

Unverkäufliche Leseprobe



Hartmut Grote
Gravitationswellen

Geschichte einer Jahrhundertentdeckung

2018. 127 S., mit 14 Abbildungen und 3 Tabellen
Broschiert.

ISBN 978-3-406-71941-7

Weitere Informationen finden Sie hier:
<https://www.chbeck.de/0510>

C.H.BECK  **WISSEN**

Der Physik-Nobelpreis 2017 für die Entdeckung der Gravitationswellen ist ein später Triumph für Albert Einstein – und der Erfolg von mehr als tausend Forschern, denen gemeinsam dieser Nachweis gelang. Der Physiker Hartmut Grote vom deutsch-britischen Gravitationswellendetektor GEO600 war an der Jahrhundertentdeckung beteiligt und erzählt ihre Geschichte aus erster Hand. Gravitationswellen werden von allen beschleunigten Körpern produziert, bei der Explosion von Sternen oder beim Verschmelzen zweier schwarzer Löcher genauso wie beim Start eines Autos. Unfassbar winzig, stauchen und strecken sie den Raum. Nun können wir sie nutzen, um unabhängig von Licht das Universum zu erforschen. Ein neues Zeitalter der Astronomie hat begonnen.

Dr. *Hartmut Grote* ist Professor für Physik in Cardiff, Großbritannien. Von 2009 bis 2017 war er wissenschaftlicher Leiter am GEO600, dem deutsch-britischen Gravitationswellendetektor in der Nähe von Hannover; er gehört zu den führenden Gravitationswellenforschern in Europa und weltweit.

Hartmut Grote

GRAVITATIONSWELLEN

Geschichte einer Jahrhundertentdeckung

Verlag C.H.Beck

Mit 14 Abbildungen und 3 Tabellen

Originalausgabe

© Verlag C.H.Beck oHG, München 2018

Satz: C.H.Beck.Media.Solutions, Nördlingen

Druck und Bindung: Druckerei C.H.Beck, Nördlingen

Umschlaggestaltung: Uwe Göbel, München

Umschlagabbildung: Simulation des Gravitationswellen-Ereignisses GW170104: Die Stärke der Gravitationswelle wird sowohl durch die Höhe als auch durch die Farbe angezeigt. Blau bedeutet schwach, gelb stark. © S. Ossokine, A. Buonanno, T. Dietrich (AEI), R. Haas (NCSA), Simulating eXtreme Spacetimes Projekt

ISBN 978 3 406 71941 7

Printed in Germany

www.chbeck.de

Inhalt

Vorwort	7
1. Es gibt sie, es gibt sie nicht, es gibt sie	10
Gravitation: Von Newton zu Einstein	10
Die Vorhersage der Gravitationswellen aus der Allgemeinen Relativitätstheorie	17
Astronomische Verursacher von Gravitationswellen	22
2. Es gibt sie, es gibt sie nicht	25
Joseph Weber	26
Wie unterscheidet man Signale von Rauschen?	30
Kontroverse und Konsens	33
Die Weiterentwicklung der Resonanzantennen	36
3. Michelsons Erbe: Interferometer	39
Wellen, Interferenz und Interferometer	39
Das Michelson-Interferometer als Gravitationswellendetektor	44
Die Prototypen-Interferometer	56
4. Interferometer rund um die Welt	61
LIGO	61
Virgo	68
GEO	72
TAMA und KAGRA	77
5. Datenanalyse und Großer Hund	79
Modellierte Suche: Optimalfilter	80
Datenanalyse im Netzwerk	84
Kandidat und Signifikanz	87

Blinde Analyse	89
Großer Hund	91
6. Es gibt sie!	94
Beobachtungen in den Datenläufen O ₁ und O ₂	104
Verschmelzende Neutronensterne!	107
7. Künftige Entwicklungen	112
Erdgebundene Interferometer	113
Suche bei anderen Frequenzen des Spektrums	117
 Dank	 122
 Verzeichnis verwendeter Literatur	 123
Bildnachweis	124
Personen- und Sachregister	125

Vorwort

Der Nachweis von Gravitationswellen am 14. September 2015 hat zum ersten Mal Ereignisse im Universum, das energiereiche Verschmelzen zweier schwarzer Löcher, «hörbar» gemacht und damit das wissenschaftliche Sensorium erheblich erweitert. Für ihren Beitrag zu dieser spektakulären Messung wurden 2017 Rainer Weiss, Kip Thorne und Barry Barish mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Die Vorgeschichte dieses für die Physik epochalen Ereignisses wird in diesem Buch in einer auch fachfremden Leserinnen und Lesern verständlichen Weise rekonstruiert.

Bei der Verfolgung dieser Geschichte zeigen sich zugleich einige Aspekte moderner naturwissenschaftlicher Forschung im Allgemeinen. Die Entdeckung der Gravitationswellen ist ein Beispiel dafür, wie Astronomie und Astrophysik heutzutage oft arbeiten, nämlich mit Hilfe großer Messapparaturen, aufwändiger Computersimulationen, ausgeklügelter statistischer Analysemethoden und nicht zuletzt in internationalen Forschungsverbänden (Kollaborationen). Die Forschung verläuft auch keineswegs kontinuierlich und geradlinig, sondern vielmehr in Schüben und oft auf Umwegen, wobei programmatische Weichenstellungen mitunter auf einzelne Entscheidungen technischer oder politischer Natur zurückgehen.

Kapitel 1 nimmt seinen Ausgang von der Gravitation nach Newton und beschreibt von dort den Weg zu Einstein und seiner Relativitätstheorie. Die Vorhersage von Wellen der Gravitation aus Einsteins Theorie war durchaus mühsam und es blieb für lange Zeit offen, ob diese Wellen jemals gemessen werden könnten. Das Kapitel schließt mit einer kurzen Übersicht über diejenigen astronomischen Objekte, die Gravitationswellen erzeugen können.

Kapitel 2 liefert einen historischen Abriss der ersten Versuche

einer Messung von Gravitationswellen durch Joseph Weber in den 1960er Jahren. Webers Behauptung, er habe tatsächlich Gravitationswellen gemessen, gab Forschern auf der ganzen Welt den Anstoß zur Überprüfung seiner Ergebnisse – jedoch ohne Erfolg. Obwohl sich die Ansicht durchgesetzt hat, dass Weber sich geirrt haben müsse, wurden die von ihm entwickelten Detektoren über Jahrzehnte hinweg immer weiter verfeinert.

Kapitel 3 zeigt, wie sich ab den 1970er Jahren die Technik der Interferometer als vielversprechenderer Weg zur Messung von Gravitationswellen abzeichnete. Durch technische Verbesserungen des von Albert Michelson entwickelten Interferometers erhöhte sich die Empfindlichkeit dieser Instrumente enorm. Die wichtigsten Prototypen dieser Geräte entstanden in Deutschland, Großbritannien und den USA.

Kapitel 4 gibt einen kompakten Überblick über die Geschichte, Funktionsweise und die Besonderheiten der großen Interferometer rund um den Globus. Anlagen mit drei oder vier Kilometer langen hochsensiblen Messröhren entstanden in den 90er Jahren in den USA und Italien; kleinere Anlagen wurde in Deutschland (600 Meter) und Japan (300 Meter) gebaut. In Japan befindet sich gegenwärtig (2017) ein Interferometer mit drei Kilometer langen Armen im Bau.

Kapitel 5 geht der Frage nach, wie überhaupt in den von den Detektoren gelieferten Daten nach Anzeichen für Gravitationswellen gesucht werden kann. Je nach astronomischer Quelle (Neutronensterne oder schwarze Löcher) sind jeweils spezifische Wellenformen zu erwarten, die mit aufwändigen Computersimulationen berechnet werden müssen. Den vielen verschiedenen Mustern oder Signaturen der jeweiligen Wellen wird durch ein ausgetüfteltes Analyseverfahren (blinde Analyse) begegnet, bei dem alle Parameter vor der eigentlichen Analyse festgelegt werden. Zusätzlich können sogenannte *blinde Injektionen* dafür sorgen, dass etwaige Messergebnisse nicht durch die Erwartungen oder Vorannahmen der beteiligten Wissenschaftler verfälscht werden.

Kapitel 6 beschreibt dann die historisch erste direkte Messung einer Gravitationswelle, die am 14. September 2015 auf

die Erde traf und von zwei Detektoren in den USA registriert wurde. Dieses Ereignis löste fieberhafte Aktivitäten innerhalb der wissenschaftlichen Kollaboration aus, die über fünf Monate anhielten, und von der Frage, ob es sich womöglich um einen Fehler oder einen Streich handele, bis zum Ringen um den endgültigen Titel der darüber erstellten Fachpublikation reichte. Bis zum Mai 2017 sind mehrere astronomische Objekte registriert worden, die jeweils in einem furiosen Akt der Verschmelzung für kurze Zeit mehr Energie freigesetzt haben als alle Sterne im gesamten Universum zusammengenommen. Ein neues Feld der Physik, die Gravitationswellen-Astronomie, ist geboren!

Kapitel 7 zeigt Fragen der Gravitationswellen-Astronomie auf und gibt einen Überblick über Probleme und Lösungswege bei dem Ziel, die Detektoren empfindlicher zu machen. Neben Verbesserungen existierender Anlagen müssen neue Detektoren gebaut werden, wenn man das Feld tiefer erforschen möchte. Außer den erdgebundenen Detektoren befindet sich auch ein Weltraum-Interferometer in der Entwicklung, das ab den 2030er Jahren einen neuen Bereich langperiodiger Gravitationswellen erschließen wird. Eine weitere Methode (das Pulsar-Timing) kann dazu benutzt werden, noch langsamere Gravitationswellen zu beobachten.

I. Es gibt sie, es gibt sie nicht, es gibt sie

Gravitation: Von Newton zu Einstein

Gravitation gilt als die schwächste unter den physikalischen Kräften, dennoch würde mir ein Sprung vom Hochhaus nicht gut bekommen. Beim Aufschlag auf den Boden wären es zwar elektromagnetische Kräfte, die mein weiteres Fallen durch den Asphalt verhindern würden, denn die Atome meines Körpers können diesen nicht so leicht durchdringen. Die Energie jedoch, die meinen Körper verformen würde, entspringe der Gravitationskraft.

Außer der Gravitation und den elektromagnetischen Kräften kennt die Physik noch die starke und schwache Kernkraft, die die Stabilität und den Zerfall der Atomkerne bestimmen, dabei aber lediglich innerhalb winziger Abstände zu diesen Kernen wirken. Zwar haben elektromagnetische Kräfte eine größere Reichweite als die starke und schwache Kraft, doch heben sie sich durch die Verteilung positiver und negativer Ladungen im Atom nach außen hin sehr schnell auf. Bei größeren Abständen dominiert die Gravitation, die eine Anziehungskraft zwischen allen uns bekannten Arten von Materie und Energie bewirkt. Im Weltraum ist sie die beherrschende Kraft, die gleichermaßen die Bewegung von Planeten, den Lebenszyklus von Sternen und die Entwicklung des gesamten Universums bestimmt.

Isaac Newton ermöglichte im späten 17. Jahrhundert mit der Formulierung seiner Bewegungsgesetze eine bis dahin nicht gekannte Präzision bei der Berechnung der Planetenbahnen, nachdem er erkannt hatte, wie sich Massen unter der Einwirkung von Kraft bewegen. Zusätzlich zu diesen Bewegungsgesetzen formulierte Newton auch ein Gesetz der Gravitation, das eine anziehende Kraft zwischen Massen beschreibt. Nach diesem Gesetz ziehen sich zwei Massen mit einer Kraft an, die proportional zur Größe der beiden Massen und umgekehrt proportio-

nal zum Quadrat ihres Abstands ist. Diese Gravitationskraft nach Newton wirkt sofort und ohne Verzögerung, also instantan: Wenn ich auf einer Tastatur tippe oder ein Glas hebe, wird dies sofort dem ganzen Universum mitgeteilt, weil dabei Massen ihre Position verändern und sich dadurch auch Richtung und Stärke der von ihnen ausgehenden Gravitationskraft ändern.

Nehmen wir Newtons Gravitationsgesetz und seine Bewegungsgesetze zusammen, dann haben wir folgende Kette von Ursache und Wirkung: Massen, wie beispielsweise unsere Sonne und die Planeten, üben instantan anziehende Kräfte aufeinander aus, die wiederum die Art und Weise bestimmen, in der sich diese Massen im Raum bewegen.

Durch die präzisen Vorhersagen von Planetenkonstellationen, die immer wieder durch Beobachtungen bestätigt wurden, galt Newtons Theorie im Laufe des 18. Jahrhunderts als Triumph und Gipfel des menschlichen Geistes. Im frühen 19. Jahrhundert hatte man jedoch eine Abweichung des Uranus, des nächsten Planeten jenseits des Saturns, von seiner berechneten Bahn beobachtet. Wenn Newtons Theorie richtig war, so gab es nur eine gute Erklärung für diese Abweichung: Es musste einen weiteren, bisher unbekanntem, Planeten geben, dessen Einfluss auf die Bahn des Uranus die Abweichung erklären konnte. Der französische Mathematiker und Astronom Urbain Jean Joseph Le Verrier und der Engländer John Couch Adams berechneten die Position des unbekanntem Planeten unabhängig voneinander. Le Verrier bat Johann Gottfried Galle, Observator an der Berliner Sternwarte, um eine Suche in dem von ihm berechneten Himmelsausschnitt. Schon kurze Zeit später hatte Galle mit seinen Mitarbeitern den Planeten entdeckt und schrieb an Le Verrier: *Monsieur, der Planet, dessen Position Sie errechnet haben, existiert tatsächlich.* Ein neuer Planet war gefunden, für den Le Verrier später den Namen Neptun vorschlug.

Dass ein Planet erstmals durch eine mathematische Vorhersage entdeckt wurde, war abermals eine grandiose Bestätigung von Newtons Gravitationstheorie. Es gab aber noch ein weiteres Problem: Der innerste Planet im Sonnensystem, Merkur, wies ebenfalls eine Abweichung von der nach Newton berech-

neten Bahn auf. Nach jeder Umkreisung der Sonne wandert das Perihel, der sonnennächste Punkt der Bahn des Merkurs, etwas weiter im Raum. In hundert Jahren summiert sich diese Verschiebung zu 574 Bogensekunden. Der größte Teil davon konnte durch den Einfluss der anderen Planeten mit der Newton'schen Theorie erklärt werden, doch blieb ein unerklärter Rest von etwa 8 Prozent (45 Bogensekunden). Nach seiner triumphalen Vorhersage der Existenz des Neptuns war Le Verrier nun überzeugt, er könne auch diese Anomalie der Merkurbahn durch einen noch unbekanntem Planeten erklären: Ein Planet namens Vulcan sollte sie verursachen. Es blieb allerdings ein großes Rätsel, weshalb ein Planet, der so nahe an der Sonne seine Bahn ziehen musste, bisher nicht beobachtet worden war.

Erst Albert Einstein sollte dieses Rätsel mehr als fünfzig Jahre später lösen. Im Jahr 1905 hatte Einstein eine neue Theorie von Raum und Zeit vorgestellt, die aus zwei Annahmen folgt: (1) Licht breitet sich stets mit der gleichen Geschwindigkeit aus, unabhängig von der Geschwindigkeit der Lichtquelle oder des Beobachters. (2) Die physikalischen Gesetze und Messungen in gleichförmig bewegten Bezugssystemen (Inertialsysteme) sind immer gleich – das bereits von Galileo formulierte Relativitätsprinzip.

Aus diesen Annahmen resultiert die Spezielle Relativitätstheorie, aus der eine enge Verzahnung von Raum und Zeit folgt, die durch den Begriff der Raumzeit ausgedrückt wird. Eine Folge dieser Theorie lautete, dass nichts, einschließlich Information, sich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegen könne. Neben anderen Erwägungen führte diese radikale Idee Einstein zu der Schlussfolgerung, dass nicht nur das Verständnis von Raum und Zeit, sondern auch Newtons Gravitationsgesetz einer Revision bedürfe, denn nach Newton breitete sich die Gravitationskraft ja instantan, quasi mit unendlicher Geschwindigkeit aus. Bis dato hatte die instantane Ausbreitung den meisten Physikern kein Problem bereitet. Im Licht der Speziellen Relativitätstheorie war sie jedoch nicht mehr denkbar, und so machte sich Einstein an die Arbeit, eine neue, mit der Speziellen Relativitätstheorie vereinbarende Theorie der Gravitation zu

entwickeln. Die Spezielle Relativitätstheorie heißt deshalb *speziell*, weil sie den Fall des Raums ohne Materie in Inertialsystemen behandelt. Die neue Theorie der Gravitation sollte dagegen den Namen *Allgemeine Relativitätstheorie* erhalten, weil sie auch Materie und die ihr entspringende Gravitation beschreibt.

Einsteins zentraler Gedanke bei der Abfassung der neuen Gravitationstheorie war die Nichtunterscheidbarkeit von Beschleunigung und Gravitationsanziehung: In einer Rakete ohne Fenster hat ein Astronaut keine Möglichkeit festzustellen, ob er mit der Rakete auf der Erde steht und auf den Start wartet, oder ob er im interstellaren Raum in einer sich beschleunigenden Rakete sitzt. Sein Körper würde in beiden Fällen mit der gleichen Kraft in den Sitz gepresst. Zugegeben, ein etwas skurriles Beispiel, denn ein Astronaut sollte stets wissen, wo er sich befindet, aber typisch für Gedankenexperimente, wie Einstein sie häufig benutzte. Diese Nichtunterscheidbarkeit von Beschleunigung und Gravitationsanziehung wird auch als (starkes) Äquivalenzprinzip bezeichnet, und Einstein nannte diese Idee *den glücklichsten Gedanken meines Lebens*.

Nach mehreren Jahren mühsamer Arbeit führten Einsteins Gedankenexperimente schließlich zu der neuen Theorie der Gravitation, der Allgemeinen Relativitätstheorie, die 1915 veröffentlicht wurde. Die zentrale neue Idee darin ist, dass der Raum selbst als verformbar betrachtet werden muss, während man ihn zuvor als unveränderlich und flach betrachtet hatte. Genauer gesagt, ist nicht nur der Raum verformbar, sondern die Raumzeit, also jene Einheit von Raum und Zeit, die schon durch die Spezielle Relativitätstheorie eingeführt wurde. Eine mögliche Krümmung der Zeit klingt sprachlich erst einmal ungewohnt. Gemeint ist damit eine Dehnung von Zeit, dass also zum Beispiel Uhren im gekrümmten Raum langsamer gehen. Wir sprechen im Folgenden einfach von der Krümmung des Raums, wenn wir die Rolle der Zeit außer Acht lassen, aber erinnern uns daran, dass im gekrümmten Raum stets auch die Zeit gedehnt wird. Was verursacht die Krümmung des Raums? Die Ursache ist in jedem Fall eine Masse oder Energie. Die Sonne krümmt den sie umgebenden Raum ebenso wie ein Apfel, wo-

bei die von der Sonne hervorgerufene Krümmung entsprechend ihrer Masse größer als diejenige des Apfels ist.

In dem von einer Masse gekrümmten Raum bewegen sich andere Massen auf kürzesten Bahnen. So bewegt sich beispielsweise die Erde auf einer kürzesten Bahn in dem von der Sonne gekrümmten Raum. Als Resultat beobachten wir, dass die Erde um die Sonne kreist. Der Unterschied zu Newtons Theorie liegt darin, dass der Raum sozusagen als Vermittler und Träger der Information zwischen den Massen dient, eine Rolle, die ihm in Newtons Theorie nicht zukommt.

In der Allgemeinen Relativitätstheorie haben wir also folgende Kette von Ursache und Wirkung: Massen krümmen den Raum, und der gekrümmte Raum bestimmt die Art und Weise, in der Massen sich bewegen. Oder in den Worten des Physikers John Archibald Wheeler: *Matter tells space-time how to curve and space-time tells matter how to move.* Gravitation ist hier also in der Geometrie des Raums selbst enthalten. Diese Struktur schlägt sich auch in den sogenannten Einstein'schen Feldgleichungen nieder, die besagen, dass Masse (oder Energie) und Raumkrümmung in direktem Bezug zueinander stehen.

Als ersten Prüfstein für seine neue Theorie berechnet Einstein (in einer früheren Version der Theorie gemeinsam mit seinem Freund Michele Besso) die Wirkung des von der Sonne gekrümmten Raums auf die Perihelverschiebung der Bahn des Merkurs. In seiner Veröffentlichung vom 25. November 1915 schreibt er: *Die Rechnung liefert für den Planeten Merkur ein Voranschreiten um 43" (Bogensekunden) in hundert Jahren, während die Astronomen 45 (±5)" als unerklärten Rest zwischen Beobachtungen und Newtonscher Theorie angeben. Dies bedeutet volle Übereinstimmung.* Einsteins neue Theorie ergibt also denjenigen Wert, der von den Astronomen tatsächlich beobachtet worden war, für den es bisher aber keine Erklärung gegeben hatte. Kurz darauf bemerkt Einstein in einem Brief an Arno Sommerfeld vom 9. Dezember 1915: *Das Resultat von der Perihelbewegung des Merkur erfüllt mich mit großer Befriedigung. Wie kommt uns da die pedantische Genauigkeit der Astronomie zu Hilfe, über die ich mich im Stillen früher oft lustig machte!*

Durch die Lösung eines mehr als fünfzig Jahre alten Rätsels der Astronomie wird Einstein weiter bekannt und seine Fachkollegen sehen sich gezwungen, die neue Theorie nun ernsthaft in Betracht zu ziehen.

In derselben Arbeit vom 25. November bringt Einstein noch eine Korrektur einer früheren Vorhersage zur Lichtablenkung durch Massen an. Durch die Äquivalenz von Masse und Energie, eine Folge der Speziellen Relativitätstheorie, lässt sich Licht eine Masse zuordnen. Führt ein Lichtstrahl an einer anderen Masse, zum Beispiel einem Stern, vorbei, wird der Strahl leicht abgelenkt. Diese Vorhersage kann man schon mit der Speziellen Relativitätstheorie machen, unter Benutzung der Anziehung zwischen Massen nach Newtons Gravitationsgesetz. In der Allgemeinen Relativitätstheorie fällt die Lichtablenkung jedoch doppelt so groß aus, worauf Einstein in seiner Arbeit hinweist. In zwei berühmten Expeditionen zur Beobachtung der totalen Sonnenfinsternis von 1919 misst der Brite Sir Arthur Stanley Eddington die Lichtablenkung von Sternenlicht an der Sonne. Die Messungengenauigkeit ist zwar nicht unerheblich, aber der gemessene Wert liegt näher an dem von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten. Für Lichtstrahlen, die direkt am Sonnenrand vorbeigehen, beträgt die Ablenkung 1,74 Bogensekunden. Das ist etwa ein Tausendstel des Winkels, unter dem uns der Sonnendurchmesser erscheint. Die Bestätigung der Vorhersage dieser Lichtablenkung macht Einstein mit einem Schlag auch außerhalb der Fachwelt berühmt, er wird gewissermaßen zur Wissenschafts-Pop-Ikone.

Eine dritte frühe Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie betrifft den Einfluss von Masse auf das Vergehen der Zeit: Wie schon erwähnt, vergeht Zeit im gekrümmten Raum in der Nähe einer Masse, also zum Beispiel an der Oberfläche eines Sterns, langsamer. Hier haben wir wieder die enge Verzahnung von Raum und Zeit. Da Licht eine bestimmte Schwingungsfrequenz aufweist, kann man das Aussenden von Licht mit einer Uhr vergleichen, die mit einer bestimmten Frequenz tickt. Im gekrümmten Raum an der Oberfläche des Sterns tickt sozusagen ein Atom, das Licht aussendet, etwas langsamer als im unge-

krümmten Raum. Diese etwas geringere Schwingungsfrequenz führt zu einer etwas größeren Wellenlänge des ausgesendeten Lichts und wird deshalb als Rotverschiebung bezeichnet, denn rotes Licht hat eine größere Wellenlänge als blaues. Der Effekt dieser Gravitations-Rotverschiebung ist zwar gering, er war aber in den 1920er Jahren bereits indirekt messbar. Für unsere Sonne beträgt die Wellenlängenänderung etwa zwei Millionstel.

Drei Konsequenzen aus der Allgemeinen Relativitätstheorie konnten also sofort oder innerhalb weniger Jahre nach ihrer Veröffentlichung im Jahr 1915 bestätigt werden: die Anomalie der Perihelverschiebung des Merkurs, der Betrag der Lichtablenkung durch die Sonne und die Gravitations-Rotverschiebung.

Die Bestätigung zweier weiterer Konsequenzen dauerte erheblich länger: schwarze Löcher und Gravitationswellen. Beide haben nicht zwangsläufig etwas miteinander zu tun, aber zwei schwarze Löcher, die vor 1,4 Milliarden Jahren miteinander verschmolzen sind, werden uns in Kapitel 6 wieder begegnen.

Schon im Jahr 1915 findet der deutsche Astronom und Physiker Karl Schwarzschild eine Lösung von Einsteins Gleichungen, die eine Singularität der Raumzeit beschreibt. Dies war ein erster Hinweis auf etwas, für das später der Ausdruck *schwarzes Loch* geprägt wurde. Damit wird, salopp gesagt, ein Bereich sehr stark gekrümmten Raums bezeichnet, der sich durch eine extrem dichte Ansammlung von Masse auszeichnet. Die Masse ist derart auf einen kleinen Bereich konzentriert, dass die oben erwähnte Gravitations-Rotverschiebung im Grunde unendlich groß ist: Uhren ticken dort quasi unendlich langsam, und kein Licht vermag diesem Bereich zu entkommen. Durch diese Eigenschaft wurde schließlich auch der Terminus *schwarzes Loch* inspiriert, der von dem Physiker John Archibald Wheeler vorgeschlagen wurde, der aber auch vorher schon in der wissenschaftlichen Gemeinschaft gelegentlich aufgetaucht war.

Die Hinweise darauf, dass schwarze Löcher in der Natur tatsächlich vorkommen und dass sie sogar wesentlich zur Dynamik und Entwicklung des Universums beitragen, haben sich im Laufe der vergangenen Jahrzehnte immer mehr verdichtet. Besonders eindrucksvoll ist die Beobachtung, dass im Zentrum

unserer Galaxie, der Milchstraße, einige Sterne auf sehr engen Bahnen sehr dicht um ein unsichtbares Zentrum kreisen. Die einzige derzeit wissenschaftlich plausible Erklärung dafür ist die Existenz eines schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße mit einer Masse, die derjenigen von etwa vier Millionen Sonnen entspricht.

Die Vorhersage der Gravitationswellen aus der Allgemeinen Relativitätstheorie

Da sich in der Newton'schen Theorie die Gravitationskraft instantan auswirkt, kann es nach dieser Theorie auch keine Wellen der Gravitation geben, denn eine Welle bedingt die Ausbreitung einer Anregung oder Störung in Raum und Zeit. Im späten 18. Jahrhundert hatte der Mathematiker und Physiker Pierre Simon de Laplace schon einmal den Gedanken verfolgt, was geschähe, wenn die Ausbreitung der Gravitationskraft mit endlicher Geschwindigkeit, also nicht instantan, erfolgte. Diese Überlegungen standen im Zusammenhang mit dem damals akuten Problem, die Bahn des Erdmondes möglichst exakt mit der Newton'schen Theorie zu beschreiben. Obwohl Newtons Theorie bei der Berechnung der Planetenbahnen so erfolgreich war, blieb es doch sehr schwer, sie ebenso erfolgreich auf die Bahn des Erdmondes anzuwenden, da diese vielen zusätzlichen Einflüssen unterliegt. Laplace befand aber anhand seiner Untersuchungen, dass die Newton'sche Theorie ausreichend sei. Die Geschwindigkeit der Ausbreitung der Gravitationskraft musste mindestens das Hundertmillionenfache der Lichtgeschwindigkeit betragen. Ein Wert, der zumindest in einem physikalischen Kontext sehr nahe bei unendlicher Geschwindigkeit liegt. Dieses Ergebnis legte Spekulationen über eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit für lange Zeit lahm, und die instantane Ausbreitung der Gravitationskraft wurde einstweilen weitgehend akzeptiert.

Der Gedanke an Gravitationswellen tauchte später wieder bei Henri Poincaré um das Jahr 1905 auf, nachdem die Spezielle Relativitätstheorie, wie zuvor erwähnt, eine obere Grenze der

Ausbreitung jeglicher Information mit Lichtgeschwindigkeit forderte. Wenn sich auch die Gravitationskraft, so Poincarés Gedanke, mit endlicher Geschwindigkeit ausbreiten würde, dann wären Wellen der Gravitation möglich. Poincaré wandte diese Idee auf das Problem der Anomalie in der Perihelverschiebung des Merkurs an, kam aber zu dem Ergebnis, dass die Abstrahlung von Gravitationswellen durch Merkur keine ausreichende Erklärung für die Anomalie der Merkur-Bahn sein konnte. Wie oben gesehen, konnte erst Einstein die Verschiebung mit der Krümmung des Raums erklären.

Mit der Allgemeinen Relativitätstheorie von 1915 wird die Idee der Gravitationswellen dann konkreter. Zunächst dauert es noch bis ins Jahr 1916, bis Einstein die Gravitationswellen als mögliche Lösung der Gleichungen der Allgemeinen Relativität erkennt. Der Grund dafür liegt in der Komplexität der Gleichungen, die aus zehn nichtlinearen Teilgleichungen bestehen. Generell ist es eine Aufgabe der theoretischen Physik, mögliche Lösungen für diese Gleichungen zu finden, was eine gewisse Analogie mit dem Lösen von Rätseln hat. Es gibt viele mögliche Lösungen, aber sie haben nicht unbedingt alle eine sinnvolle physikalische Bedeutung. Dieses Problem gab es auch in Bezug auf die Gravitationswellen. Um die Komplexität der Gleichungen beherrschen zu können, wandten Einstein und seine Kollegen Näherungsverfahren an. Außerdem muss man sich bei der Berechnung von Lösungen für ein Koordinatensystem entscheiden, in dem das Problem beschrieben wird. Im Prinzip sollten alle Koordinatensysteme gleiche Ergebnisse liefern, allerdings sind verschiedene Koordinatensysteme für gewisse Fragestellungen besser geeignet als andere. Die Wahl des Koordinatensystems in Kombination mit den Näherungsverfahren führte zunächst zu Fehlern bei der Interpretation der Ergebnisse. Das ist der Grund, weshalb Einstein 1915 zunächst nicht an die Existenz von Gravitationswellen glaubte, seine Meinung Mitte des Jahres 1916 dann aber änderte. Zum einen hatte de Sitter ihn darauf hingewiesen, dass ein anderes Koordinatensystem zur Untersuchung der Existenz von Gravitationswellen besser geeignet war. Zum anderen führte er eine Linearisierung der

ansonsten nichtlinearen Gleichungen ein, wodurch sich eine Analogie mit den Gleichungen der elektromagnetischen Wellen ergab.

Nachdem Einstein mit verschiedenen Koordinatensystemen experimentiert hatte, die entweder drei verschiedene Formen von Gravitationswellen oder nur eine einzige vorhersagten, kam er zu dem Schluss, dass es wohl diese eine Form der Wellen geben müsse, wohingegen die beiden anderen Artefakte der Wahl der Koordinaten seien. Einstein war allerdings der Ansicht, dass man die Wellen, falls sie denn existierten, wohl niemals würde messen können. Am Ende seiner Berechnung der Stärke Λ von Gravitationswellen schreibt Einstein in seiner Arbeit von 1916: *... so sieht man, dass Λ in allen nur denkbaren Fällen einen praktisch verschwindenden Wert haben muss.* Zu jener Zeit war das eine sinnvolle Schlussfolgerung, denn die Existenz kompakter schwerer Himmelsobjekte (z. B. schwarzer Löcher) war noch nicht bekannt, genauso wenig wie viele der Technologien, die erst hundert Jahre später die erste Messung von Gravitationswellen ermöglichen sollten.

Aber allein schon die Anerkennung der Existenz von Gravitationswellen war eine schwere Geburt und, wie sich später herausstellen sollte, hatte Einstein in seiner Arbeit von 1916 einen Fehler gemacht, der durch eine falsche Näherung zustande gekommen war. Er brauchte zwei Jahre, um diesen Fehler zu korrigieren, bei dem es um die Frage ging, wie viel Energie in einer Gravitationswelle enthalten ist. Der finnische Physiker Gunnar Nordström hatte als Erster die Ungereimtheit in Einsteins Gravitationswellenergebnis von 1916 erkannt und sie ihm im Herbst 1917 mitgeteilt. Anfang 1918 veröffentlichte Einstein dann einen Aufsatz, in dem er seinen Fehler von 1916 korrigierte und zudem eine neue Formel zur Abstrahlung von Gravitationswellen einführte.

Die Formel besagt, dass Gravitationswellen von beschleunigter Masse ausgesendet werden, also von Masse, die ihre Geschwindigkeit oder die Richtung der Geschwindigkeit im Raum verändert. Allerdings gibt es eine Einschränkung der Art, dass nicht alle beschleunigten Masseverteilungen Gravitationswellen aus-

senden. Eine völlig kugelsymmetrische Explosion eines Sterns sendet, zum Beispiel, keine solchen Wellen aus. Man kann das auch so beschreiben, dass sich alle Teilwellen in diesem Fall gegenseitig aufheben. Einsteins Formel der Abstrahlung von Wellen verlangt eine Asymmetrie, zum Beispiel die Drehbewegung zweier Massen umeinander.

Der nächste Physiker, der sich an prominenter Stelle mit Gravitationswellen beschäftigte, war der schon erwähnte Sir Arthur Stanley Eddington. Eine nach Eddingtons Ansicht bisher ungeklärte Frage war, mit welcher Geschwindigkeit sich Gravitationswellen ausbreiten. Einstein hatte in Analogie zur elektromagnetischen Theorie die Lichtgeschwindigkeit als Ausbreitungsgeschwindigkeit angenommen. Eddington hingegen war zunächst nicht von der Anwendbarkeit dieser Analogie überzeugt und trat als ein profunder Skeptiker der noch jungen Gravitationswellen auf. Sein berühmter Satz, dass sich Gravitationswellen *mit der Geschwindigkeit der Gedanken* ausbreiten, wird häufig als Indiz für seine Zweifel an der Existenz der Wellen zitiert. Tatsächlich aber zielte Eddington damit nur auf jene Wellen, die man aus den Einstein'schen Gleichungen als mathematische Artefakte bei der Anwendung bestimmter Koordinatensysteme erhält. In einem Aufsatz von 1922 leitet er die Formel zur Abstrahlung von Gravitationswellen erneut ab und korrigiert dabei einen weiteren kleinen Fehler in Einsteins Aufsatz von 1918, nämlich den Unterschied von einem Faktor zwei in der Formel zur Abstrahlung von Gravitationswellen.

Eddington konnte sich bei seinen Untersuchungen jedoch davon überzeugen, dass sich Gravitationswellen wohl tatsächlich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Als Nächstes wandte er sich der Frage zu, welchen Einfluss die Abstrahlung der Wellen auf die Quelle haben würde. Die Formel zur Abstrahlung von Gravitationswellen besagt, dass zwei Massen, die einander umkreisen, eine effektive Quelle für Gravitationswellen sind. Dies hat zur Folge, dass zum Beispiel zwei sich umkreisende Sterne durch die Abstrahlung von Gravitationswellen Energie verlieren. Dieser Verlust von Energie führt dazu, dass die Sterne sich aneinander annähern und in der Folge schneller umkreisen. Der

Zyklus endet erst, wenn sie sich so weit angenähert haben, dass sie praktisch ineinanderstürzen und zu einem einzigen Stern oder Objekt verschmelzen. Mit diesem Szenario hatten in der damaligen Zeit viele Physiker und Astronomen ihre Schwierigkeiten, denn das sogenannte Zweikörperproblem, zum Beispiel das Sich-Umkreisen zweier Himmelsobjekte als Binärsystem, galt als stabil und war ein solides Fundament der Himmelsmechanik. Zwei Objekte, die sich umkreisen, sollten dies für alle Zeiten tun, und die Vorstellung, sie könnten ineinanderstürzen, bedeutete eben eine fundamentale Instabilität dieser Konstellation. Die Kontroverse um das Zweikörperproblem sollte noch einige Zeit anhalten, bis sich die Überzeugung durchsetzte, dass Binärsysteme tatsächlich Energie durch die Abstrahlung von Gravitationswellen verlieren und somit instabil sind. Allerdings ist der Energieverlust so gering, dass er nur bei sehr kompakten Objekten eine signifikante Rolle spielt, zum Beispiel bei schwarzen Löchern, die sich in einem geringen Abstand umkreisen.

Im Jahr 1936 gab es ein kurioses Intermezzo in Form einer Arbeit, die Einstein zur Veröffentlichung bei der renommierten Zeitschrift *Physical Review* eingereicht hatte. Diese Arbeit trägt den Titel «Do gravitational waves exist?» In einem Brief an Max Born schreibt Einstein: *Ich habe zusammen mit einem jungen Mitarbeiter (Rosen) das interessante Ergebnis gefunden, daß es keine Gravitationswellen gibt, trotzdem man dies gemäß der ersten Approximation für sicher hielt.* Die Veröffentlichung der Arbeit wird vom Herausgeber des *Physical Review* jedoch abgelehnt, da ein anonymer Gutachter den Schluss für falsch hält. Einstein, der den anonymen Begutachtungsprozess von deutschen Journalen nicht gewohnt ist, schreibt einen wütenden Brief an den *Physical Review* und zieht seine Arbeit zurück. Einige Monate später erkennt Einstein seinen Fehler und veröffentlicht die Arbeit unter anderem Titel in einer anderen Zeitschrift. Einstein hält es jetzt wieder für wahrscheinlich, dass es Gravitationswellen wirklich geben könnte: Sie seien Krümmungen der Raumzeit, die sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen. Sie würden von beschleunigten Massen erzeugt und auf ihrer

Reise durch das Universum dehnten und stauchten sie den sie umgebenden Raum.

Astronomische Verursacher von Gravitationswellen

Im Prinzip erzeugen schon sich bewegende Gegenstände unserer Alltagswelt Gravitationswellen. Diese sind aber viel schwächer als Wellen, die von massiveren Objekten im Weltraum erzeugt werden können. Aus diesem Grund ist die Gravitationswellenforschung auf astronomische Objekte angewiesen und findet hier ein Feld der Anwendung. Einstein hatte mit seiner Formel zur Abstrahlung von Gravitationswellen erkannt, dass die Stärke der Wellen von den beteiligten Massen, aber in noch größerem Maß von deren Geschwindigkeitsänderung (des Betrags oder der Richtung) abhängt. Selbst zwei gewöhnliche Sonnen, die sich sehr eng umkreisen, strahlen nur sehr schwache Gravitationswellen ab, da ihre Geschwindigkeitsänderung gering ist. Es war früh klar, dass man zur Beobachtung von Gravitationswellen astronomische Objekte braucht, die so schwer wie gewöhnliche Sonnen, aber viel kleiner und kompakter als diese sind. Solche kompakten Objekte können sich auf engen Bahnen sehr viel schneller umkreisen, sodass sie auch viel stärkere Gravitationswellen erzeugen.

Als kompakte astronomische Objekte kommen hier Neutronensterne und schwarze Löcher ins Spiel. Ein Neutronenstern ist der kompakte Überrest eines Sterns, der seine aktive Phase als Sonne in einer großen Explosion beendet hat. Diese Explosion, die mit dem Kollaps des Sterns zu einem kompakten Objekt einhergeht, wird Supernova genannt. Wenn die ursprüngliche Sonne vor ihrem Kollaps eine bestimmte Masse hat (nicht zu schwer, aber auch nicht zu leicht), bildet sich durch die Supernova ein Neutronenstern, der seinem Namen nach im Wesentlichen aus Atomkernmaterie in Form von Neutronen besteht. Ein Neutronenstern hat, bei etwa gleicher Masse, einen etwa hunderttausendmal kleineren Durchmesser als unsere Sonne. Neutronensterne sind extreme Formen uns bekannter Materie. Ein Neutronenstern, der zu schwer ist, kann sich letzt-

lich nicht davor schützen, zu einem schwarzen Loch zu kollabieren. Überschreitet die Masse des ursprünglichen Sterns nämlich eine gewisse Grenze, dann bildet sich bei einer Supernova statt eines Neutronensterns ein schwarzes Loch. Da sich etwa die Hälfte aller Sterne in Binärsystemen befindet, also Partnersterne haben, um die sie kreisen, gehen daraus auch viele kompakte Binärsysteme hervor, also Systeme aus zwei schwarzen Löchern oder Neutronensternen. Eine weitere Möglichkeit der Bildung kompakter Binärsysteme besteht darin, dass sich zwei schwarze Löcher sozusagen im Weltraum begegnen und nach der Interaktion mit einem dritten Objekt, das danach die Szenerie wieder verlässt, zu einem Binärsystem werden.

Bisher gehen Physiker und Astronomen von vier mehr oder weniger bekannten Quellen für Gravitationswellen aus, die für den Frequenzbereich der erdgebundenen Gravitationswellendetektoren relevant sind: kompakte Binärsysteme, Supernovae, rotierende Neutronensterne sowie Hintergrundrauschen.

Soweit derzeit bekannt, können kompakte Binärsysteme aus zwei Neutronensternen bestehen, aus einem Neutronenstern und einem schwarzen Loch oder schließlich aus zwei schwarzen Löchern. Wie zuvor erwähnt, verlieren die Binärsysteme durch die Abstrahlung von Gravitationswellen Energie, was zu einer Verringerung des Abstands und einem schnelleren Umkreisen der Objekte führt (ein Umstand, der auch als *Orbit-Paradoxon* bezeichnet wird und durch die Berücksichtigung der potenziellen Energie zwischen den Objekten erklärbar ist). Das sukzessive schnellere Umkreisen der Objekte führt zu Gravitationswellen ansteigender Frequenz und Stärke, die typisch für diese Art von Quelle sind, bis die beiden Objekte schließlich zu einem einzigen verschmelzen.

Supernovae erzeugen Gravitationswellen für den kurzen Moment der Explosion des Sterns, sofern es eine Asymmetrie in der Verteilung der Massen bei der Explosion gibt. Wie groß diese Asymmetrie und eine daraus resultierende Gravitationswelle ist, ist nicht genau bekannt und Gegenstand aktiver Forschung, die hauptsächlich mit Computersimulationen durchgeführt wird.

Ähnlich wie Supernovae sind auch Neutronensterne, die um

ihre eigene Achse rotieren, eine Quelle für Gravitationswellen, sofern sie eine Asymmetrie in ihrer Massenverteilung aufweisen. Salopp gesagt, ist das der Fall, wenn sie einen Buckel haben, wobei man physikalisch eher von einer sehr kleinen Abweichung der Gestalt von perfekter Rotationsymmetrie in Form eines Ellipsoids ausgehen würde. Im Gegensatz zu den kurzen Impulsen, die von einer Supernova erwartet werden, findet die Erzeugung von Gravitationswellen durch solche Neutronensterne kontinuierlich statt, nämlich solange sie um ihre eigene Achse rotieren. Durch die Beobachtung von Radiopulsaren ist bekannt, dass manche Neutronensterne bis zu einigen Hundert Mal pro Sekunde um ihre eigene Achse kreisen.

Schließlich kann man Gravitationswellen auch in Form eines Rauschens erwarten, das sich nicht eindeutig einzelnen Quellen zuordnen lässt. Dieses Rauschen kann verschiedene Ursachen haben, so zum Beispiel die unaufgelöste Überlagerung einzelner Gravitationswellen vieler verschiedener Quellen. Es kann aber auch von Gravitationswellen hervorgerufen werden, die unmittelbar nach dem Urknall erzeugt wurden.

Die hier aufgeführten astronomischen Objekte und Ereignisse sind die wichtigsten derzeit der Theorie nach bekannten Verursacher von Gravitationswellen. Natürlich besteht die Hoffnung, darüber hinaus noch weitere auszumachen. Gravitationswellenimpulse unbekannter Form könnten zur Entdeckung völlig neuer astrophysikalischer Prozesse führen. Wenden wir uns nun aber der Frage zu, wie man Gravitationswellen messen kann.

Mehr Informationen zu [diesem](#) und vielen weiteren Büchern aus dem Verlag C.H.Beck finden Sie unter: www.chbeck.de