



Multi-Messenger- Astronomie

Nelly Jacobs
Schülerpraktikumsprojekt
Januar 2024

Abb. 1: GSFC Scientific Visualization
Studio/SDO/NASA

Inhaltsverzeichnis

- Was ist Multi-Messenger-Astronomie eigentlich?
- Elektromagnetische Strahlung
 - Optische Astronomie 1
 - Optische Astronomie 2
 - Radioastronomie
 - Wie entsteht Radiostrahlung?
 - Radioteleskop Effelsberg
 - Infrarotstrahlung
- Neutrinos
 - Solare Neutrinos
 - Supernova-Neutrinos
 - Andere Neutrino-Typen
- Gravitationswellen
 - Messmöglichkeiten von Gravitationswellen

Inhaltsverzeichnis 2

- Interferometrischer Detektor
- Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) und Laser Interferometer Space Antenna (LISA)
- Pulsar Timing Array (PTA)
- Körper im Sonnensystem
 - Asteroiden
 - Kometen
 - Meteoriden, Meteoriten, Meteore - Was ist der Unterschied?
- Weiterführende Literatur
- Bild- und Textquellen

Was ist Multi-Messenger-Astronomie eigentlich?

Multi-Messenger-Astronomie befasst sich mit „Boten“ aus dem Weltall, durch die wir mehr über das Universum erfahren. Mittlerweile gibt es für uns sehr viele Boten, wie beispielsweise alle Arten elektromagnetischer Strahlung, Neutrinos, Gravitationswellen, Asteroiden und vieles mehr.

Jedoch kennen wir manche Wege, das Weltall zu erforschen, erst seit kurzer Zeit, wie die Gravitationswellen, deren Existenz erst 2015 direkt bewiesen werden konnte.

Die meiste Zeit über haben die Menschen den Himmel nur mit den Augen oder später auch mit Fernrohren und Teleskopen im sichtbaren Licht erforscht. Heute können wir viel tiefer in den Weltraum eindringen und doch haben wir noch längst nicht alles entdeckt oder gesehen.

Elektromagnetische Strahlung

Es gibt viele Arten von elektromagnetischer Strahlung (z.B. Radiostrahlung, Infrarotstrahlung, sichtbares Licht, Ultraviolett-, Röntgen- und Gammastrahlung). Diese werden durch ihre Wellenlänge (λ in m) oder Frequenz (ν in Hz) unterschieden. Sie haben Wellen- und auch Teilcheneigenschaften und breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Elektromagnetische Wellen entstehen durch die Beschleunigung elektrischer Ladungen. So entsteht z.B. Gammastrahlung durch einen angeregten, schwingenden Atomkern.

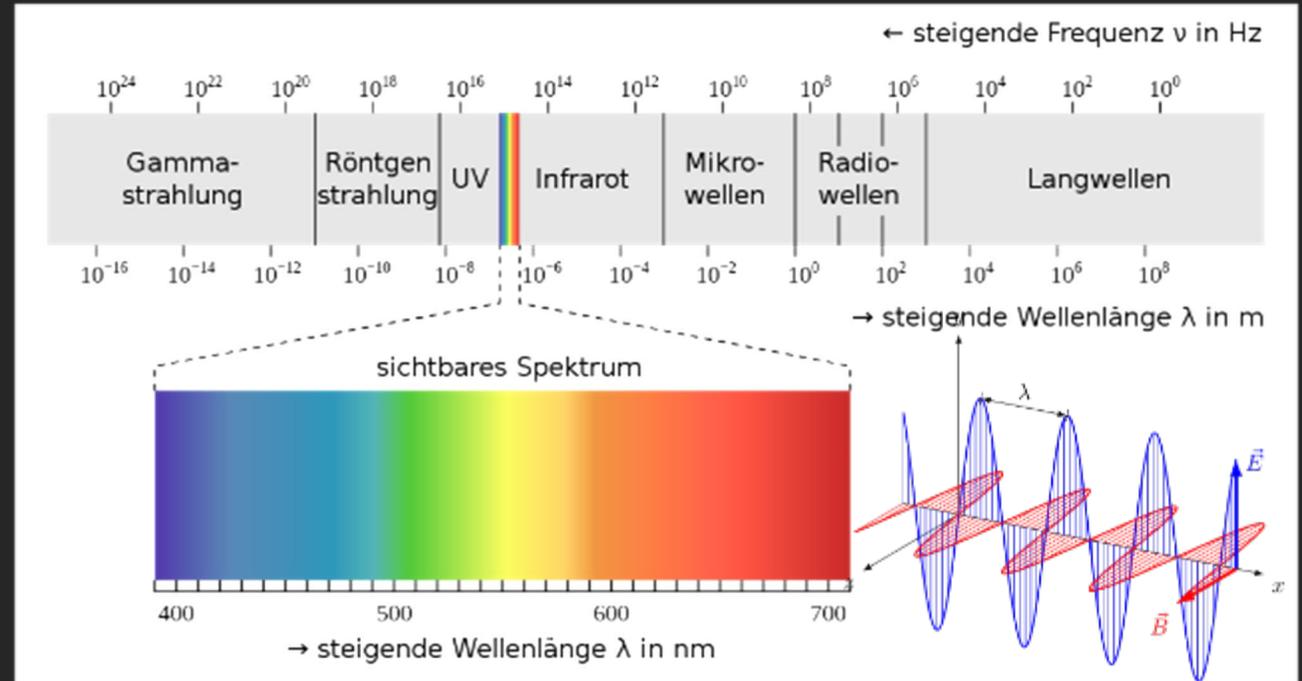


Abb. 3: Matthias M./Wikimedia Commons

Abb. 4: user And1mu/Wikimedia Commons

Optische Astronomie 1

Die optische Astronomie ist der älteste Teil der Astronomie. Bereits im 4. Jahrtausend v. Chr. wurde in Irland die Newgrange-Megalithanlage errichtet, in die nur an den kürzesten Tagen im Jahr für wenige Minuten Licht fällt.

Aber nicht nur der Lauf der Sonne wurde damals beobachtet, sondern auch die Sterne. Vor etwa 3000 Jahren verbanden die Babylonier nämlich schon die Sterne zu Konstellationen am Himmel; sie beobachteten den Lauf von Planeten und Sternen und hielten dies auf Tontafeln fest.

Die Astronomie ist auch eine Wissenschaft, die auf der ganzen Welt verbreitet war und immer noch ist. Dies beweisen z.B. die Stonehenge-Anlage in England, die Pyramiden in Ägypten sowie die Bauten der Maya in Mittelamerika.



Abb. 5: Operarius/Wikimedia Commons (zeigt die Stonehenge-Anlage)

Optische Astronomie 2

Die optische Astronomie befasst sich mit dem für uns sichtbaren Spektrum elektromagnetischer Wellen. Dieser Teil ist ein sehr kleiner Bereich im Spektrum und reicht von 380 bis 780 Nanometern (3800 -7800 Ångström).

Beobachtet wird hier mit optischen Teleskopen, dazu Spektrographen und andere Detektoren. Das Teleskop mit dem größten Einzelspiegel auf der Erde ist momentan das Gran Telescopio Canarias auf La Palma mit einem Spiegeldurchmesser von 10,4 Metern. Im Jahr 2027 soll das ELT in Chile in Betrieb genommen werden, welches dann über einen Hauptspiegel von 39 Metern Durchmesser verfügt.

Wichtig sind aber auch die Weltraumteleskope, wie Hubble und James Webb. Hubble hat einen 2,4 Meter-Spiegel und James Webb einen 6,5 Meter-Primärspiegel. Sie haben nicht die störende Erdatmosphäre im Blick.



Abb. 6: NASA/STS-82 Crew/STScI (zeigt das Hubble-Teleskop)

Radioastronomie

Das Jahr 1930 steht für den Beginn der Radioastronomie, denn zu diesem Zeitpunkt suchte Karl Jansky nach der Ursache einer Störung der Transatlantik-Funkverbindung bei einer Wellenlänge von 14,6 m (20,6 MHz). Durch seine selbst gebaute Antenne wies er 1932 dann zum ersten Mal Radiowellen von außerhalb unseres Sonnensystems in Richtung des galaktischen Zentrums nach.

Die Frequenz von Radiowellen liegt im Bereich von 3 kHz bis jenseits von 300 GHz, was Wellenlängen von 100 km bis unter 1mm entspricht. Der Bereich unter 1 mm Wellenlänge wird dabei als Submillimeterstrahlung bezeichnet. Radiowellen werden heute mit einzelnen Radioteleskopen oder Zusammenschlüssen aus mehreren Antennen/ Parabolspiegeln in sogenannten Arrays gemessen.

Eines dieser Radioteleskope ist das 12-Meter Atacama Pathfinder Experiment (APEX), welches auf über 5000 m Höhe in der Atacama-Wüste in Chile stationiert ist. Durch seine Lage in großer Höhe entzieht es sich zu einem guten Teil der Absorption von mm-Wellen durch Moleküle in der Erdatmosphäre und misst Radiowellen von 0,2 mm bis 2,0 mm Wellenlänge. APEX ist auch Teil des Event Horizon Telescope (EHT), durch das Abbildungen von schwarzen Löchern möglich gemacht wurden.



Abb. 7: Submillimeter-Radioteleskop APEX (Foto: ESO/F. Kamphues)

Wie entsteht Radiostrahlung?

Starke Radiostrahlung am Himmel kommt z. B. von unserer Sonne, Supernovae, Radiogalaxien oder Quasaren.

Sie kann in Plasma (ionisiertem Gas) entstehen, wo Elektronen und Atomkern voneinander getrennt sind. Wenn nun Elektronen durch die elektromagnetische Kraft zu den positiv geladenen Kationen hingezogen werden, werden sie von ihrer Bahn abgelenkt und emittieren dadurch Radiowellen. Man nennt dies thermische Radiostrahlung oder Frei-Frei Strahlung.

Es gibt aber auch nicht-thermische Strahlung, die sogenannte Synchrotronstrahlung. Hierbei werden Elektronen, die sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegen und in ein Magnetfeld treffen, durch die Lorentzkraft von ihrer Bahn abgelenkt. Sie laufen nun auf einer Kreisbahn und verlieren Energie, die in Form von Radiowellen abgestrahlt wird.

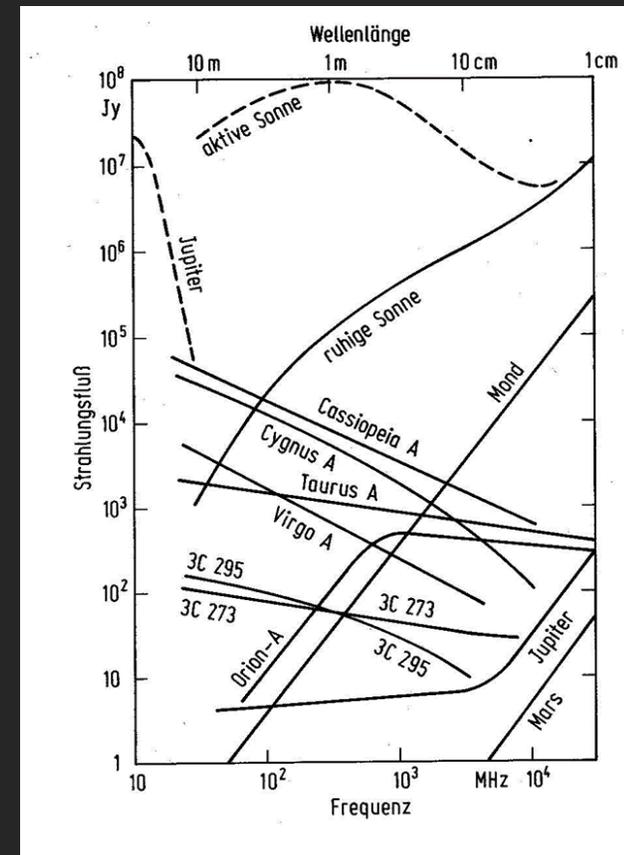


Abb. 8: Starke Radioquellen (Wilhelm Altenhoff, HfS I, S. 250)

Radioteleskop Effelsberg

Das Radioteleskop Effelsberg, welches zum Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn gehört und nahe Bad Münstereifel liegt, ist mit einem 100-Meter Parabolspiegel das zweitgrößte vollbewegliche Radioteleskop der Welt. Es kann um bis zu 480° gedreht werden (Azimut). Dabei wird das Teleskop auf der Schiene mit einer Genauigkeit von 0,3 mm gefahren. Dazu kann der Parabolspiegel von $8,1^\circ$ bis 89° gekippt werden (Elevation).

Das Radioteleskop wurde von 1968 bis 1971 erbaut und 1972 in Betrieb genommen.

Der Hauptreflektor besteht aus 2360 Paneelen und die Apertur hat eine Fläche von ca. 7850 m^2 , womit sie größer als ein Fußballfeld ist.

Die Empfänger des Teleskops decken einen Frequenzbereich von 400 MHz bis 95 GHz ab, was Wellenlängen zwischen 73 cm und 3 mm entspricht. Es werden u.a. Pulsare, kalte Gas- und Staubwolken, Sternentstehungsgebiete, Magnetfelder in verschiedenen Galaxien, Jets von schwarzen Löchern und Kerne von Galaxien beobachtet.



Abb. 9: Radioteleskop Effelsberg (Foto: Nelly Jacobs)

Infrarotstrahlung

Infrarotstrahlung wurde 1800 durch Friedrich Wilhelm Herschel entdeckt. Dieser versuchte, die Temperaturen der verschiedenen Farben des Sonnenlichts zu messen, wobei er feststellte, dass die höchste Temperatur außerhalb des roten Spektralbereiches zu finden war. Lange Zeit war die neue Strahlung als „Wärmestrahlung“ bekannt, bis sich um 1880 der Name „Infrarotstrahlung“ etablierte.

Die Wellenlänge liegt hier zwischen 1 mm und 780 nm (wobei der Bereich zwischen 1 mm und 0,1 mm auch Submillimeterstrahlung genannt wird), die Frequenz zwischen 300 GHz und 385 THz. Zusätzlich wird zwischen naher Infrarotstrahlung direkt jenseits des sichtbaren Spektrums (NIR) und ferner Infrarotstrahlung (FIR) unterschieden.

Da Infrarotstrahlung zum größten Teil von Wasserdampf in der Atmosphäre absorbiert wird, war von 2010-2022 das Flugzeug-Observatorium SOFIA, eine Boeing-747-SP, zur Beobachtung der Infrarotstrahlung im Einsatz. Wegen zu hoher Unterhaltskosten wurde dieses Programm jedoch eingestellt.

Zwar messen viele Weltraumteleskope Infrarotstrahlung, wie auch seit neuestem das James Webb Space Telescope (JWST), aber nur NIR, während SOFIA FIR gemessen hat.



Abb. 10: Flugzeugobservatorium SOFIA (Foto: NASA/Jim Ross)

Neutrinos

Heute kennen wir 3 Arten (Generationen) von Neutrinos. Zuerst sagte Wolfgang Pauli die Existenz des Elektron-Neutrinos (ν_e) hervor, das auch schließlich 1955/1956 durch Clyde Cowan und Frederick Reines unter dem Experiment-Namen ‚Poltergeist‘ im Savannah-River-Kernreaktor nachgewiesen wurde. Um genau zu sein, wurde ein Elektron-Antineutrino durch Betazerfall nachgewiesen (Reaktorneutrino). Frederick Reines erhielt den Physiknobelpreis im Jahr 1995. Als nächstes wurde 1962 das Myon-Neutrino (ν_μ) durch Jack Steinberger, Melvin Schwartz und Leon Lederman entdeckt. Sie erzeugten den ersten an einem Beschleuniger hergestellten Neutrinostrahl und erhielten 1988 den Nobelpreis für Physik. 1975 wurde dann das Tauon entdeckt (Nobelpreis 1995 für Martin Perl). Zu dieser Zeit vermuteten Forscher bereits ein zugehöriges Neutrino, welches 2000 als Tau-Neutrino (ν_τ) mit dem DONUT-Experiment am Fermilab nachgewiesen wurde. Hier wurde ebenfalls ein Neutrinostrahl erzeugt.

Jedoch sind Neutrinos wegen ihrer geringen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit schwer nachzuweisen. Wichtige Nachweis-Experimente sind das IceCube Neutrino Observatory am Südpol und das ANTARES-Neutrinoobservatorium im Mittelmeer.

Die Energie von Neutrinos reicht von Mikroelektronenvolt (μeV) bis Exaelektronenvolt (EeV).

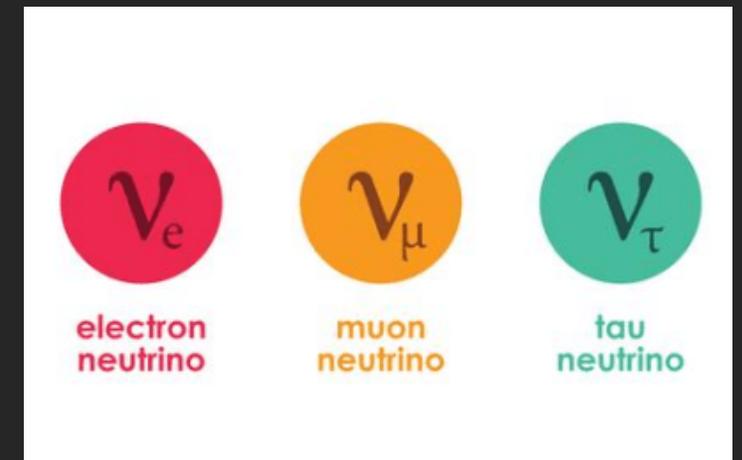


Abb. 11.: IceCube Collaboration

Solare Neutrinos

Es gibt zusätzlich zu den 3 Neutrino-Generationen noch eine unterschiedliche Herkunft von Neutrinos. Sie kommen z.B. von der Sonne (solare Neutrinos). Diese entstehen im Zentrum unserer Sonne, während der Kernfusion in der Proton-Proton-Kette (PP-Kette). Durch die PP-Reaktion wird Wasserstoff (H-1) zu Helium (He-4) fusioniert, indem zuerst zwei H-1 Kerne (Protonen) fusionieren und somit ein Deuterium-Kern (H-2) entsteht. Dabei werden ein Positron und ein Elektron-Neutrino freigesetzt. Danach fusionieren ein H-2 Kern und ein H-1 Kern (Proton) zu einem He-3 Kern und es wird Gammastrahlung frei. Beim letzten Schritt fusionieren zwei He-3 Kerne zu einem He-4 Kern, unter Abgabe von zwei Protonen.

Auf der Erde gibt es dadurch einen Neutrinofluss von 10^{11} Neutrinos pro Quadratcentimeter und Sekunde. Durch das Homestake-Experiment wies Ray Davis solare Neutrinos in den 1970er Jahren nach. Das Experiment bestand aus einem Tank mit 380 000 l Perchloräthylen. Die Einfangsreaktion eines Neutrinos war



Das entstandene radioaktive Argon konnte man nachweisen, jedoch flogen statt 10^{11} Neutrinos pro Quadratcentimeter und Sekunde nur wenige pro Monat durch den Tank. Manche Forscher hatten die extreme Annahme die Sonne sei erloschen, doch der eigentliche Grund ist die sogenannte Neutrino-Oszillation. Denn die Elektron-Neutrinos wandeln sich auf ihrem Weg zur Erde in Myon- und Tau-Neutrinos um, das Homestake-Experiment war jedoch nur auf Elektron-Neutrinos empfindlich.

Ray Davis erhielt im Jahr 2002 den Physiknobelpreis für seine Erforschung der Neutrinos mit dem Homestake-Experiment.

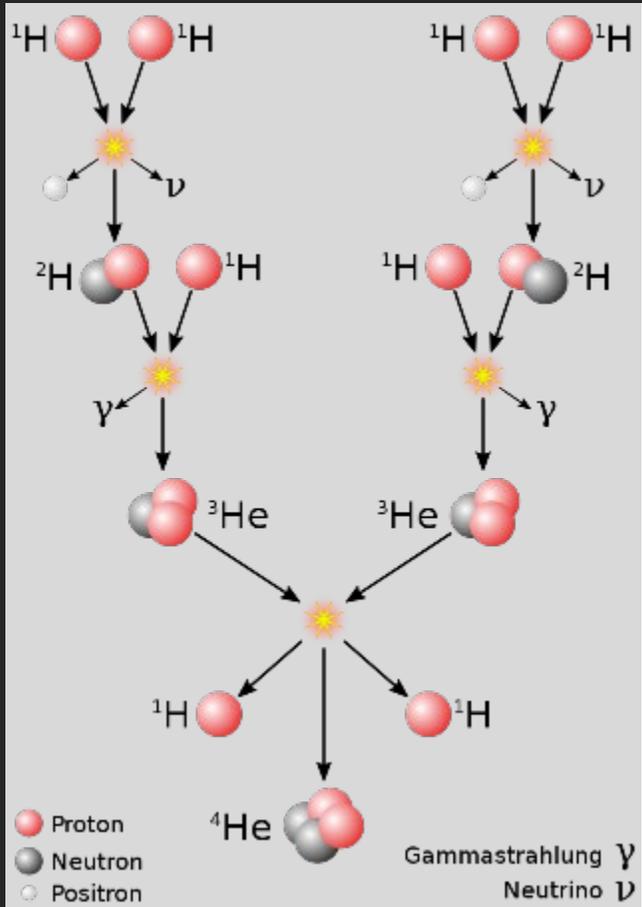


Abb. 12: PP-Kette (Bild: Sarang/Wikimedia Commons)



Abb. 13: Homestake-Experiment (Foto: U.S. Department of Energy/Wikipedia)

Supernova-Neutrinos

Zum ersten und bisher einzigen Mal wurden Supernova-Neutrinos im Jahr 1987 nachgewiesen. Sie wurden ausgesandt von der Supernova SN 1987A. Ihr Vorgängerstern war Sanduleak -69° 202a in der großen Magellanschen Wolke.

Erstmals entdeckt wurde die Supernova von Ian Shelton, der sie auf einer zuvor produzierten Fotoplatte entdeckte. Einige Stunden zuvor hatte der Schotte Robert McNaught bereits eine Fotoplatte entwickelt, auf der die Supernova zu sehen war. Er legte sie jedoch bei Seite und wertete sie nicht sofort aus. Als sich die Nachricht der Entdeckung verbreitete, durchsuchten Wissenschaftler die Daten der Neutrino-Detektoren. Dabei wurden in drei verschiedenen Detektoren zur gleichen Zeit Signale empfangen, und zwar zwei Stunden vor Eintreffen der Lichtwelle von der Supernova. Es wurden 12 Reaktionen in Kamiokande, Japan, registriert, 8 beim IMB-Detektor in Cleveland, USA, und 5 von BUST im Kaukasus, Russland.

Supernova-Neutrinos entstehen, wie schon bei solaren Neutrinos gezeigt, durch Kernfusion. Bei einer Supernova werden aber schwerere Elemente als Wasserstoff fusioniert. Zudem tragen Neutrinos während einer Supernova die meiste Energie nach außen, wobei sie das Innere des Sterns abkühlen und das Äußere erhitzen. Somit lassen sie den Stern erst explodieren.



Abb. 14: Supernova 1987A (Bild: ESA/Hubble, NASA)

Andere Neutrino-Typen

Außer Reaktor-, Supernova- und solaren Neutrinos gibt es z.B. noch kosmische, Geo- und atmosphärische Neutrinos.

Kosmische Neutrinos, auch als kosmischer Neutrinohintergrund bezeichnet, bilden den Teil der kosmischen Hintergrundstrahlung, der aus Neutrinos besteht. Da diese Neutrinos jedoch nicht, wie der kosmische Mikrowellenhintergrund, 380 000 Jahre nach dem Urknall entstanden ist, sondern ca. 1-2 Sekunden nach dem Urknall, könnte uns der kosmische Neutrinohintergrund neue Türen zur Erforschung vom Beginn des Universums öffnen. Das geplante Ptolemy-Experiment in Princeton hat das Ziel, diesen Hintergrund zu messen.

Geoneutrinos entstehen durch Betazerfälle von Radioisotopen in der Erdkruste. Zu diesen Radioisotopen gehören beispielsweise Uran-238 (^{238}U), Thorium-232 (^{232}Th) und Kalium-40 (^{40}K). Geoneutrinos konnten bereits mit dem Borexino-Experiment in Italien nachgewiesen werden.

Zuletzt noch zu atmosphärischen Neutrinos: Sie entstehen in der Atmosphäre, wenn Atomkerne auf Teilchen der Erdatmosphäre treffen, wodurch weitere Teilchen entstehen, die wiederum zerfallen. Dabei entstehen geladene Myonen mit ihren zugehörigen Neutrinos, den Myon-Neutrinos (ν_{μ}). Wenn die instabilen Myonen, deren Lebensdauer 2,2 μs beträgt, zerfallen, entstehen Elektronen und weitere Neutrinos, die Elektron-Neutrinos (ν_e). Atmosphärische Neutrinos konnten ähnlich wie andere Neutrino-Typen nachgewiesen werden.

Gravitationswellen

Bereits 1916 folgerte Albert Einstein durch seine allgemeine Relativitätstheorie, dass Gravitationswellen, auch Schwerkraftwellen genannt, existieren müssen.

Der indirekte erste Beweis für ihre Existenz wurde 1974 durch Joseph Taylor und Russell Hulse erbracht. Sie entdeckten das erste Doppelsternsystem mit einem Pulsar und zeigten anschließend, dass sich die Periode des Pulsars vergrößerte, das System also Energie verlor. Der gemessene Energieverlust stimmte mit hoher Genauigkeit mit den erwarteten Abstrahlungen durch Gravitationswellen überein. Beide erhielten dafür 1993 den Physiknobelpreis. Im September 2015 wurden Gravitationswellen von der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher dann schließlich direkt durch LIGO gemessen.

Gravitationswellen entstehen, wenn sich massereiche Himmelsobjekte, wie Schwarze Löcher oder Neutronensterne, umkreisen und miteinander verschmelzen. Dabei stauchen und strecken sie die Raumzeit, weil diese durch die schweren Körper gekrümmt wird.

Gravitationswellen dehnen sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.

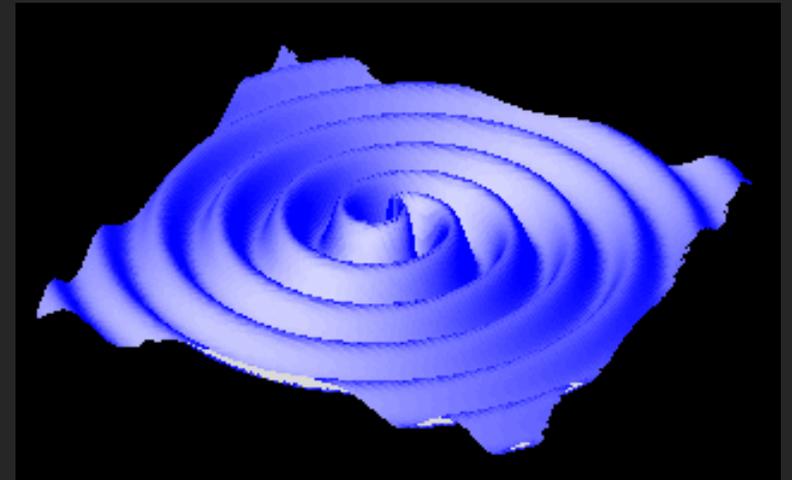


Abb. 15: Darstellung von Gravitationswellen (Bild: NASA/JPL)

Messmöglichkeiten von Gravitationswellen

Das LIGO-Observatorium in den USA misst Gravitationswellen mit Frequenzen zwischen 30 Hz und 7 kHz. Das VIRGO-Observatorium in Italien misst bei sehr ähnlichen Frequenzen. Beides sind Interferometer auf der Erde.

Das Weltrauminterferometer LISA (Laser Interferometer Space Antenna) wird einen Frequenzbereich von 0,1 mHz bis 0,1 Hz abdecken.

Mithilfe von systematischen Pulsarbeobachtungen durch Pulsar Timing Arrays (PTAs) können Gravitationswellen im Nanohertz-Frequenzband (10^{-9} Hz) erkannt und charakterisiert werden.

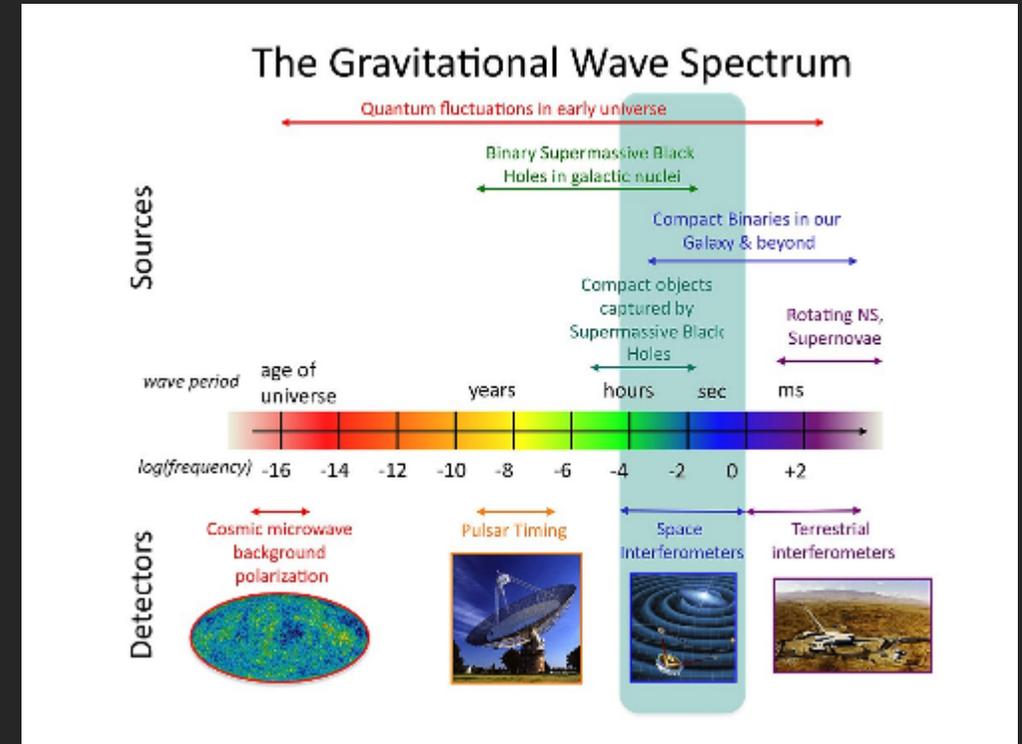


Abb. 16: Gravitationswellenspektrum (NASA)

Interferometrischer Detektor

Gravitationswellen können durch zwei unterschiedliche Detektoren gemessen werden. Zum einen durch Resonanzdetektoren und zum anderen durch interferometrische Detektoren. Jedoch können Resonanzdetektoren nur sehr starke Gravitationswellen messen.

Interferometrische Detektoren senden einen Laserstrahl aus, der durch einen halbdurchlässigen Spiegel in zwei einzelne Strahlen geteilt wird. Diese beiden Strahlen durchlaufen zwei Interferometerarme, die im rechten Winkel zueinander stehen. Wenn nun eine Gravitationswelle ihren Weg kreuzt, staucht und streckt sie den Raum für kurze Zeit. Dadurch überlagern die beiden Lichtstrahlen sich nicht mehr, wie sie es vorher getan haben. Sie hinterlassen sogenannte Interferenzmuster.

Die relative Längenänderung der Interferometerarme bei dem ersten gemessenen Gravitationswellensignal betrug 10^{-21} . LIGO ist in der Lage, Längenänderungen von 10^{-19} Metern zu messen.

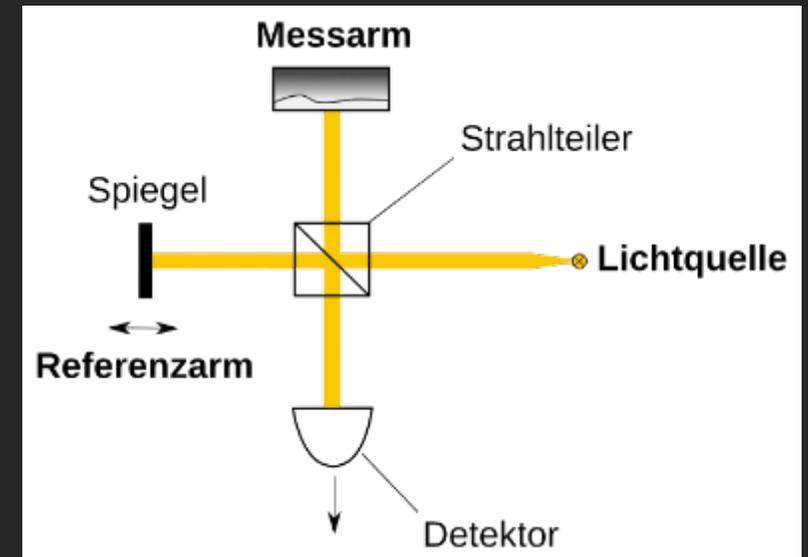


Abb. 17: Schema eines Interferometrischen Detektors für Gravitationswellen (Bild: Muskid/Wikimedia Commons)

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) und Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

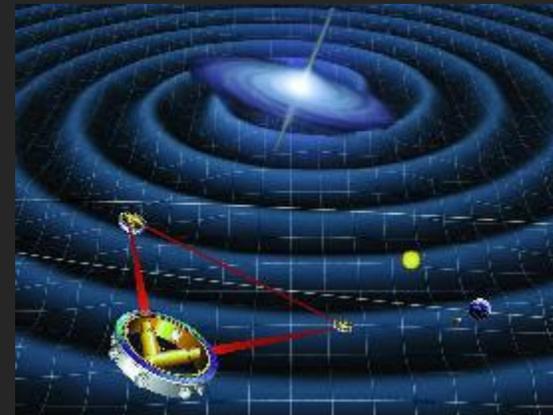
LIGO ist ein Gravitationswellen-Observatorium, das aus zwei separaten Observatorien besteht. Sie liegen in Hanford (Washington) und Livingston (Louisiana). Sie sind 3000 km voneinander entfernt, wodurch man lokale Störungen bei der Signalaufnahme ausschließen kann.

Beide Observatorien haben jeweils zwei zueinander orthogonale Interferometerarme mit jeweils 4 km Länge. Diese bilden Michelson-Interferometer.



Abb. 18: LIGO Livingston (Foto: Caltech/MIT/LIGO Lab)

Abb. 19: Schema von LISA (Bild: NASA)



LISA ist das Projekt des ersten Weltraum-Gravitationswellen-Observatoriums, welches 2034 als Mission der ESA ins All starten soll. LISA besteht aus 3 Satelliten, die einen dreieckigen Detektor formen.

Die Armlänge von LISA (Abstand der Satelliten) wird etwa 2,5 Millionen Kilometer betragen. Zum Vergleich: Die Interferometerarme von LIGO sind 4 km lang.

Pulsar Timing Array (PTA)

Mithilfe von Pulsar Timing Arrays (PTAs) können Gravitationswellen im Nanohertz-Frequenzbereich (10^{-9} Hz) erkannt und charakterisiert werden.

Denn dadurch, dass Gravitationswellen die Raumzeit stauchen und strecken, beeinflussen sie auch elektromagnetische Wellen, wie Radioimpulse von Pulsaren. So brauchen die Impulse entweder länger oder kürzer, um zur Erde zu gelangen, wenn Gravitationswellen sie durchqueren.

Um diese sehr geringen Schwankungen genau bestimmen zu können, wird ein Ensemble von Millisekunden-Pulsaren beobachtet, da ihre Rotationseigenschaften sehr stabil und vorhersagbar sind.

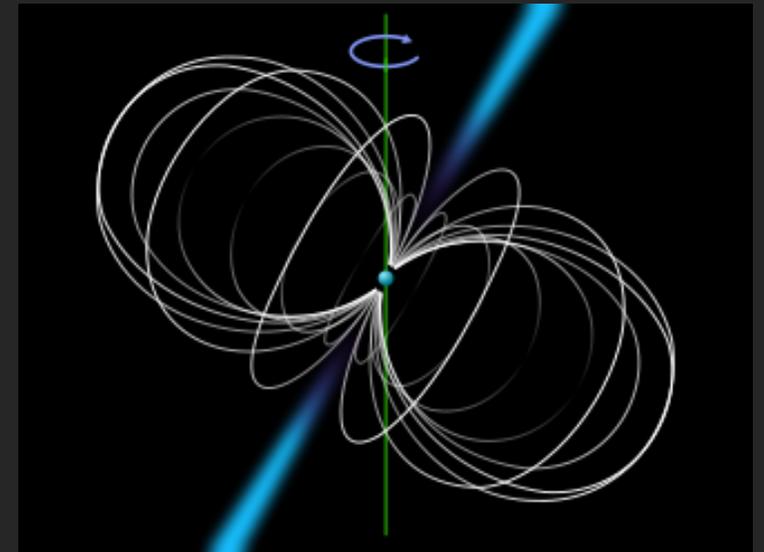


Abb. 20: Schemabild Pulsar und sein Magnetfeld (Mysid/Jm smits/Wikimedia Commons)

Asteroiden

Asteroiden, auch Kleinplaneten und Planetoiden genannt, sind übriggebliebene Kleinkörper aus der Entstehungsphase des Sonnensystems vor 4,5 Milliarden Jahren, die sich auf keplerschen Bahnen um die Sonne bewegen. Sie bestehen aus Gestein, Metall und manchmal zu einem kleinen Teil aus Eis. Der größte uns bekannte Asteroid ist, mit einem Äquatordurchmesser von 2370 km, Pluto im Kuipergürtel (Asteroidengürtel außerhalb der Bahn von Neptun). Er wird auch als Zwergplanet bezeichnet. Im Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter ist der Zwergplanet Ceres mit einem Äquatordurchmesser von 964 km der größte Asteroid.

Manche Asteroiden konnten bereits sehr gut erforscht werden, indem mithilfe von Sonden Materialproben zur Erde geholt wurden. So ist z.B. die Probe des Asteroiden Benu, die durch die OSIRIS-REx-Mission gesammelt wurde, am 24. September 2023 auf der Erde gelandet. Die Sonde startete am 8. September 2016 zu Benu, dessen Durchmesser bei ca. 500 m liegt. Bisher wurden in den Proben Wasser und Kohlenstoff gefunden, die eine Grundvoraussetzung für Leben darstellen.

Der Asteroid Benu könnte bis zum Jahr 2300 mit der Erde kollidieren. Die Wahrscheinlichkeit dafür liegt jedoch bei nur 0,057 %.

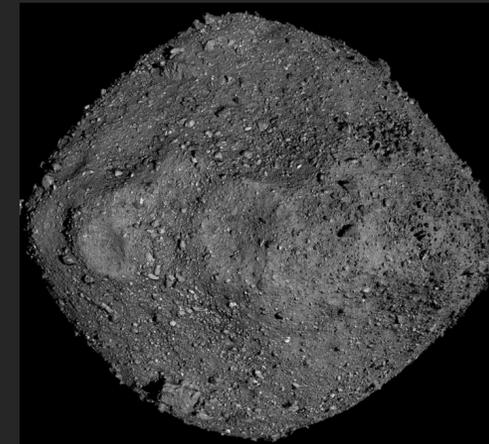


Abb. 21: Asteroid Benu (NASA/Goddard/University of Arizona)



Abb. 22: Zwergplanet Pluto (Foto: Raumsonde New Horizons, NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute/Alex Parker)

Kometen

Kometen ähneln Asteroiden durch ihre Gesteinsoberfläche und ihre Größe von meist über 100 Metern bis hin zu wenigen Kilometern. Jedoch unterscheidet sich ihre Zusammensetzung stark. Denn Kometen bestehen zu einem großen Teil aus Eis, Wasser, Staub und gefrorenen Gasen. Diese Bestandteile verursachen auch den charakteristischen Kometenschweif. Wenn nämlich Kometen, die sich meistens im Kuipergürtel befinden, in das innere Sonnensystem gelangen, verdampfen die Gase und das Wasser durch die Sonneneinstrahlung und bilden zusammen mit Kometenstaub eine Koma (Hülle aus Wasser und Staub um den Kern des Kometen). Diese Koma wird durch den Sonnenwind verweht und bildet einen Kometenschweif von mehreren 10 bis 100 Millionen Kilometern Länge.

Im Jahr 2015 landete Philae, ein Lander der Rosetta-Mission, auf dem Kometen 67 P/Tschurjumow-Gerassimenko. Der vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln gesteuerte Lander sendete dann über die Muttersonde Rosetta eine Zeit lang Daten zu Erde.

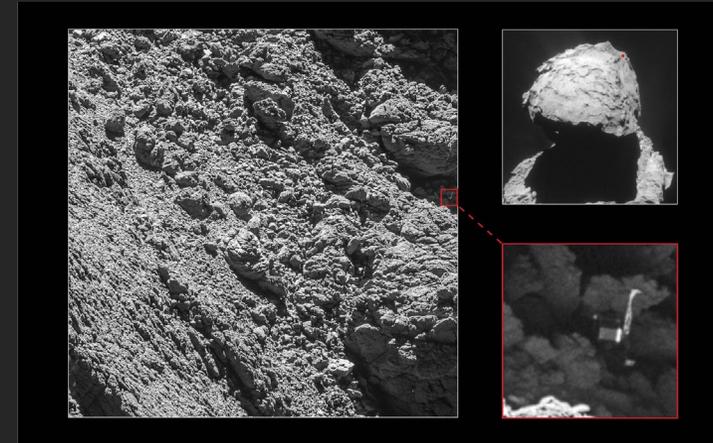


Abb. 23: Lander Philae der Kometensonde Rosetta auf der Oberfläche des Kometen 67 P/Tschurjumow-Gerassimenko (ESA)



Abb. 24: Komet Hale-Bopp von 1997 (Geoff Chester/United States Naval Observatory)

Meteoriden, Meteoriten, Meteore- Was ist der Unterschied?

Als Meteoriden oder Meteoroiden bezeichnet man Kleinkörper, die z.B. aus Asteroidengürteln oder Kometenkernen herausgelöst wurden. Sie können auch entstehen, wenn Asteroiden oder Kometen mit anderen Himmelskörpern, wie z.B. Planeten, kollidieren und anschließend in kleinere Teile zerbersten. Es gibt keine genaue Größenordnung von Meteoriden, jedoch lässt sich sagen, dass sie kleiner als Asteroiden sind. Somit können sie weniger als 1 Millimeter bis mehrere Meter groß sein.

Wenn diese Meteoriden in die Erdatmosphäre eintreten, verglühen sie meistens und man kann einen Schweif am Himmel beobachten. Diesen Lichtschweif nennt man Meteor. Dabei werden kleine Meteore auch als Sternschnuppen bezeichnet. Größere Meteore werden auch Feuerkugeln oder Boliden genannt.

Die meisten Meteoriden verglühen also in der Atmosphäre. Es gibt aber auch Meteoriden, die auf der Erdoberfläche einschlagen. Das sind Meteoriten. Meteoriten, die kleiner als 1 mm sind (Mikrometeoriten) fallen langsam als Meteorstaub zu Boden.



Abb. 25: Meteorit (Museopedia/Wikimedia Commons)



Abb. 26: Meteor (Michael Eberth/Wikimedia Commons)

Weiterführende Literatur

- John E. Beckmann, „Multimessenger Astronomie“ (Springer Verlag, erscheint am 07.04.2024)
- Christian Spiering, „Neutrinoastronomie“ (Springer Verlag 2021)
- Thomas Lauterbach, „Radioastronomie“ (Springer Verlag 2020)
- Claus Grupen, „Einstieg in die Astroteilchenphysik“ (Springer Verlag 2018)
 - verkürzte Version (als „Springer Essential“): Claus Grupen, „Neutrinos, Dunkle Materie und Co.“ (2019)
- Peter G. Mezger, „Blick in das kalte Weltall“ (DVA 1992)
- Arnold Hanslmeier, „Faszination Astronomie“ (Springer Verlag 2021)
- Martin Harwit, „Cosmic Messengers“ (Cambridge University Press 2021)

Bildquellen 1

- Abb. 1: <https://apod.nasa.gov/apod/ap131221.html>, abgerufen am 25.01.2024
- Abb. 2: <https://apod.nasa.gov/apod/ap210802.html>, abgerufen am 25.01.2024
- Abb. 3: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM-Spektrum.svg>, abgerufen am 17.01.2024
- Abb. 4: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM-Wave_noGIF.svg, abgerufen am 15.01.2024
- Abb. 5: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Stonehenge,_Salisbury_retouched.jpg, abgerufen am 18.01.2024
- Abb. 6: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25565763>, abgerufen am 18.01.2024
- Abb. 7: <https://www.eso.org/public/germany/images/kamphues-alma-93/>, abgerufen am 22.01.2024
- Abb. 8: Wilhelm Altenhoff, Handbuch für Sternfreunde, Band 1, S. 250 (Springer Verlag 1989)
- Abb. 9: eigenes Bild
- Abb. 10: <https://science.nasa.gov/mission/sofia/>, abgerufen am 22.01.2024

Bildquellen 2

- Abb. 11: <https://icecube.wisc.edu/news/research/2017/01/ghost-particles-could-improve-understanding-universe/>, abgerufen am 24.01.2024
- Abb. 12: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fusion_in_the_Sun.svg, abgerufen am 24.01.2024
- Abb. 13:
[https://en.wikipedia.org/wiki/Homestake_experiment#/media/File:U.S._Department_of_Energy_-_Science_-_390_002_007_\(9952118384\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Homestake_experiment#/media/File:U.S._Department_of_Energy_-_Science_-_390_002_007_(9952118384).jpg), abgerufen am 26.01.2024
- Abb. 14: <https://apod.nasa.gov/apod/ap170305.html>, abgerufen am 24.01.2024
- Abb. 15: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswelle#/media/Datei:Wavy.gif>, abgerufen am 22.01.2024
- Abb. 16:
https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswelle#/media/Datei:The_Gravitational_wave_spectrum_Sources_and_Detectors.jpg, abgerufen am 16.01.2024
- Abb. 17: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Interferometer-Prinzip.svg>, abgerufen am 16.01.2024
- Abb. 18: <https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20150731c>, abgerufen am 25.01.2024

Bildquellen 3

- Abb. 19: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:LISA-waves.jpg>, abgerufen am 15.01.2024
- Abb. 20: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Pulsar_schematic.svg, Urheber:[User:Mysid](#), [User:Jm smits](#), abgerufen am 16.01.2024
- Abb. 21: <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-spacecraft-provides-insight-into-asteroid-bennus-future-orbit/>, abgerufen am 25.01.2024
- Abb. 22: https://pluto.jhuapl.edu/Galleries/Featured-Images/image.php?page=1&gallery_id=2&image_id=543, abgerufen am 25.01.2024
- Abb. 23: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Rosetta/Philae_found, abgerufen am 25.01.2024
- Abb. 24: <https://www.cnmoc.usff.navy.mil/usno/>, abgerufen am 25.01.2024
- Abb. 25: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Murchison_Meteorit_01.jpg, abgerufen am 25.01.2024
- Abb. 26: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meteor_8.5.2016.jpg, abgerufen am 25.01.2024

Textquellen 1

- Elektromagnetische Strahlung
 - https://www.physik.fu-berlin.de/en/einrichtungen/ag/ag-dau/Teaching/NF-Physik_WS1718/Vorlesung-19---Notizen.pdf, abgerufen am 17.01.2024)
- Optische Astronomie 1
 - <https://sternwarte-recklinghausen.de/astronomie/astronomie-im-alten-europa/>, abgerufen am 17.01.2024
 - <https://www.uibk.ac.at/historische-sternwarte/zur-geschichte-der-astronomie/#:~:text=Schon%20in%20den%20ersten%20Hochkulturen,und%20Planeten%20%E2%80%93%20auf%20Tontafeln%20festhielt.>, abgerufen am 17.01.2024
- Optische Astronomie 2
 - <https://www.leifiphysik.de/optik/elektromagnetisches-spektrum/grundwissen/sichtbares-licht>, abgerufen am 18.01.2024
 - https://de.wikipedia.org/wiki/Extremely_Large_Telescope, abgerufen am 18.01.2024
 - <https://de.wikipedia.org/wiki/James-Webb-Weltraumteleskop>, abgerufen am 18.01.2024
 - <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Weltraumteleskop>, abgerufen am 18.01.2024
- Radioastronomie
 - Peter G. Mezger, Blick in das kalte Weltall S.11-13 (DVA 1992)
- Wie entsteht Radiostrahlung?
 - https://www.mpifr-bonn.mpg.de/412794/michael_weber, abgerufen am 22.01.2024

Textquellen 2

- Radioteleskop Effelsberg
 - <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/601886/frequenzbereiche>, abgerufen am 23.01.2024
- Infrarotstrahlung
 - [hes-spektrum/infrarotstrahlung/https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/licht/elektromagnetisc](https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/licht/elektromagnetisc), abgerufen am 18.01.2024
 - <https://www.leifiphysik.de/optik/elektromagnetisches-spektrum/grundwissen/infrarot>, abgerufen am 18.01.2024
- Neutrinos
 - Claus Grupen; Neutrinos, Dunkle Materie und Co. S.27-31 (Springer Verlag 2019)
 - <https://de.wikipedia.org/wiki/Neutrino> (abgerufen am 24.01.2024)
- Solare Neutrinos
 - Claus Grupen; Neutrinos, Dunkle Materie und Co. S.27-31 (Springer Verlag 2019)
 - Christian Spiering, Neutrinoastronomie S. 104-111 (Springer Verlag 2021)
- Andere Neutrino-Typen
 - Claus Grupen; Neutrinos, Dunkle Materie und Co. S. 33 (Springer Verlag 2019)
 - https://de.wikipedia.org/wiki/Kosmischer_Neutrinohintergrund, abgerufen 24.01.2024
 - <https://www.hap-astroteilchen.de/121.php> (abgerufen 24.01.2024)

Textquellen 3

- Gravitationswellen
 - Claus Grupen, Astroteilchenphysik S.189, 190 (Springer Verlag 2018)
 - Martin Harwit, Cosmic Messengers S. 133 (Cambridge University Press 2021)
- Messmöglichkeiten von Gravitationswellen
 - <https://www.ligo.caltech.edu/page/ligo-technology>, abgerufen am 16.01.2024
 - <https://en.wikipedia.org/wiki/LIGO>, abgerufen am 16.01.2024
 - <https://www.virgo-gw.eu/science/detector/sensitivity/>, abgerufen am 16.01.2024
 - [https://www.elisascience.org/news/top-news/nach-erfolgreicher-uberprufung-beginnt-fur-die-lisa-mission-die-nachste#:~:text=LISA%20soll%202034%20als%20Mission,\(ESA\)%20ins%20All%20starten.](https://www.elisascience.org/news/top-news/nach-erfolgreicher-uberprufung-beginnt-fur-die-lisa-mission-die-nachste#:~:text=LISA%20soll%202034%20als%20Mission,(ESA)%20ins%20All%20starten.), abgerufen am 16.01.2024
 - <https://www.aei.mpg.de/lisa-de>, abgerufen am 16.01.2024
 - Claus Grupen, Astroteilchenphysik S.197, 198 (Springer Verlag 2018)
 - <https://www.aei.mpg.de/ptas>, abgerufen am 16.01.2024
- Interferometrischer Detektor
 - <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswellendetektor>, abgerufen am 16.01.2024
 - Claus Grupen, Astroteilchenphysik S. 189, 190 (Springer Verlag 2018)

Textquellen 4

- LIGO und LISA
 - <https://www.ligo.caltech.edu/page/ligo-technology>, abgerufen am 16.01.2024
 - <https://en.wikipedia.org/wiki/LIGO>, abgerufen am 16.01.2024
 - [https://www.elisascience.org/news/top-news/nach-erfolgreicher-uberprufung-beginnt-fur-die-lisa-mission-die-nachste#:~:text=LISA%20soll%202034%20als%20Mission,\(ESA\)%20ins%20All%20starten.](https://www.elisascience.org/news/top-news/nach-erfolgreicher-uberprufung-beginnt-fur-die-lisa-mission-die-nachste#:~:text=LISA%20soll%202034%20als%20Mission,(ESA)%20ins%20All%20starten.), abgerufen am 16.01.2024
 - <https://www.aei.mpg.de/lisa-de>, abgerufen am 16.01.2024
 - Claus Grupen, Astroteilchenphysik S.197, 198 (Springer Verlag 2018)
- Pulsar Timing Array (PTA)
 - <https://www.aei.mpg.de/ptas>, abgerufen am 17.01.2024
 - https://www.mpifr-bonn.mpg.de/6843980/Benjamin_Speich.pdf, abgerufen am 26.01.2024
- Asteroiden
 - <https://www.tagesschau.de/wissen/forschung/asteroid-wasser-kohlenstoff-100.html>, abgerufen am 25.01.2024
 - John Etienne Beckman, Multimessenger Astronomy S. 332 (Springer Verlag 2021)
- Kometen
 - <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/von-meteoriten-bis-kleinplaneten/kometen/>, abgerufen am 25.01.2024
- Meteoriden, Meteoriten, Meteore
 - <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/von-meteoriten-bis-kleinplaneten/meteoriten/>, abgerufen am 25.01.2024
 - <https://www.ardalpha.de/wissen/weltall/astronomie/meteoriten-meteoroiden-sternschnuppen-meteor-100.html>, abgerufen am 25.01.2024