. Dementsprechend viel kann man im Infrarotbereich erforschen: Man kann im interstellaren Medium sowohl Staub als auch Moleküle beobachten, man kann sowohl die Sternentstehung als auch Endstadien der Sterne

erforschen. Galaxien senden zwar normalerweise kurzwelligeres Licht aus, aber, wenn sie weit genug entfernt sind, werden sie in den Infrarotbereich rotverschoben.

Im Infrarotbereich ist die Erdatmosphäre großteils undurchlässig. Es gibt nur ganz wenige Wellenlängen innerhalb des Infrarotbereichs, die unsere Atmosphäre durchdringen. Außerdem ist es für die Messung notwendig, dass das Instrument gekühlt wird, was innerhalb der warmen Erdatmosphäre auch schwieriger ist. Deshalb werden die meisten Infrarotteleskope in den Weltraum geschickt. Der Nachteil ist, dass man die Kühlmittel im Weltall nicht so einfach nachfüllen kann. Deshalb endet die Lebensdauer der meisten Infrarotteleskope, sobald das Kühlmittel aufgebraucht ist.

Weil die Infrarotstrahlen im Weltall so häufig vorkommen, wurden auch schon einige Infrarotteleskope gestartet. IRAS, ISO, Spitzer, Herschel und das James-Webb-Space-Teleskop sind nur auf Infrarotstrahlen ausgelegt. Auch COBE, W-Map und Planck besitzen Infrarotinstrumente.

Radiowellen (500 μ m – 30m)

Die Radiowellen sind die einzigen Wellenlängen, deren Auflösung nicht durch die Erdatmosphäre eingeschränkt ist. Dafür sind die Radiowellen so lang, dass die Auflösung schon allein deshalb gering ist. Um das auszugleichen, versucht man, Radioteleskope so groß wie möglich zu bauen, aber mehr als 100m Durchmesser sind mechanisch mit heutiger Technologie nicht machbar. Deshalb werden oft mehrere Radioteleskope zusammengeschaltet. Mit Radioteleskopen kann man Staub, atomares und molekulares Gas messen. Bekannte Radioteleskope sind ALMA, VLA und VLBI. Das größte Teleskop überhaupt ist auch ein Radioteleskop und heißt RATAN.

Neutrinos

Neutrinos sind kleine Elementarteilchen. Das besondere an Ihnen ist, dass sie sich unbeeinflusst von Wechselwirkungen wie Gravitation oder Elektromagnetismus bewegen können. Nur auf eine einzige Wechselwirkung sprechen sie an: Auf die schwache Wechselwirkung. Sie ist so schwach, dass sie nur im atomaren Bereich wirkt und außerdem die zweitschwächste Wechselwirkung die es gibt.

Ein Atom besteht ja eigentlich fast nur aus leerem Raum. Wenn der Atomkern 1 Meter groß und in der Sternwarte wäre, würde sich der Rand des Atoms erst in Erdberg befinden. Normale Teilchen können trotzdem nicht durchgehen, weil die sogenannte starke Wechselwirkung dafür sorgt, dass die Atome massiv sind. Neutrinos reagieren nicht auf diese starke Wechselwirkung und können daher jede Masse problemlos durchdringen.

Also können wir mit Neutrinos praktisch durch massive Materialien „durchschauen“. Ein weiterer praktischer Aspekt von Neutrinos ist, dass sie bei der Kernfusion von Wasserstoff zu Helium entstehen. Auf diese Weise können wir durch Neutrinos auch einiges über Kernfusion lernen. Mit elektromagnetischen Wellen geht das nicht, weil sie von den elektromagnetischen Wellen der Sonnenhülle überstrahlt werden und mit den Gravitationswellen auch nicht, weil deren gravitative Auswirkung dafür zu schwach ist. Falls wir es also wirklich irgendwann schaffen, unser Energieproblem durch Kernfusion in den Griff zu bekommen, so ist das nur mittels Neutrinodetektion möglich.

Detektion von Neutrinos

Da Neutrinos nur über die sogenannte schwache Wechselwirkung interagieren, ist es sehr schwer, sie zu messen. Obwohl pro Sekunde $6,5 \times 10^{14}$ Neutrinos durch jeden Quadratmeter durchgehen, schaffen wir es nur täglich 10 Neutrinos zu detektieren. Um nicht durch andere, stärkere Effekte wie die kosmische Strahlung gestört zu werden, baut man Neutrinodetektoren immer unterirdisch, zum Beispiel in Bergwerken. Durch so viel massive Erde können nur noch die Neutrinos durchkommen. Um sie dort auch zu detektieren, braucht man Wasserstoffatome. Durch Interaktion mit Wasserstoff erzeugen Neutrinos Čerenkovstrahlung die man messen kann.

Gravitationswellen

Ähnlich wie 1-dimensionale Kurven oder 2-dimensionale Flächen im 3-dimensionalen Raum gekrümmt sind, ist auch unsere 4-dimensionale Raumzeit in noch höheren Dimensionen gekrümmt. Wir können zwar die höheren Dimensionen nicht wahrnehmen, wissen aber, dass sie da sein müssen, weil sich der Raum ja irgendwohin krümmen muss.

Wenn wir auf einer gekrümmten Fläche leben würden und nur 2 Dimensionen wahrnehmen könnten, könnten wir trotzdem herausfinden, dass die Fläche gekrümmt ist, zum Beispiel weil die Winkelsumme in einem Dreieck nicht 180° ist. Durch diese Raumkrümmung können wir auf die dritte Dimension schließen, weil sich die Fläche irgendwohin krümmen muss.

Genauso ist das bei unserer 4-dimensionalen Raumzeit auch. Wir wissen, dass sich der Merkur so bewegt, wie er es nur in gekrümmten Räumen tun würde und können daher darauf schließen, dass die Sonne den Raum krümmt.

Aber nicht nur die Sonne krümmt den Raum, jede Masse krümmt ihn. Je größer die Masse ist, desto stärker ist die Raumkrümmung. Wenn sich die Masse ändert, ändert sich auch die Raumkrümmung, aber nicht abrupt. So wie jeder Stoff, ist auch unsere 4-dimensionale Raumzeit ein bisschen elastisch und die Raumzeit beginnt sich aufgrund dieser Gravitationsänderungen zu wellen. Leider sind diese Wellen sehr klein und dadurch auch schwer messbar.

Dementsprechend spät begann auch der Nachweis von Gravitationswellen. Albert Einstein sagte sie erstmals in seiner Relativitätstheorie voraus. 1974 hat Pulse festgestellt, dass sich ein Doppelsternsystem nicht so bewegt hat, wie es das laut Berechnungen tun sollte. Die Abweichung passte genau auf eine Krümmung durch Gravitationswellen. Erst 2016 hat die Raumsonde Lisa-Pathfinder eine Gravitationswelle direkt gemessen. Damals sind 2 schwarze Löcher kollidiert.

Die Gravitationswellenforschung ist also ein sehr junges Forschungsgebiet und die meisten Entdeckungen stehen wahrscheinlich noch bevor.

Was man alles mit Gravitationswellen messen kann

Da die Raumzeit ziemlich unelastisch ist, kann man Gravitationswellen nur messen, wenn wirklich große Massen im Spiel sind. Die größten Massen in unserem Sonnensystem sind schwarze Löcher. Diese sind besonders ideal, weil man sie mit keiner anderen Methode direkt messen kann: Die Gravitation ist so stark, dass weder Neutrinos noch elektromagnetische Wellen dem schwarzen Loch entkommen können.

Beim Urknall war die gesamte Masse unseres Universums in einem sehr kleinen Punkt vereint. Das könnte so starke Gravitationswellen verursacht haben, dass man sie noch heute messen

kann. Mit dieser Methode könnte man mehr über den Anfang unseres Universums herausfinden.

Dunkle Materie interagiert bekanntlich nur über Gravitation. Folglich kann man dunkle Materie ausschließlich durch Gravitationswellen direkt messen, allerdings sind die heutigen Messungen nicht genau genug.

Gravitationswellendetektion

Resonanzdetektoren: Ein Resonanzdetektor ist eine große, feste Metallstange, die gut gegen Erschütterungen jeder Art isoliert ist. Er muss wirklich gut isoliert sein, selbst Meereswellen in einigen Kilometern Entfernung beeinflussen das Instrument so stark, dass sie herausgerechnet werden müssen. Wenn eine Gravitationswelle beim Messgerät ankommt, merkt man eine minimale aber messbare Erschütterung der Stange.

Interferometrische Detektoren: Bei interferometrischen Detektoren wie dem LIGO wird Laserlicht über große Distanzen hinweg geschickt. Durch den Einfluss von Gravitationswellen macht auch der Laserstrahl einen minimalen Umweg und benötigt dadurch etwas länger. Das LIGO ist der einzige Gravitationswellendetektor, der bisher eine Welle gemessen hat.

Hochfrequenzdetektoren: Mit Hochfrequenzdetektoren kann man, wie der Name schon sagt, nur Gravitationswellen messen, die eine besonders hohe Frequenz haben. Es gibt derzeit mehrere Möglichkeiten für Hochfrequenzdetektoren, es ist fraglich, ob es überhaupt Gravitationswellen gibt, die so eine hohe Frequenz haben.

Pulsar-Timing-Methode: Bei der Pulsar-Timing-Methode beobachtet man das Licht, welches von einem weit entfernten Pulsar kommt. Durch eine Gravitationswelle würde das Licht von dort einen Umweg machen und wir würden die Pulsation minimal später wahrnehmen.

Einstein@home: Da bei der Gravitationswellendetektion sehr viele Daten anfallen, benötigt man sehr viele Computer um auch nur Bruchteile davon zu durchsuchen. Deshalb gibt es das Projekt Einstein@home, bei dem sich jeder freiwillig ein Programm herunterladen kann, dass den Privatcomputer dazu benutzt, um diese Daten zu analysieren.

Lisa Pathfinder

Da über die Gravitationswellen der Erde nur wenig bekannt ist, ist es schwer die Gravitationswellen der Erde aus den Messungen herauszurechnen. Deshalb schickte man einen Gravitationswellendetektor (Lisa Pathfinder) zum nächsten Lagrange Punkt. Dort sind nämlich die Gravitation von Sonne und Erde etwa gleich groß, so dass sie sich aufheben und eine weitgehende Schwerelosigkeit herrscht.

Jetzt denken sich vielleicht manche „Wieso muss man dafür so weit weg fliegen, in der ISS ist doch auch alles schwerelos?“. Das ist zwar richtig, diese Schwerelosigkeit beruht aber nicht darauf, dass kein Gravitationsfeld da ist, sondern darauf, dass die ISS praktisch um die Erde herumfällt. Die Astronauten fallen genau so schnell wie die ISS sind also im Vergleich zur ISS schwerelos. Aus diesem Grund spüren wir auch die Anziehungskraft der Sonne nicht.

[Erklärung der Rotation als Fallbewegung im Maßeinheitenskriptum ①](#)

In der Raumsonde Lisa-Pathfinder schwebt ein Gewicht. Wenn nichts passiert steht sie einfach nur still im Raum herum, schließlich wird sie von allen Seiten gleich stark angezogen. Wenn allerdings eine Gravitationswelle kommt, wird das Gewicht von ihr durchgeschüttelt.

Indirekte Messungen

Auch wenn weder Neutrinos noch Wellen einer Substanz gemessen werden, kann man etwas über sie aussagen: Sie beeinflusst andere Objekte und diese Auswirkungen können wir messen. Insgesamt wissen wir auch in unserer näheren Umgebung von weit mehr als 95% des Universums nur durch indirekte Messungen:

Mehr als zwei Drittel des Universums bestehen aus dunkler Energie. Das wissen wir deshalb, weil sich das Universum ausdehnt, obwohl es eigentlich aufgrund der Gravitation in sich zusammenfallen müsste. Ansonsten interagiert die dunkle Energie überhaupt nicht.

Auch die dunkle Materie, die mehr als ein Viertel des Universums ausmacht, kann man nicht direkt beobachten. Sie interagiert nur über die Gravitation und unsere Gravitationswellendetektoren sind noch zu schwach um sie zu beobachten. Wir wissen nur von ihrer Existenz, weil sie mit ihrer Gravitation die Bahnen von anderen Himmelskörpern beeinflusst.

Auch von den restlichen 5% des Universums können wir nur wenig direkt beobachten. Gerade, wenn es um kleine Objekte, wie Exoplaneten geht, tun sich unsere Instrumente noch schwer. Deshalb hat man die meisten Exoplaneten indirekt nachgewiesen.

[Beispiele für indirekte Beobachtung anhand von Exoplaneten im „Erforschung der \(Exo\)planeten-Skriptum \(i\)](#)