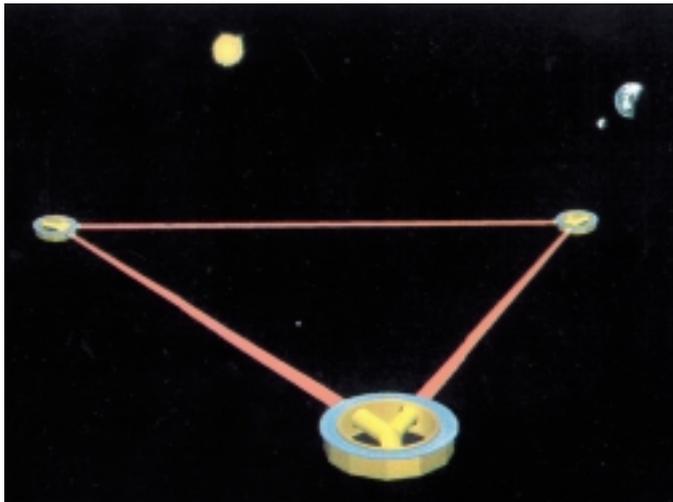


Gravitationswellen – ein neues Fenster zum Universum

Peter Aufmuth und Albrecht Rüdiger

Die von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Gravitationswellen sind bisher noch nicht direkt beobachtet worden. In Europa, Japan und den USA hat man mit dem Bau von großen Laserinterferometern begonnen, die dies ermöglichen sollen. Damit eröffnet sich die Aussicht, bisher verschlossene Bereiche des Weltalls durch Gravitationswellenastronomie zu studieren.

Wenige Monate nach der Fertigstellung der Allgemeinen Relativitätstheorie im November 1915 erkannte Einstein, dass aus seiner Theorie zwangsläufig die Existenz von Gravitationswellen folgt. Unter den vielen stets mit Glanz bestandenen Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie ist es besonders diese Voraussage, die noch der Bestätigung durch einen direkten Nachweis harret.



Massen rufen eine Krümmung der Raumzeit hervor. Licht und Materie sind gezwungen, sich entsprechend dieser nicht-euklidischen Metrik zu bewegen. Da sich alle Materie in Bewegung befindet, ändert sich die Geometrie der Raumzeit ständig. John A. Wheeler prägte daher den Namen Geometrodynamik für Einsteins Gravitationstheorie [1].

Allgemeine Relativitätstheorie und Gravitationswellen

Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Gravitation nicht als Kraft, sondern als Aspekt der Geometrie des Raum-Zeit-Kontinuums, kurz Raumzeit. Anders als in der Newtonschen Physik wird der Raum hier nicht durch eine ebene (Euklidische), sondern durch eine gekrümmte (Riemannsche) Geometrie beschrieben. Der Raum selbst ist keine absolute unveränderliche Größe mehr, da er durch die Verteilung von Masse und Energie im Universum beeinflusst wird. Die Grundidee der Allgemeinen Relativitätstheorie ist: Die Materie bestimmt die Krümmung des Raumes, und der Raum bestimmt die Bewegung der Materie.

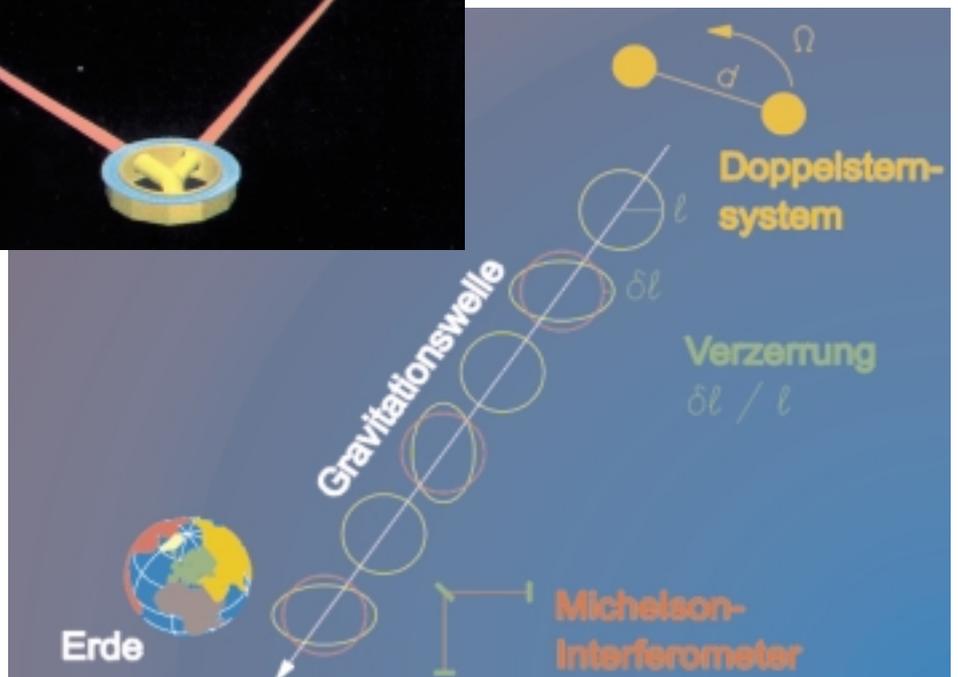


Abb. 1. Unten: Zwei Sterne kreisen im Abstand d mit der Frequenz Ω umeinander und strahlen dabei Energie in Form von Gravitationswellen ab. Deren Wirkung zeigt sich beispielsweise als Verzerrung eines Kreises (Radius l) von Testmassen in eine Ellipse mit maximaler Verzerrung δl . Oben: Das geplante Weltrauminterferometer LISA besteht aus drei Satelliten im Abstand von 5 Millionen km, die entlang der Erdbahn um die Sonne kreisen.

Analog zur Elektrodynamik, in der jede beschleunigt bewegte Ladung elektromagnetische Wellen abstrahlt, geben auch beschleunigte Massen Gravitationswellen ab. In Einsteins Theorie sind sie transversal und breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Eine Gravitationswelle äußert sich in einer Verformung der Raumzeit, das heißt in einer Änderung δl des Abstandes l zwischen zwei Testmassen (Abbildung 1). Als Maß für die Stärke h von Gravitationswellen hat sich das Doppelte der relativen Änderung eingebürgert: $h = 2\delta l/l$. Man nennt diese Größe auch Gravitationswellenamplitude oder einfach Raumdehnung. Da h eine Amplitude ist, nimmt sie wie die elektrische Feldstärke nur einfach invers mit dem Abstand D von der Quelle ab, nicht mit $1/D^2$.

Die wesentlichen Eigenschaften einer Gravitationswelle lassen sich aus der Tatsache herleiten, dass es nur Massen eines Vorzeichens gibt. Aus diesem Grund geben erst beschleunigte Massenquadrupole Strahlung ab, während es sich bei elektrischen Ladungen vornehmlich um Dipolstrahlung handelt. Damit hängt auch zusammen, dass die beiden möglichen Polarisationsrichtungen nicht wie im elektromagnetischen Fall senkrecht aufeinander stehen, sondern sich um 45° voneinander unterscheiden. Im Teilchenbild hat das masselose Feldteilchen (Graviton) deshalb den Spin $S = 2$, während das Photon $S = 1$ hat.

Die von kosmischen Quellen ausgehende Strahlungsleistung kann sehr hoch sein. Bei einer typischen Supernova in der Nähe der Milchstraße, wie der Supernova 1987A in der 160 000 Lichtjahre entfernten Großen Magellanschen Wolke, treffen auf der Erde etwa 10^{31} Gravitonen pro Quadratmeter und Sekunde ein. Ein weiteres Beispiel: Zwei einander im Abstand von 100 km mit einer Periode von 0,01 Sekunden umkreisende Neutronensterne mit jeweils 1,4 Sonnenmassen im 28 000 Lichtjahre entfernten Zentrum der Milchstraße strahlen eine Leistung von etwa 10^{45} W ab, was am Ort der Erde eine Leistungsdichte von 10^5 W/m² zur Folge hat. Das entspricht dem Hundertfachen der Strahlungsleistung der Sonne am Ort der Erde. Dennoch bewirkt diese hohe Leistungsdichte nur eine relative Längenänderung von $\delta l/l \sim 10^{-18}$. Dies ist eine Folge der geringen Wechselwirkung der Gravitonen mit Materie. Deshalb kann man Gravitationswellen auch nicht in Laborexperimenten erzeugen und nachweisen. Nur kompakte kosmische Objekte mit großen Beschleunigun-

gen und großen Quadrupolmomenten erzeugen Gravitationswellen mit messbaren Amplituden.

Das Problem der theoretischen Astrophysik auf diesem Gebiet ist die Berechnung von Häufigkeit, Stärke, Wellenform und Frequenz der durch kosmische Ereignisse verursachten Gravitationswellen. Die mathematische Behandlung ist so kompliziert, dass man auch im Zeitalter der Supercomputer nur grob vereinfachte Modelle durchrechnen kann. Es ist aber gelungen, für eine große Zahl von Quellen realistische Voraussagen zu machen [2, 3].

Das Spektrum der Gravitationswellen umfasst demnach einen weiten Frequenzbereich, wobei für denjenigen von 10^{-4} bis 10^4 Hz ein Nachweis mit heutigen Möglichkeiten aussichtsreich erscheint. Die Beobachtung von Gravitationswellen liefert uns Informationen über die energiereichsten und heftigsten Vorgänge im Universum sowie über seine frühesten Anfänge. Die Nachweisgrenze für solche Ereignisse oder Objekte reicht, je nach Frequenz und Bandbreite der Signale, bis hinunter zu relativen Längenänderungen h von 10^{-24} , während von nahen starken Quellen Amplituden h bis zu 10^{-18} denkbar sind. Wellen ausreichender Stärke erwartet man nicht nur aus unserer Milchstraße. Da die Amplitude nur gemäß $1/D$ mit dem Abstand abnimmt, hofft man noch Quellen im Umkreis von 100 Millionen Lichtjahren beobachten zu können, so dass auch wesentlich häufiger spektakuläre Ereignisse zu erwarten sind. Zum Vergleich: Die Andromeda-Galaxie ist 2,3 Millionen Lichtjahre entfernt, der große Virgo-Galaxienhaufen 70 Millionen Lichtjahre.

Die Details der vorhergesagten Eigenschaften der Gravitationswellen hängen von der zugrunde gelegten Theorie ab. Alternative Theorien der Gravitation, die mit den sonstigen Beobachtungen übereinstimmen, sagen anders als die Einsteinsche beispielsweise Longitudinalwellen, eine andere Geschwindigkeit (das heißt massebehaftete Gravitonen) oder andere Polarisierungen voraus. Der erfolgreiche Nachweis von Gravitationswellen wird über das Schicksal dieser unterschiedlichen Ansätze entscheiden.

Gravitationswellendetektoren

Der Nachweis von Gravitationswellen besteht lediglich in einer einfachen Längenmessung. Wie die Beispiele gezeigt haben, besteht

das Problem aber darin, dass die relativen Längenänderungen h typischerweise nur 10^{-21} betragen. Auf den Abstand Erde-Sonne bezogen, entspricht dies dem Durchmesser eines Wasserstoffatoms!

Zur Messung derart kleiner Signale werden im wesentlichen zwei Wege verfolgt. Die ersten Versuche unternahm Ende der 60er Jahre Joseph Weber [4]. Er verwendete Resonanzantennen, große Aluminiumzylinder mit Massen von circa 1,5 t. Regt eine Gravitationswelle diesen Körper an, so schwingt er im longitudinalen Grundmodus bei der Eigenfrequenz des Zylinders. Diese Längenänderung sollte durch aufgeklebte Piezokristalle oder die Verstimmung eines aufgesetzten Mikrowellenresonators gemessen werden.

Frühzeitig erkannte man, dass auch ein Interferometer vom Michelson-Typ ideal geeignet ist, die von Gravitationswellen erzeugten Längenänderungen nachzuweisen. Es misst die Phasendifferenz zwischen zwei Lichtwellen, die die unter einem rechten Winkel stehenden Interferometerarme durchlaufen haben. Dies entspricht dem Längenunterschied beider Arme.

Bis Ende der 90er Jahre war es nicht möglich, die benötigte Detektorempfindlichkeit zu erreichen. Erst die heutige Technik bietet für beide Methoden Aussicht auf einen erfolgreichen Nachweis von Gravitationswellen. Bei den Resonanzantennen hat die Abkühlung auf Temperaturen des flüssigen Heliums und darunter sowie die Verwendung hochempfindlicher supraleitender Verstärker (SQUIDS) eine wesentliche Verbesserung gebracht. Durch die Verwendung kugelförmiger Massen ließe sich auch die durch die Zylinderform bedingte Richtungsabhängigkeit dieser Detektoren beseitigen [5].

Gravitationswellenastronomie

Einen ersten indirekten Hinweis auf die Existenz von Gravitationswellen gibt es bereits. Die beiden amerikanischen Astrophysiker Russell Hulse und Joseph Taylor entdeckten 1974 ein Sternsystem, in dem sich zwei Neutronensterne umkreisen. Sie studierten dieses Binärsystem mit der Bezeichnung PSR 1913+16 über viele Jahre hinweg und stellten fest, dass sich die beiden Körper langsam einander annähern, wobei sich die Umlaufzeit fortwährend verringert [6]. Dies lässt sich als durch die Abstrahlung von Gravitationswellen bedingter Energieverlust deuten. Die über

25 Jahre durchgeführten, sehr genauen Beobachtungen stimmen mit den Voraussagen der Einsteinschen Theorie exakt überein. Dies gilt allgemein als indirekter Nachweis von Gravitationswellen und brachte Hulse und Taylor 1993 den Nobelpreis für Physik ein.

Seitdem richten sich die Bemühungen der theoretischen Astrophysiker verstärkt auf die Berechnung der Gravitationsstrahlung von Quellen, die von den geplanten Detektoren direkt beobachtet werden können. Die Bilder und Daten, die inzwischen von den großen Weltraumteleskopen geliefert werden, führen zu immer gewagteren Szenarios wie der Vereinigung von superschweren Schwarzen Löchern bei der Durchdringung zweier Galaxien. Aber auch die Strahlung von weniger spektakulären Quellen lässt sich immer besser berechnen. Dies gibt den Experimentalphysikern eine Vorstellung, auf welche Signale sie sich einstellen müssen. Mit Sicherheit wird man aber auch Quellen und Signale entdecken, an die keiner gedacht hat.

Elektromagnetische Strahlung wird leicht gestreut und absorbiert. Weite Teile des Universums werden von Dunkelwolken verdeckt und bleiben so der Beobachtung durch klassische astronomische Techniken verborgen. Gravitationswellen dagegen durchdringen solche Wolken ungehindert und werden uns daher völlig neue Einblicke in bisher verschlossene Bereiche des Weltalls liefern. Insbesondere ist mit einer besseren Statistik der Verteilung von Neutronensternen und Schwarzen Löchern zu rechnen. Man wird dann auch einen genaueren Wert für die mittlere Materiedichte im Universum erhalten. Aus dieser Größe ergibt sich, ob das Universum ewig weiter expandieren oder eines Tages wieder in sich zusammenfallen wird.

Folgende Quellen lassen sich voraussichtlich mit den geplanten Detektoren beobachten.

Supernovae (vom Typ II) werden durch den Gravitationskollaps eines ausgebrannten Sterns verursacht. Das Gleichgewicht im Innern eines Sterns wird dadurch aufrecht erhalten, dass der Strahlungsdruck der Gravitation entgegenwirkt. Nach dem Erlöschen der Fusionsvorgänge stürzt der innere Materiekern im freien Fall in sich zusammen. Wegen der dabei erzeugten hohen Verdichtung kommt es zu einem Rückstoß, der die äußere Hülle sprengt und als Materiewolke in die Umgebung verteilt. Der Kern stürzt dann, je nach seiner Masse, zu einem Neutronenstern

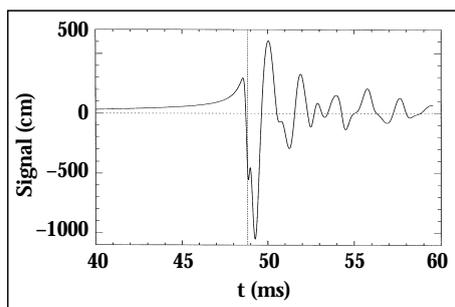


Abb. 2. Berechnetes Gravitationswellensignal eines durch Rotation abgeflachten kollabierenden Sterns. Der Kollaps geschieht in polarer und äquatorialer Richtung unterschiedlich schnell (das zeigt die Struktur des starken Ausschlags nach unten). Anschließend erfolgt eine gedämpfte Oszillation mit zwei verschiedenen Frequenzen [9].

oder einem Schwarzen Loch zusammen. Hierbei wird mindestens die Bindungsenergie des Neutronensterns frei, typischerweise 15 % der Sonnenmasse oder 10^{45} J. Der größte Teil dieser Energie wird in Form von Neutrinos abgestrahlt, bis zu 1 % als Gravitationswellen, der Rest als elektromagnetische Strahlung.

Die Gravitationswellen werden ungehindert emittiert und liefern Informationen über Prozesse, die während des Zusammensturzes stattfinden, also Details des Ablaufs der Supernova (Abbildung 2). Man kann mit einem Gravitationswellendetektor der Bildung von Neutronensternen und Schwarzen Löchern direkt beiwohnen. Die Dauer des Gravitationswellenpulses beträgt etwa einige hundertstel Sekunden; seine Frequenz liegt bei einigen 100 Hz bis 1 kHz und die Signalstärke bei bis zu 10^{-18} , wenn die Supernova in der Milchstraße stattfindet. Man erwartet dort etwa drei solcher Ereignisse pro Jahrhundert. Für die Gravitationswellendetektoren der ersten Generation wird eine Nachweisempfindlichkeit von 10^{-21} angestrebt, so dass man auch Supernovae im benachbarten Virgo-Galaxienhaufen beobachten kann. Wenn nur 1 % aller Sternzusammenbrüche Signale ausreichender Stärke erzeugt, dann sollte man mehrere Ereignisse pro Jahr sehen.

Außerdem rotiert ein Neutronenstern bei seiner Entstehung zunächst mit etwa 200 Umdrehungen pro Sekunde und bildet irreguläre Massenverteilungen aus, die resonante Schwingungsmoden anregen. Die Energie in einer solchen Mode kann der beim Kollaps freigesetzten vergleichbar sein, so dass sie sich dem Signal aufprägt. Ist der Stern etwa infolge der Rotation abgeplattet, so wird man die schnelleren polaren Schwingungen von den

langsameren äquatorialen unterscheiden können (Abbildung 2). Solche Resonanzmoden werden in einigen zehntel Sekunden abklingen. Die Frequenz wird hauptsächlich durch die Modenfrequenz bestimmt, nicht durch die Rotation.

Verschmelzende Doppelsysteme aus Neutronensternen oder Schwarzen Löchern gehören zu den wichtigsten Quellen für erdgebundene Interferometer. Ein solches System gibt, wie in dem Fall des Binärpulsars PSR 1913+16, Energie in Form von Gravitationswellen ab, die Partner rücken sich dadurch immer näher, wobei sie sich immer schneller umkreisen, bis sie schließlich ineinander stürzen (Abbildung 3). Die von ihnen bis kurz vor der Verschmelzung abgestrahlte Wellenform ist theoretisch sehr gut bekannt. Das macht es möglich, selbst schwache Signale aus dem sie überdeckenden Rauschen herauszufiltern. Typische Frequenzen liegen im Bereich von 10 bis 100 Hz; typische Amplituden sind 10^{-21} bis 10^{-22} . Signalstärken von 10^{-23} und kleiner sollten noch nachweisbar sein. Zwei Neutronensterne ließen sich daher bis zu einer Entfernung von 10^9 Lichtjahren beobachten. Die Ereignisrate für die spektakulären Sternverschmelzungen ist noch etwas unsicher; bei reinen Neutronensternsystemen rechnet man mit nur einer beobachtbaren Verschmelzung pro Jahr. Für die weiterentwickelten Detektoren der zweiten Generation könnten es aber sogar einige hundert Beobachtungen pro Jahr sein.

Der Frequenzverlauf des Gravitationswellensignals kann so detailliert modelliert werden, dass sich die beteiligten Massen und Bahnparameter bestimmen lassen, insbesondere auch der gegenseitige Abstand. Aus der tatsächlich gemessenen Amplitude h kann man dann die Entfernung bis zur Quelle ermitteln. Dies in Verbindung mit Messungen der optischen Rotverschiebung bietet die genaueste Möglichkeit, die Hubble-Konstante und damit das Alter des Universums zu bestimmen [7].

Schnell rotierende *Neutronensterne*, die in zwei entgegengesetzte Richtungen Strahlung abgeben, nennt man Pulsare. Sie können Gravitationswellen abstrahlen, wenn ihre Gestalt von der Axialsymmetrie abweicht. Das kann durch „Beulen“ verursacht werden, die beim Kollaps zum Neutronenstern „eingefroren“ sind, oder durch dynamische Vorgänge wie der Anregung von Eigenschwingungen. Der Energieverlust hängt dabei von der Elliptizität $e = 1 - b/a$ des Sterns ab (a ist die große

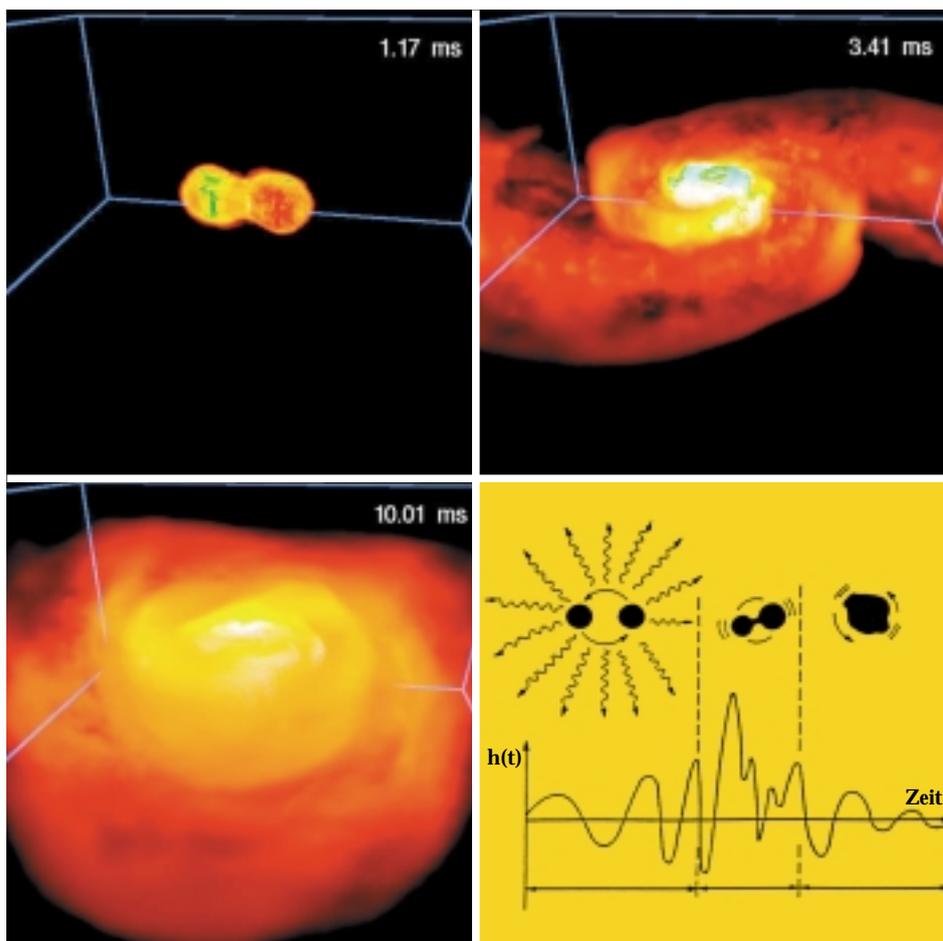


Abb. 3. Computersimulation zweier verschmelzender Neutronensterne. In Bruchteilen einer Sekunde gehen die beiden Neutronensterne in einem 10^8 Grad heißen Feuerball auf. Man achte auf die Zeitskala! Rechts unten: Schematische Darstellung der Verschmelzung zweier einander umkreisender kompakter Objekte und der daraus resultierenden Gravitationswelle. (Ruffert, Janka, MPI für Astrophysik, Garching).

und b die kleine Halbachse der Ellipse). Bereits eine Elliptizität um 10^{-8} reicht aus, um beobachtbare Strahlungsamplituden zu erzeugen. Typische Rotationsfrequenzen sind 10 bis 1000 Hz. Man erwartet ein nahezu periodisches Signal mit der doppelten Rotationsfrequenz, die nur durch die Präzession des Sterns und die allmähliche Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit modifiziert wird.

Ein Neutronenstern kann durch seine Gravitation von einem nahe gelegenen normalen Stern Materie abziehen, die in Form einer Akkretionsscheibe auf ihn übergeht und seine Rotation beschleunigt (Abbildung 4). Solche akkretierenden Neutronensterne bilden das Zentralobjekt in den meisten binären Röntgenquellen in der Galaxis. Sie können auch intensive kontinuierliche Gravitationswellen aussenden, wenn in einem hinreichend schnell rotierenden Neutronenstern instabile Eigenmoden angeregt werden oder wenn Rotationsachse des Sterns und Akkretionsachse nicht übereinstimmen und beide umeinander präzedieren. Die Gravitationswellenfrequenz

entspricht dann praktisch der Präzessionsfrequenz.

Der *Urknall* sollte nach allen gängigen kosmologischen Modellen einen Hintergrund von Gravitationsstrahlung erzeugt haben. Um ihn nachzuweisen, muss man die Messdaten zweier unabhängiger Detektoren miteinander vergleichen. Wenn beide nicht zu weit voneinander entfernt sind, besteht eine enge Korrelation ihrer Messdaten, so dass sich der Hintergrund ermitteln lässt. Aus der spektralen Energiedichte dieses Rauschens ließe sich ebenfalls eine Aussage über die Materiedichte des Universums gewinnen.

Da die gravitative Hintergrundstrahlung Informationen enthält, die aus einer Zeit von 10^{-35} Sekunden nach der Entstehung des Universums stammen, bietet sie die Möglichkeit, die Aussagen der verschiedenen kosmologischen Modelle über die Kosmogese zu überprüfen. Der zur Zeit aussichtsreichste Kandidat für eine vereinheitlichte Theorie aller Wechselwirkungen ist die Superstring-



Abb. 4. Darstellung eines Doppelsystems, bei dem Materie von einem normalen Stern zum Neutronenstern hinüberfließt und sich dort in einer Scheibe anordnet.

Theorie. Nach ihr gelten topologische Defekte (Strings), die bei Phasenübergängen im frühen Universum entstanden sein könnten, als Hauptquelle der Hintergrundstrahlung. Die Theorie sagt ein bestimmtes Spektrum des Gravitationswellenhintergrundes voraus. Während sich die Aussagen der String-Theorie mit Hilfe von Superbeschleunigern (aus finanziellen Gründen) nur in begrenztem Maße testen lassen, werden die geplanten Gravitationswellendetektoren in der Lage sein, diese Vorhersage zu überprüfen.

Aus zahlreichen astronomischen Beobachtungen muss man schließen, dass sich im Zentrum fast jeder Galaxie ein *superschweres Schwarzes Loch* befindet, das eine Masse entsprechend 10^6 bis 10^9 Sonnen enthält. Solche Objekte strahlen während ihrer Entstehung oder beim Verschlucken von kompakten Sternen und kleineren Schwarzen Löchern Gravitationswellen im niederfrequenten Bereich (10^{-4} bis 1 Hz) aus. Das spektakulärste Ereignis in der Gravitationswellenastronomie überhaupt wäre die Verschmelzung zweier superschwerer Schwarzer Löcher beim Zusammenstoß zweier Galaxien. Wegen der großen Signalamplitude (man erwartet, dass das Signal um bis zu einem Faktor 10^4 über dem Rauschen liegt) lässt sich die Position der beiden Galaxien sehr genau bestimmen, so dass man unter Zuhilfenahme optischer Daten die Hubble-Konstante und den Abbremsparameter des Weltalls auf 1 % genau auswerten kann. Auch daraus ließe sich auf die Massendichte des Universums schließen.

Laserinterferometer

Zur Erschließung dieses völlig unerforschten weiten Feldes der Gravitationswellenastronomie sollen Laserinterferometer in Michelson-Anordnung eingesetzt werden. Ein solches Instrument vergleicht die durch eine Gravitationswelle hervorgerufene Raumdehnung und -stauchung in zwei senkrecht auf-

einander stehenden Richtungen. Das Prinzip ist in Abbildung 5 dargestellt: Strahlteiler und Spiegel dienen als Testmassen, ein Laser als Lichtquelle; gemessen wird die Phasendifferenz zwischen den beiden Teilstrahlen. Die Messung erfolgt mit einer Nullmethode: Das Interferometer wird so voreingestellt, dass am Ausgang Dunkelheit herrscht (Interferenzminimum). Die durch die Armlängenänderungen verursachten Helligkeitsschwankungen werden mit einer Photodiode registriert.

Da die zu messende Größe δl proportional zu $h \cdot l$ ist, sollte man den Lichtweg l offenbar möglichst groß machen. Das Optimum ist aber erreicht, wenn er gleich der halben Wellenlänge der Gravitationswelle ist, denn in der nächsten Halbwelle kehrt sich der Effekt um. Für eine Gravitationswellenfrequenz von 1 kHz ergibt sich diese Länge zu 150 km. Der Bau eines Interferometers mit einer derartigen Armlänge ist offensichtlich nicht realisierbar. Glücklicherweise kann man den Lichtweg durch ein Paar von Spiegeln falten, so dass man Detektoren mit Armlängen von „nur“ einigen hundert oder tausend Metern bauen muss.

Anfang der 70er Jahre wurden erste Versuche durchgeführt, ein Laserinterferometer für den Gravitationswellennachweis einzusetzen. Zunächst wurde an kleineren Prototypen mit Armlängen von 3 bis 40 m vor allem studiert, welche physikalischen Prozesse die Empfindlichkeit bei den verschiedenen Frequenzen begrenzen. Dies führte zu einer Analyse der möglichen Rauschquellen und zu den Anforderungen, die an die Konstruktion gestellt werden müssen, um die gewünschte Empfindlichkeit zu erreichen.

Störsignale und Rauschquellen

Beim Einsatz von Laserinterferometern für den Gravitationswellennachweis treten viele Störungen auf, die zu Schwankungen in der Lichtwegdifferenz zwischen den beiden Armen führen und dadurch Gravitationswellensignale vortäuschen. Um den erfolgreichen Betrieb von Gravitationswellendetektoren überhaupt erst zu ermöglichen, musste eine Reihe technischer Verbesserungen und Neuentwicklungen durchgeführt werden, da die Anforderungen den vorhandenen Standard auf fast allen Gebieten überstiegen. Im folgenden sei die Lösung einiger Probleme am Beispiel unseres deutsch-britischen Projekts GEO 600 geschildert.

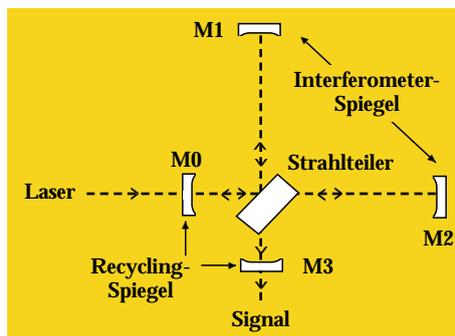


Abb. 5. Michelson-Interferometer mit doppeltem Recycling. Der Laserstrahl fällt von links ein und trifft auf einen Strahlteiler. M1 und M2 sind die beiden Endspiegel in den Interferometerarmen, M0 dient zur Leistungsrückführung, M3 zur Signalverstärkung.

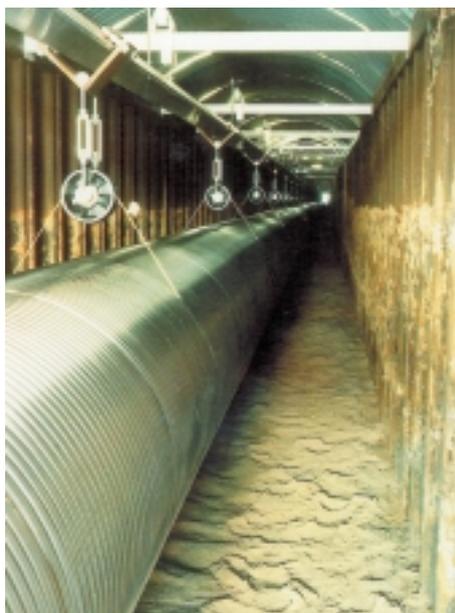


Abb. 6. Aufhängung des Vakuumschirms bei GEO 600.

Eine wesentliche Quelle von Störungen stellen thermische und mechanische Fluktuationen der Luftdichte dar. Alle optischen Aufbauten (Laser, Strahlteiler, Spiegel, Nachweisoptik) werden daher in großen Vakuumschirmen untergebracht; die Messstrecke selbst verläuft in evakuierten Rohren mit einem Durchmesser von 60 cm (Abbildung 6). Das Vakuum muss besser als 10^{-11} bar sein, so dass man sich schon im Bereich des Ultrahochvakuums befindet. Das macht spezielle Reinigungstechniken und das Ausheizen des Rohrs und der Komponenten der Anlage erforderlich.

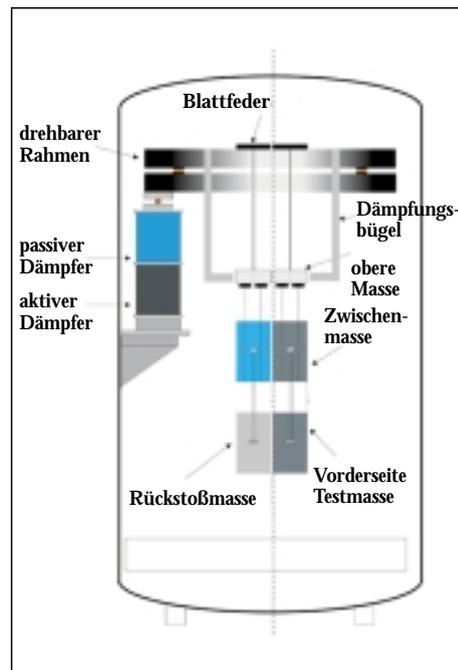


Abb. 7. Die Hauptspiegel von GEO 600 werden durch aktive und passive Schwingungsdämpfer von seismischen Störungen isoliert. Drei um 120° versetzte Dämpfer (im Längsschnitt ist nur einer links zu sehen) tragen einen Rahmen, an dem über zwei Blattfedern eine größere Zwischenmasse hängt. An dieser ist wiederum über vier Blattfedern ein Doppelpendel aufgehängt. Es besteht aus einer weiteren Zwischenmasse und dem eigentlichen Spiegel, der die Testmasse darstellt.

Naheliegende Störquellen für einen Gravitationswellendetektor sind Bodenerschütterungen aller Art. Sie können beispielsweise durch die Vibrationen der Vakuumpumpen hervorgerufen werden, durch die Meeresdünung oder durch Fahrzeuge, die sich an der Anlage vorbei bewegen. Die Hauptquelle stellt die seismische Bodenunruhe dar, die mit $1/f^2$ abfällt. Sie sorgt für Amplituden, die um viele Zehnerpotenzen über den zu messenden liegen. Eine wesentliche Aufgabe stellte daher die Entwicklung einer wirkungsvollen Vibrationsisolation dar, die verhindert, dass sich die Schwingungen aus der Umgebung auf die im Tank aufgehängten optischen Komponenten übertragen.

Die Schwingungsdämpfung für die Hauptspiegel von GEO 600 erfolgt in mehreren Stufen (Abbildung 7); sie enthält aktive und passive Elemente. Im aktiven Teil werden die Schwingungsamplituden mit Geophonen ge-

messen und durch Piezoaktuatoren weitgehend kompensiert. Der passive Teil besteht aus zweilagigen Dämpfern aus Metall und Gummi, wodurch mittlere und hohe Frequenzen abgeblockt werden. Die Aufhängung der optischen Komponenten erfolgt in Form eines Mehrfachpendels. Hierdurch wird eine sehr wirkungsvolle Filterung von Frequenzen erreicht, die oberhalb der Eigenfrequenz des Pendels liegen. Diese lässt sich durch die Wahl der Pendellänge beeinflussen. Ein Pendel mit einer Länge von 1 m hat die Eigenfrequenz $f_0 = 0,5$ Hz. Bei einer Beobachtungsfrequenz $f = 500$ Hz erfolgt dann schon bei einem Einfachpendel eine Herabsetzung der Störampplituden um den Faktor $(f_0/f)^2 = 10^6$. Die erwünschte Güte Q (das Inverse des Dämpfungsfaktors) von etwa 10^8 erreicht man durch eine monolithische Aufhängung, indem man die Quarzspiegel an angeschmolzenen Quarzfasern aufhängt.

Zu kleinen Frequenzen hin wird die Schwingungsisolierung immer aufwendiger. Es wird daher allgemein nicht möglich sein, mit erdgebundenen Detektoren Frequenzen zu beobachten, die unterhalb von einigen Hz liegen, bei GEO 600 unterhalb von einigen zehn Hz.

Die Wärmebewegung der Atome führt zur Anregung von Eigenmoden in den optischen Komponenten, beispielsweise zu Dicken- oder Biegeschwingungen. Die Spiegeloberfläche bewegt sich dabei vor und zurück, so dass ein Gravitationswellensignal vorgetäuscht wird. Solche internen Störungen lassen sich nicht abschirmen. Hiergegen hilft nur, alle Spiegelresonanzen weit außerhalb des gewünschten Frequenzbereichs zu verlegen, etwa oberhalb von 5 kHz. Die niederfre-

quenten Ausläufer der Störungen nehmen mit der Spiegelmasse und ihrer mechanischen Güte Q ab. Durch Wahl eines geeigneten Materials (Quarzglas, $Q \sim 10^7$) und einer speziellen zylindrischen Form mit einem Verhältnis von Durchmesser zu Dicke von 2:1 lässt sich die Amplitude der thermischen Bewegung hinreichend unterdrücken. Die naheliegende Lösung einer Abkühlung der optischen Komponenten ist für die derzeitigen Detektoren nicht vorgesehen. Da die thermische Amplitude proportional zur Wurzel aus der Temperatur T ist, wird das erst unterhalb von 4 K interessant, erfordert also Kühlung mit flüssigem Helium. Das ist mit einem vertretbaren Aufwand derzeit nicht zu machen und wegen der hohen Lichtleistung auch nicht zu halten.

An das Material der Spiegel und des Strahlteilers sowie an die Qualität der darauf aufgebracht hochreflektierenden Schichten werden ebenfalls höchste Anforderungen gestellt. Jede Wellenfrontverzerrung durch unvollkommene optische Elemente stört die Interferenz. Gestreutes Licht kann an den nicht schwingungsgedämpften Wänden reflektiert werden und erzeugt bei der Überlagerung mit dem Hauptstrahl ein Störsignal. Die Mikrorauigkeit der Substrate darf daher nur in der Größenordnung von 1 Å liegen, und das über eine Spiegelabmessung von etwa 20 cm. Die Technik der Leistungsüberhöhung (siehe unten) setzt Komponenten mit extrem kleinen Verlusten voraus. Für den Strahlteiler wurde in Zusammenarbeit von GEO 600 und dem französisch-italienischen Projekt VIRGO durch die Firma Heraeus ein besonders homogenes Quarzglassubstrat entwickelt, das Absorptionsverluste von lediglich einigen 10^{-6} pro Zentimeter aufweist. Dadurch wird

eine lokale Erwärmung der Spiegel und damit die Ausbildung thermischer Linsen im Strahlengang des Lichtes vermieden.

Photonen-Recycling

Als Lichtquelle des Interferometers benötigt man einen Dauerstrichlaser mit hoher Ausgangsleistung in einer stabilen transversalen und longitudinalen Mode, der monatelang stabil arbeitet. Das Laser Zentrum Hannover hat speziell für das GEO-Projekt einen solchen Laser entwickelt. Es handelt sich dabei um einen mit Laserdioden gepumpten monolithischen Miniatur-Nd:YAG-Ringlaser als Strahlungsquelle mit 2 W Ausgangsleistung im Einmodenbetrieb. Diese Strahlung wird in einen laserdiodegepumpten YAG-Stab eingekoppelt (Injection Locking) und auf 10 W verstärkt. Das Laserlicht wird dann phasenmoduliert, um Regelsignale für die verschiedenen Freiheitsgrade des Interferometers ableiten zu können.

Eine fundamentale Empfindlichkeitsgrenze für Messungen mit Licht bildet das Schrotrauschen. Photodioden wandeln die Lichtleistung am Ausgang des Interferometers in Strom um. Die statistischen Schwankungen des Photonenflusses n rufen ein weißes Rauschen im Photostrom hervor, das entsprechende Schwankungen der optischen Wegdifferenz vortäuscht: $\delta l \sim 1/\sqrt{n} \sim 1/\sqrt{P}$. Hiernach ließe sich die Genauigkeit der Registrierung beliebig verbessern, je größer die zur Verfügung stehende Lichtleistung P ist.

Dem steht jedoch ein anderer Effekt entgegen: der Strahlungsdruck, den das Laserlicht auf die Endspiegel ausübt. Die statistische Schwankung der Photonenzahl erzeugt ein entsprechendes Schwanken in der Position der Spiegel und täuscht damit ein Signal vor. Dieser Einfluß wächst mit zunehmender Lichtleistung an. Die optimale Leistung liegt dann vor, wenn die durch das Schrotrauschen und den Strahlungsdruck vorgetäuschten Signale gleich groß sind. Für GEO 600 betrüge sie etwa 1 MW. Das ist natürlich weit mehr Leistung als jeder verwendbare Laser liefert. Es gibt jedoch eine Methode, die im Interferometer befindliche Lichtleistung merklich zu vergrößern: das „Power Recycling“ (Leistungsrückführung). Sie ist in allen großen Detektoren vorgesehen.

Beim Power Recycling wird die im Interferometer umlaufende Lichtleistung erhöht, indem man sie mehrfach verwendet. Dabei

Tabelle 1: Die im Bau befindlichen Gravitationswellendetektoren.

Projekt				
Ort	Mitaka (Japan)	Hannover (Deutschland)	Hanford u. Livingston (USA)	Pisa (Italien)
Armlänge	300 m	600 m	je 4 km	3 km
Kosten	20 Mio. DM	10 Mio. DM	450 Mio. DM	150 Mio. DM
Messbeginn	2000	2001	2001/02	2002

macht man sich zunutze, dass der Ausgang des Interferometers durch einen Regelkreis dunkel gehalten wird. Bei einer solchen „destruktiven“ Interferenz wird jedoch kein Licht vernichtet, sondern nur umverteilt. In dieser Betriebsart verhält sich das Interferometer wie ein Spiegel: Alles Licht geht zurück zum Eingang. Durch einen zusätzlichen Spiegel kann dieses Licht erneut in das Interferometer eingespeist werden. Der Zusatzspiegel und das gesamte Interferometer müssen dabei einen optischen Resonator bilden. In Resonanz lässt sich die Lichtleistung um einen Faktor erhöhen, der gleich dem Inversen der Verluste ist. Beim Garching GEO-Prototyp konnte so eine Vergrößerung der umlaufenden Lichtleistung um einen Faktor 300 erreicht werden.

Das Signal-Recycling sorgt mit einer ähnlichen Methode für eine Überhöhung des Signals. Eine Gravitationswelle prägt ihre Frequenz der des umlaufenden Laserstrahls auf. Dies führt zu einer Phasenmodulation des Laserlichts, d. h. zu Seitenbändern im Abstand der Gravitationswellenfrequenz links und rechts von der Lichtfrequenz des Lasers. Diese Seitenbänder enthalten die eigentliche Information. Die Phasendifferenz der Träger in den beiden Armen wird auf 180° gehalten, so dass dieses Licht zum Eingang zurückläuft: Darauf basiert die Leistungsüberhöhung. Die Seitenbänder werden dagegen in den beiden Armen in Antiphase erzeugt; sie verlassen das Interferometer am Ausgang. Ein weiterer Spiegel an dieser Stelle bildet mit dem Interferometer einen optischen Resonator, in dem die Seitenbänder resonant überhöht werden. Abhängig von der Reflektivität dieses Spiegels lässt sich die Bandbreite des Detektors einstellen: entweder breitbandig, um Gravitationswellen in einem Bereich bis zu einigen kHz zu untersuchen, oder aber sehr schmalbandig (einige Hz), wenn die Frequenz der Quelle bekannt ist.

Je schmalbandiger der Detektor, um so größer wird seine Empfindlichkeit. Durch eine kleine Änderung der Spiegelposition lässt sich der Detektor außerdem auf bestimmte Gravitationswellenfrequenzen abstimmen. Darüber hinaus führt dieses Verfahren zu einer erheblichen Verbesserung des optischen Kontrastes: Gestreutes Licht befindet sich nicht in Resonanz mit dieser Anordnung und wird daher nicht wie das Signal überhöht. Am Garching GEO-Prototypen wurde bereits eine zehnfache Signalüberhöhung erzielt [8].



Abb. 8. Das südlich von Hannover gelegene GEO 600. Man sieht die beiden 600 m langen Gräben, in denen das Vakuumrohr aufgehängt ist. Im Zentralhaus (vorn) befinden sich Laser, Strahlteiler und Signalaufnahme, in den beiden kleineren Gebäuden (links und rechts) die Endspiegel des Interferometers.

Ein weltweites Netz von Detektoren

In den letzten Jahren hat man weltweit mit dem Bau großer Laserinterferometer für den Nachweis von Gravitationswellen begonnen (Tabelle 1). Im Rahmen des US-amerikanischen Projekts LIGO werden Detektoren mit 4 km langen Armen gleich an zwei Standorten errichtet: einen im Nordwesten der USA (Washington) und einen im Südosten (Louisiana). Dadurch sind die Wissenschaftler der USA autark: Sie können sich in Koinzidenzmessungen gegenseitig verifizieren.

Von ähnlicher Größe ist das bei Pisa entstehende französisch-italienische Projekt VIRGO. Ebenso wie LIGO arbeitet VIRGO mit Fabry-Pérot-Resonatoren in den Armen und verwendet die Technik der Leistungsrückführung. Als Spezialität bietet VIRGO eine besonders aufwendige seismische Isolierung: eine Kette von fünf hintereinander geschalteten Pendeln mit zusätzlicher Verwendung von magnetischen Antifedern soll Messungen bis in den wissenschaftlich sehr interessanten Frequenzbereich von 10 Hz ermöglichen.

Gemeinsam von Großbritannien und Deutschland gebaut wird GEO 600 mit 600 m Armlänge (Abbildung 8). Federführend sind Wissenschaftler aus Garching, Hannover, Glasgow, Cardiff und Potsdam. Die durch die kürzere Armlänge verminderte Empfindlichkeit lässt sich durch gleichzeitiges Power- und Signal-Recycling weitgehend

kompensieren. Bei der Leistungsrückführung wird ein Überhöhungsfaktor von 1000 angestrebt. Die bisher nur bei GEO 600 verwendete Technik der Signalüberhöhung gleicht besonders bei höheren Frequenzen die kürzere Armlänge aus.

Am weitesten fortgeschritten ist das kleinste der Interferometer, TAMA 300, das mit 300 m Armlänge in Japan gebaut wird. Die optische Konzeption lehnt sich eher an die LIGO- und VIRGO-Detektoren an, allerdings nicht mit dem Anspruch, in der Empfindlichkeit mit diesen mithalten zu können. TAMA 300 zielt in erster Linie auf die Entwicklung und Erprobung neuer Konzepte ab, die für den Ausbau der künftigen großen Detektoren benötigt werden.

Die verschiedenen Projekte stehen nicht etwa im Wettbewerb miteinander, im Gegenteil: Sie sind auf einander angewiesen. Die Daten eines einzelnen Detektors haben für pulsartige Signale, beispielsweise von Supernovae, keine besondere Aussagekraft. Erst in Koinzidenz mit einem weit entfernten Detektor kann man sicher sein, nicht lokalen Störungen aufgesessen zu sein. Daher bilden zwei Detektoren das absolute Minimum, um die bloße Existenz von Gravitationswellen zu beweisen. Um aber auch Informationen über die Richtung der Quelle sowie über Zeitstruktur und Polarisation der Signale zu erhalten, benötigt man ein weltweites Netz von wenigstens vier Detektoren. Wenn alles gut geht, existiert dieses Netz zu Beginn des nächsten Jahrzehnts. Die Jahrtausendwende markiert dann auch den Beginn des Zeitalters der Gravitationswellenastronomie. Den Arbeitsbereich dieser neuartigen Teleskope zeigt Abbildung 9.

LISA – ein Detektor im Weltall

Leider wird der Frequenzbereich unterhalb von 10 Hz für Detektoren auf der Erde wegen des störenden Einflusses der Seismik und von Gravitationsfeldern bewegter Objekte wohl für immer verschlossen bleiben. Dabei senden einige der spektakulärsten Quellen von Gravitationswellen, wie superschwere Schwarze Löcher mit Millionen Sonnenmassen, Signale im Millihertzbereich aus. Diesen Frequenzen entsprechen Wellenlängen von einigen Millionen Kilometern. Detektoren mit geeigneten Armlängen lassen sich auf der Erde nicht realisieren – wohl aber im Weltall. Das ist das Ziel der LISA-Mission, die von der Europäischen Weltraumbehörde

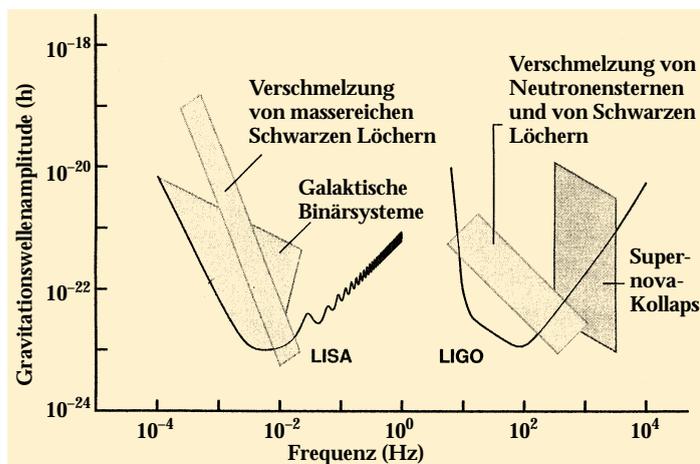


Abb. 9. Empfindlichkeitskurven des geplanten Weltraumdetektors LISA und eines der im Bau befindlichen erdgebundenen Detektoren (LIGO) sowie Signalstärken und Frequenzbereiche einiger typischer Quellen von Gravitationswellen.

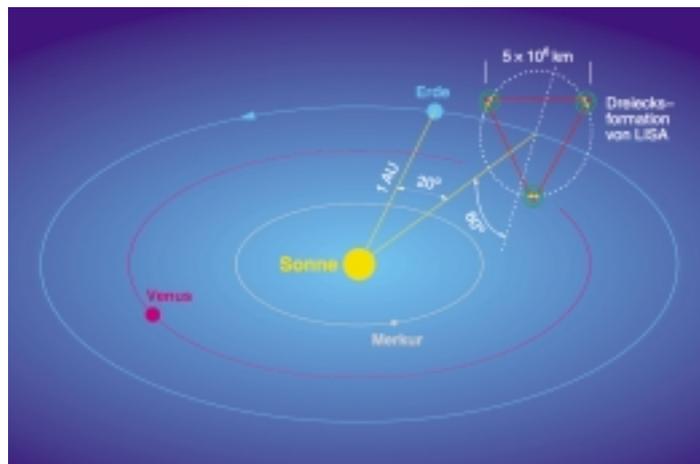


Abb. 10. Die Umlaufbahnen der drei LISA-Satelliten.

ESA im Rahmen ihres wissenschaftlichen Zukunftsprogramms für einen Start ab 2009 ausgewählt wurde, und die parallel dazu in den USA durch die NASA eingehend untersucht wird.

Bei LISA (Laser Interferometer Space Antenna) sind drei identische Satelliten in Form eines gleichseitigen Dreiecks angeordnet, das um 20° hinter der Erde versetzt entlang der Erdbahn um die Sonne kreist (Abbildung 10 und auf Seite 14). Die Satelliten bilden zusammen ein Laserinterferometer mit 5 Millionen km Armlänge und einem Winkel von 60° zwischen den Armen. Jeder Satellit enthält einen Infrarotlaser mit 1 W Ausgangsleistung. Wegen der langen Wege kommt nur ein geringer Bruchteil (10^{-10}) der ausgesandten Leistung an; daher reicht die Lichtintensität für einen rein interferometrischen Nachweis nicht aus. Statt dessen vergleicht man die Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Lasern, die aufeinander abgestimmt sind. Die Satellitengehäuse schirmen die Interferometerspiegel vor dem Strahlungsdruck der Sonne ab. Die Testmassen bewegen sich auf Geodäten im Raum-Zeit-Kontinuum und stellen somit ideale Inertialsysteme dar. Ein ausgeklügeltes Kontrollsystem zwingt die Satelliten, dieser Bewegung zu folgen. Das Projekt stellt eine faszinierende Mischung aus optischer Technologie, Raumfahrt- und Regelungstechnik dar.

Mit der Kombination von mehreren Antennen auf der Erde und dem LISA-Projekt im Weltraum besteht also die günstigste Aussicht,

in den nächsten 15 Jahren das neue Fenster ins All in seiner vollen Breite zu öffnen und Informationen über das Universum zu erhalten, die uns bisher nicht zugänglich waren.

Literatur

Einen guten Überblick über den Stand der Gravitationswellenforschung zu Anfang der 80er Jahre geben die Artikel:

W. Winkler, *Physik in unserer Zeit* **16**, 138 (5/1985).

D. G. Blair, *Physik in unserer Zeit* **17**, 142 (5/1986).

Über den aktuellen Stand berichten:

K. Danzmann, H. Ruder, *Phys. Bl.* **49**, 103 (1993).

F. Ricci u. A. Brilliet, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **47**, 111 (1997).

Weitere Literatur

[1] J. A. Wheeler, *Einsteins Vision*. Springer-Verlag, Berlin (1968).

[2] P. Kafka, *Naturwissenschaften* **73**, 248 u. 305 (1986).

[3] B. F. Schutz, *Class. Quant. Grav.* **13**, A219 (1996).

[4] J. Weber, *Phys. Rev.* **117**, 307 (1960).

[5] L. Ju u. D. G. Blair, *Int. Journ. Mod. Phys. D* **5**, 101 (1996).

[6] M. H. Soffel u. H. Ruder, *Physik in unserer Zeit* **22**, 29 (1/1991) u. **24**, 253 (6/1993).

[7] B. F. Schutz, *Nature* **323**, 310 (1986).

[8] G. Heinzl et al. *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5493 (1998).

[9] T. Zwerger u. E. Müller, *Astron. Astrophys.* **320**, 209 (1997).

Alle Projekte sind auch im Internet beschrieben:

GEO 600: <http://www.geo600.uni-hannover.de>

LIGO: <http://www.ligo.caltech.edu>

LISA: <http://lisa.jpl.nasa.gov>

TAMA 300: <http://tamago.mtk.nao.ac.jp>

VIRGO: <http://www.virgo.infn.it>



Peter Aufmuth (rechts), geb. 1943, Studium der Physik an der Universität Hannover, Promotion 1977; wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Atom- und Molekülphysik der Universität Hannover; zunächst Experimente und Rechnungen zur Isotopieverschiebung und Hyperfeinstruktur freier Atome, seit 1991 Mitarbeit am GEO-Projekt.

Albrecht Rüdiger, geb. 1929, Studium der Physik an der Universität Frankfurt am Main; seit 1957 an den Max-Planck-Instituten für Physik, für Astrophysik, für Quantenoptik; Grundlagenforschungen über Computer-Elemente, über vollautomatische Auswertung von Blasenkammerbildern, seit 1977 über Gravitationswellendetektoren.

Anschriften:

Dr. Peter Aufmuth, Institut für Atom- und Molekülphysik, Abt. Spektroskopie, Callinstr. 38, D-30167 Hannover; pea@mpq.mpg.de.

Albrecht Rüdiger, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Straße 1, D-85748 Garching; atr@mpq.mpg.de.