

Presseinformation

Gravitationswellen 100 Jahre nach Einsteins Vorhersage entdeckt

Entscheidende Beiträge von Forschenden der Leibniz Universität Hannover

LIGO öffnet mit der Beobachtung von Gravitationswellen kollidierender schwarzer Löcher ein neues Fenster zum Universum

Zum ersten Mal haben Wissenschaftler Kräuselungen der Raumzeit, so genannte Gravitationswellen, beobachtet, die – ausgelöst von einem Großereignis im fernen Universum - die Erde erreichten. Diese Beobachtung bestätigt eine wichtige Vorhersage der von Albert Einstein im Jahr 1915 formulierten Allgemeinen Relativitätstheorie. Sie öffnet gleichzeitig ein vollkommen neues Fenster zum Kosmos.

Gravitationswellen tragen Information über ihre turbulente Entstehung und das Wesen der Gravitation. Sie sind auf keine andere Weise zugänglich. Physiker haben festgestellt, dass die beobachteten Gravitationswellen während des letzten Sekundenbruchteils der Verschmelzung von zwei schwarzen Löchern entstanden. Dabei entstand ein einzelnes, massereicheres, rotierendes schwarzes Loch. Diese Kollision von zwei schwarzen Löchern war zuvor vorhergesagt, aber noch nie beobachtet worden.

Die Gravitationswellen wurden am 14. September 2015 um 5:51 Uhr US-Ostküstenzeit (9:51 Uhr Weltzeit) von beiden identischen Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO)-Detektoren in Livingston (Louisiana) und Hanford (Washington) in den USA registriert. Die LIGO-Observatorien werden von der National Science Foundation (NSF) finanziert. Caltech und MIT entwarfen, bauten und betreiben die Detektoren. Die Entdeckung wurde zur Veröffentlichung in der Fachzeitschrift *Physical Review Letters* akzeptiert. Die LIGO Scientific Collaboration (welche die GEO Collaboration und das Australian Consortium for Interferometric Gravitational Astronomy umfasst) und die Virgo Collaboration machten die Entdeckung in Daten der zwei LIGO-Detektoren.

Forschende des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut; AEI) in Hannover und Potsdam und vom Institut für Gravitationsphysik der Leibniz Universität Hannover haben in mehreren Schlüsselgebieten entscheidend zur Entdeckung beigetragen: mit der Entwicklung und dem Betrieb extrem empfindlicher Detektoren an den Grenzen der Physik, mit effizienten Methoden der Datenanalyse, die auf leistungsfähigen Computerclustern laufen und mit hochgenauen Wellenformmodellen, um das Signal aufzuspüren und astrophysikalische Information daraus zu gewinnen.

Fortschrittliche Detektortechnologien von GEO600

Die GEO-Kollaboration besteht aus Forschenden der Max-Planck-Gesellschaft und der Leibniz Universität sowie von britischen Institutionen. Sie entwickelten und betreiben den Gravitationswellen-Detektor GEO600 nahe Hannover. Er dient als Ideenschmiede und Prüfstand für fortschrittliche Detektortechnologien. Die meisten

Referat für
Kommunikation und Marketing

Tel. +49 511 762 5342
Fax +49 511 762 5391

E-Mail: kommunikation
@uni-hannover.de

12. Februar 2016
kw/aw/021/16

der Schlüsseltechnologien, die zur nie zuvor erreichten Empfindlichkeit von Advanced LIGO (aLIGO) beigetragen haben und die Entdeckung ermöglichten, wurden innerhalb der GEO-Kollaboration entwickelt und getestet. Beispiele sind Signalüberhöhung, resonante Seitenband-Extraktion und monolithische Spiegelaufhängungen. AEI-Forschende haben gemeinsam mit Kollegen des Laser Zentrum Hannover e.V. außerdem die Hochleistungslasersysteme von aLIGO entwickelt und am Detektor installiert. Die Laser sind entscheidend für die hochpräzisen Messungen.

„Wissenschaftler suchen seit Jahrzehnten nach Gravitationswellen, aber erst jetzt verfügen wir über die unglaublich präzisen Technologien, um diese extrem schwachen Echos aus dem fernen Universum wahrzunehmen“, sagt Prof. Karsten Danzmann, Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover und Direktor des Instituts für Gravitationsphysik der Leibniz Universität Hannover. „Diese Entdeckung wäre unmöglich gewesen ohne die Anstrengungen innerhalb der Max-Planck-Gesellschaft, der Leibniz Universität, der GEO-Kollaboration und die dort entwickelten Technologien.“

Rechenleistung und Analysemethoden für die Entdeckung

Max-Planck-Forschende entwickelten und implementierten fortschrittliche und effiziente Datenanalyse-Methoden, um nach schwachen Gravitationswellen-Signalen in den Daten der aLIGO-Detektoren zu suchen. Sie führten außerdem den Großteil der Produktions-Datenanalyse aus. Zusätzlich stellte der vom AEI betriebene Cluster Atlas, der weltweit leistungsfähigste Großrechner für die Suche nach Gravitationswellen, den Hauptteil der Rechenleistung für die Entdeckung und die Analyse von aLIGO-Daten zur Verfügung. Atlas trug mehr als 24 Million CPU-Kern-Stunden zu dieser Analyse bei.

„Ich bin stolz darauf, dass zwei Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik das Signal als Erste gesehen haben und dass unser Institut eine führende Rolle bei dieser spannenden Entdeckung spielt“, sagt Prof. Bruce Allen, Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover. „Einstein selbst glaubte, Gravitationswellen wären zu schwach, um sie nachzuweisen, und er glaubte nicht an die Existenz Schwarzer Löcher. Aber ich denke, dass er nichts dagegen hätte, sich geirrt zu haben!“

Genauere Wellenformmodelle ebnet Weg zur Beobachtung verschmelzender schwarzer Löcher

Max-Planck-Forschende entwickelten hochgenaue Modelle der Gravitationswellen, die schwarze Löcher beim Umrunden und letztendlichen Kollidieren miteinander aussenden. Diese Wellenformmodelle wurden in der fortlaufenden Suche nach verschmelzenden Binärsystemen in den LIGO-Daten implementiert und angewandt. Diese Suche hat das Signal von der Verschmelzung schwarzer Löcher, das als GW150914 bezeichnet wird, mit einer statistischen Signifikanz von mehr als 5 Standardabweichungen beobachtet. Max-Planck-Forschende nutzen außerdem dieselben Wellenformmodelle, um auf die astrophysikalischen Parameter der Quelle zu schließen: dazu zählen die Massen und Eigendrehungen der zwei schwarzen Löcher, die Ausrichtung des Systems und seine Entfernung zur Erde und auch Masse und Eigendrehung des riesigen schwarzen Lochs, das in der Verschmelzung

entstand. Diese Modelle dienten auch dazu, die Übereinstimmung von GW150914 mit den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie zu überprüfen.

„Seit Jahren arbeiten wir daran, die Gravitationswellen zu modellieren, die von einem der extremsten Ereignisse im Universum ausgestrahlt werden: Paare schwarzer Löcher, die einander umrunden und dann miteinander verschmelzen. Und genau dieses Signal haben wir nun gefunden!“ sagt Prof. Alessandra Buonanno, Direktorin am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam. „Es ist überwältigend zu sehen wie genau Einsteins Relativitätstheorie die Realität beschreibt. GW150914 stellt eine bemerkenswerte Gelegenheit dar, Gravitation unter Extrembedingungen zu untersuchen.“

LIGO-Forschung wird innerhalb der LIGO Scientific Collaboration (LSC) durchgeführt, einer Gruppe von mehr als 1000 Forschenden von Universitäten in den USA und in 14 weiteren Ländern. Mehr als 90 Universitäten und Forschungseinrichtungen in der LSC entwickeln Detektor-Technologien und analysieren die Daten; rund 250 Studierende tragen als wichtige Mitglieder zur Kollaboration bei. Das Detektornetzwerk der LSC umfasst die LIGO-Interferometer und den GEO600-Detektor. Das GEO600-Team umfasst Forschende am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut, AEI), an der Leibniz Universität Hannover, zusammen mit Partner an der University of Glasgow, der Cardiff University, der University of Birmingham und anderen Universitäten in Großbritannien, und die Universität de les Illes Balears in Spanien.

LIGO wurde ursprünglich zur Messung von Gravitationswellen in den 1980er Jahren von drei Personen vorgeschlagen: Rainer Weiss, emeritierter Physikprofessor des MIT; Kip Thorne; Richard P. Feynman, Professor für Theoretische Physik am Caltech, und Ronald Drever, emeritierter Physikprofessor, ebenfalls am Caltech.

Virgo-Forschung wird von der Virgo Collaboration durchgeführt, die aus mehr als 250 Physikern und Ingenieuren aus 19 verschiedenen europäischen Forschungsgruppen besteht: 6 vom Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) in Frankreich, 8 vom Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) in Italien, 2 in den Niederlanden am Nikhef, das Wigner RCP in Ungarn, die POLGRAU-Gruppe in Polen und das European Gravitational Observatory (EGO), das Labor, das den Virgo-Detektor nahe Pisa in Italien betreibt.

Die erweiterte Leistungsfähigkeit von Advanced LIGO ermöglichte die Entdeckung. Advanced LIGO ist eine große Erweiterung der Instrumente zur Erhöhung ihrer Empfindlichkeit gegenüber der ersten Generation der LIGO-Detektoren. Damit nahm das von ihnen erfasste Volumen enorm zu und ermöglichte so den Nachweis von Gravitationswellen im ersten Beobachtungslauf. Die US National Science Foundation ist führend in der Finanzierung von Advanced LIGO. Förderorganisationen in Deutschland (Max-Planck-Gesellschaft), Großbritannien (Science and Technology Facilities Council, STFC) und Australien (Australian Research Council) haben entscheidende Beiträge zum Projekt geleistet. Viele der Schlüsseltechnologien, die Advanced LIGO so viel empfindlicher machten, wurden von der deutsch-britischen GEO Collaboration entwickelt und getestet. Entscheidende Computer-Ressourcen wurden vom Atlas-Cluster am AEI Hannover, dem LIGO Laboratory, der Syracuse University und der University of Wisconsin-Milwaukee zur Verfügung gestellt. Viele

Universitäten entwickelten, bauten und testeten entscheidende Komponenten von Advanced LIGO: die Australian National University, die University of Adelaide, die University of Florida, Stanford University, Columbia University of New York und Louisiana State University.

Begleitmaterialien und weitere Informationen:

Das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut (AEI)) ist ein Institut der Max-Planck-Gesellschaft mit Teilinstituten in Potsdam-Golm und in Hannover, wo es eng mit der Leibniz Universität Hannover zusammenarbeitet. Seit seiner Gründung im Jahr 1995 hat sich das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik als international führende Forschungseinrichtung etabliert. Fünf Abteilungen und mehrere unabhängige Forschungsgruppen bearbeiten am AEI das gesamte Spektrum der Gravitationsphysik: von den gewaltigen Dimensionen des Universums bis zu den winzigen Strings. Das AEI ist die einzige Forschungseinrichtung weltweit, die all diese Felder unter einem Dach vereint. Drei der fünf Abteilungen sind Teil der LIGO Scientific Collaboration und haben entscheidend dazu beigetragen, den ersten direkten Nachweis von Gravitationswellen Realität werden zu lassen.

Das Institut für Gravitationsphysik der Leibniz Universität Hannover befindet sich am gleichen Ort wie das AEI Hannover. Unter einem Dach arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler beider Institutionen eng an allen Aspekten der Gravitationswellenforschung. Mehr als 50 Studierende arbeiten als Doktoranden an der Leibniz Universität in der gemeinsamen International Max Planck Research School (IMPRS) on Gravitational Wave Astronomy.

Gravitationswellenforschung in der Max-Planck-Gesellschaft hat eine lange Tradition und reicht bis zu den ersten Anfängen in den 1960er Jahren zurück. Die Max-Planck-Forschungsgruppe führte Koinzidenz-Experimente zwischen resonanten Detektoren durch und widerlegte so die frühen Behauptungen eines direkten Nachweises von Gravitationswellen in den 1960er Jahren. Danach wandte sich die Gruppe der Laserinterferometrie zu und baute die ersten ernstzunehmenden Prototypen von laserinterferometrischen Gravitationswellen-Detektoren. Dabei entwickelten und/oder demonstrierten sie die meisten der Kernkonzepte, die nun ein zentraler Bestandteil aller großen Gravitationswellen-Observatorien sind: optische Modenfilter, Streulichtunterdrückung, Leistungsüberhöhung und später in der Zusammenarbeit mit der Leibniz Universität Hannover duales Recycling, resonante Seitenband-Extraktion, thermisch-adaptive Optik, mehrstufige monolithische Aufhängungen und stabilisierte Hochleistungslaser.

Gravitationswellen sind eine wichtige Vorhersage von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Danach erzeugen beschleunigte Bewegungen großer Massen Krümmungen in der Raumzeit, die sich noch in großer Entfernung als winzige Abstandsänderungen zwischen Objekten nachweisen lassen. Doch selbst Gravitationswellen, die von astrophysikalischen Quellen – wie Sternexplosionen oder verschmelzenden schwarzen Löchern – erzeugt werden, verändern die Länge einer einen Kilometer langen Messstrecke nur um den Tausendstel Durchmesser eines Protons (10^{-18} Meter). Erst jetzt haben die Detektoren die erforderliche Empfindlichkeit erreicht, um Gravitationswellen zu messen. Die Beobachtung des bislang dunklen „gravitativen Universums“ läutet ein neues Zeitalter der Astronomie

ein. Die Kollaboration umfasst interferometrische Gravitationswellen-Detektoren wie aLIGO (in den USA), GEO600 (in Deutschland) und Virgo (in Italien) sowie die geplanten Detektoren in Japan und Indien. Ein Detektor für niederfrequente Gravitationswellen im Weltraum (LISA) wird von ESA- und NASA-Wissenschaftlern und Forschenden der Leibniz Universität Hannover und vom AEI, die eine führende Rolle spielen, vorbereitet.

Das Signal, das nun entdeckt wurde, wird als GW150914 bezeichnet, da es die Erde am 14. September 2015 um 09:50:45 Weltzeit erreichte. Es wurde von beiden LIGO-Detektoren in Hanford und in Livingston registriert. Es dauerte rund 0,2 Sekunden, während derer das Signal in Frequenz und Amplitude zunahm. Über diesen Zeitraum stieg die Frequenz von 35 Hertz auf 250 Hertz an, und das Signal hatte eine Spitzenamplitude von 10^{-21} .

Aus den Ankunftszeiten des Signals – der Detektor in Livingston registrierte das Signal 7 Millisekunden vor dem Detektor in Hanford – schließen die Wissenschaftler, dass die Quelle in der südlichen Hemisphäre liegt.

Das Signal stimmt mit den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie für das Signal des finalen Umrundens und der letztendlichen Verschmelzung von zwei schwarzen Löchern mit der 36- und 29-fachen Masse unserer Sonne überein. Das dabei entstehende schwarze Loch hat die 62-fache Masse unserer Sonne. Das Energieäquivalent von rund 3 Sonnenmassen wurde in einem Sekundenbruchteil in Gravitationswellen umgesetzt – das entspricht einer maximalen Leistung von rund 50-mal der des gesamten sichtbaren Universums. Aus den Beobachtungen wurde auf eine Entfernung von rund 410 Millionen Parsec (1,3 Milliarden Lichtjahre) zu dem System geschlossen.

Durch Charakterisierung der zufälligen Schwankungen des Rauschens in den Advanced LIGO-Detektoren ermittelten die Forschenden die statistische Signifikanz des Signals zu 5,1 Standardabweichungen. Das bedeutet, dass ein solches Signal in den 16 Tagen ausgewerteter Beobachtung weniger als einmal in 200.000 Jahren durch zufällige Rauschschwankungen entstehen kann.

Advanced LIGO besteht aus interferometrischen Gravitationswellen-Detektoren an zwei Standorten, einer in Hanford (Washington State, USA) und einer in Livingston (Louisiana, USA). An beiden Detektoren wird Laserlicht durch vier Kilometer lange, L-förmig angeordnete Vakuumröhren geschickt, um hochpräzise die Position von Spiegeln an den Röhrenden zu vermessen. Nach Einsteins Relativitätstheorie ändert sich der Abstand der Spiegel minimal, wenn eine Gravitationswelle den Detektor durchläuft. Längenänderungen von weniger als dem Zehntausendstel eines Protonendurchmessers (10^{-19} Meter) lassen sich so nachweisen.

Unabhängige und weit voneinander entfernte Observatorien sind erforderlich, um sicherzustellen, dass die Signale tatsächlich aus dem Weltall kommen und um die Himmelsposition ihrer Quelle zu bestimmen.

Advanced LIGO beendete die erste wissenschaftliche Datenaufnahme am 12. Januar 2016 nach vier Monaten Laufzeit. Während dieser Zeit war die Empfindlichkeit 3 bis 5 Mal höher als die von initial LIGO vor dem Ausbau. Beim Erreichen der Design-Empfindlichkeit wird eine 10-fache Erhöhung erwartet.

GEO600 ist ein interferometrischer Gravitationswellen-Detektor nahe Hannover mit 600 Meter langen Röhren für die Laserstrahlen. Entwicklung und Betrieb wurden und werden von Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik und der Leibniz Universität Hannover zusammen mit Partnern in Großbritannien durchgeführt. GEO600 ist Teil des weltweiten Netzwerks von Gravitationswellen-Detektoren und ist derzeit der einzige Detektor, der durchgängig Messdaten aufnimmt. GEO600 ist außerdem eine Ideenschmiede für fortschrittliche Detektortechnologien wie nicht-klassisches (gequetschtes) Licht, Signal- und Leistungsüberhöhung und monolithische Aufhängungen für die Optik.

Atlas ist ein großer Computercluster am Albert-Einstein-Institut in Hannover mit enormer Rechenkraft. Atlas besteht aus mehr als 14.000 CPU- und 250.000 GPU-Rechenkernen. Dies macht Atlas zum leistungsfähigsten speziell für die Gravitationswellen-Datenanalyse gebauten Computercluster der Welt. Atlas wird hauptsächlich von der Max-Planck-Gesellschaft finanziert und erhält Betriebsmittel von der Leibniz Universität Hannover.

Informationen zur Finanzierung der Detektoren

Der Betrieb von LIGO wird von der US-amerikanischen National Science Foundation (NSF) finanziert, die Detektoranlagen werden von Caltech und MIT betrieben. Das LIGO-Upgrade wurde von der NSF finanziert mit wichtigen finanziellen und technischen Beiträgen von der Max-Planck-Gesellschaft, dem britischen Science and Technology Facilities Council (STFC) und dem Australian Research Council (ARC).

Die Finanzierung von GEO600 tragen das Bundesministerium für Bildung und Forschung, das Land Niedersachsen, die Max-Planck-Gesellschaft, der Science and Technology Facilities Council und die VolkswagenStiftung.

Hinweis an die Redaktion:

Für weitere Informationen steht Ihnen Dr. Benjamin Knispel, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut Hannover), unter Telefon +49 511 762 19104 oder per E-Mail unter benjamin.knispel@aei.mpg.de gern zur Verfügung.