

Die Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.

ist eine unabhängige gemeinnützige Forschungsorganisation. Sie unterhält rund 80 Max-Planck-Institute, welche im Dienst der Allgemeinheit Grundlagenforschung in den Natur-, Bio- und Geisteswissenschaften betreiben.

Insbesondere greift die Max-Planck-Gesellschaft neue, zukunftsreiche Forschungsrichtungen auf, die an den Universitäten noch keinen oder keinen ausreichenden Platz finden, wegen ihres interdisziplinären Charakters nicht in das Organisationsgefüge der Universitäten passen oder einen Aufwand an Personal und Material erfordern, der von Universitäten nicht erbracht werden kann. Die Max-Planck-Institute ergänzen daher die Arbeit an den Universitäten in wichtigen Forschungsbereichen auf ideale Weise.



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Die Gravitationstheorie Einsteins

Die Allgemeine Relativitätstheorie ist eine der bedeutendsten wissenschaftlichen Errungenschaften des letzten Jahrtausends. Sie beschreibt die Raumzeitstruktur und Gravitation der Welt im Großen – im makroskopischen Bereich. Nach Einsteins Theorie kommen die Erscheinungen der Schwere, die wir am eigenen Körper spüren, dadurch zustande, dass jeder Körper in seiner Umgebung den Raum krümmt und den Zeitablauf beeinflusst – und umgekehrt die Bewegung jedes Körpers dadurch bestimmt ist, dass er sich in die gekrümmte Raumzeit einpasst.

Eine wichtige Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie ist die Existenz von Gravitationswellen. Im September 2015 hat ein globales Wissenschaftlerteam diese Wellen in der Raumzeit zum ersten Mal direkt gemessen und so die Verschmelzung von zwei schwarzen Löchern nachgewiesen. Gravitationswellen entstehen bei der beschleunigten Bewegung großer Massen und führen auf der Erde zu winzigen Abstandsänderungen zwischen zwei Objekten. Ein Beispiel: Selbst bei kraftvollen astrophysikalischen Ereignissen, wie verschmelzenden schwarzen Löchern oder Sternexplosionen, verändert sich die Länge einer einen Kilometer langen Messstrecke auf der Erde nur um den tausendstel Durchmesser eines Protons (10^{-18} m). Erst seit kurzem sind die Detektoren empfindlich genug, um so geringe Abstandsänderungen zu registrieren. Die erste Beobachtung der bisher dunklen Seiten unseres Universums durch Gravitationswellen hat eine neue Ära der Astronomie eingeläutet.

Bild: AIP Emilio Segre Visual Archives, W. F. Meggers Gallery of Nobel Laureates

Das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik hat zwei Standorte:

In Potsdam befinden sich die Abteilungen Quantengravitation und Vereinheitlichte Theorien, Geometrische Analysis und Gravitation, sowie Astrophysikalische und Kosmologische Relativitätstheorie.

Die Abteilungen Laserinterferometrie und Gravitationswellen-Astronomie und Beobachtungs-basierte Relativität und Kosmologie sind in Hannover angesiedelt.

Kontakt

Potsdam
Am Mühlenberg 1
14476 Potsdam-Golm
Tel.: +49-331-567 7303
Fax: +49-331-567 7298

Hannover
Callinstraße 38
30167 Hannover
Tel.: +49-511-762 19104
Fax: +49-511-762 2784

www.aei.mpg.de

einsteinathome.org

www.lisamission.org

www.geo600.org



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Bild: NASA/JPL-Caltech/Univ. of Toronto

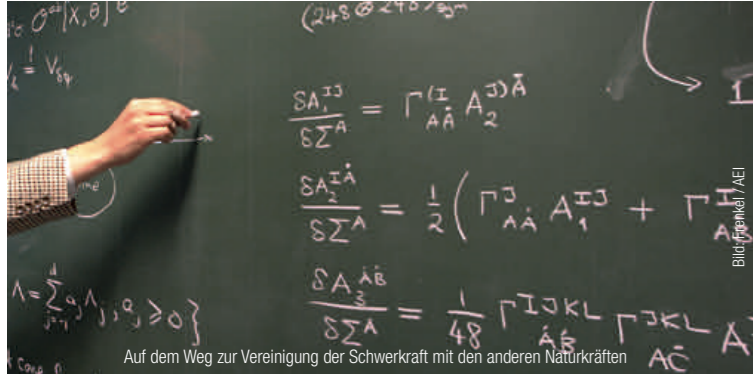
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR GRAVITATIONSPHYSIK ALBERT-EINSTEIN-INSTITUT



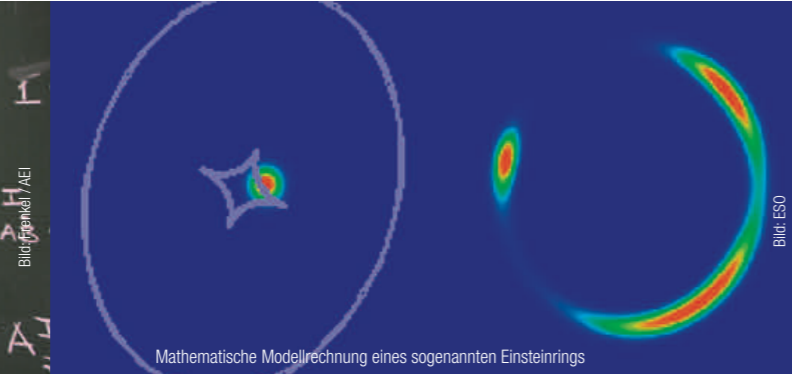
Bild: AEI

Das Albert-Einstein-Institut

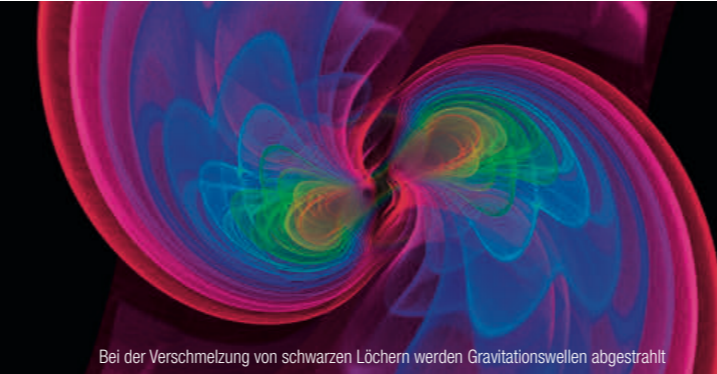
Das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik hat sich seit seiner Gründung im Jahr 1995 als international führendes Forschungszentrum etabliert. Hier wird in fünf Abteilungen und mehreren unabhängigen Nachwuchsgruppen das gesamte Spektrum der Gravitationsphysik erforscht – von den riesigen Dimensionen des Kosmos bis hin zu den unvorstellbar winzigen Abmessungen der Strings. Die Vereinigung aller dieser wichtigen Forschungszweige unter einem Dach ist weltweit einzigartig. So arbeitet man u.a. an der Entwicklung einer Theorie, die Quantenfeldtheorie und Allgemeine Relativitätstheorie vereint. Am Institut werden die mathematischen Fundamente von Einsteins Beschreibung der Raumzeit und Gravitation erforscht und weiterentwickelt. Die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen erforschen Gravitationswellen, Neutronensterne, schwarze Löcher, Zweikörperprobleme der Allgemeinen Relativitätstheorie und analytische und numerische Lösungen von Einsteins Gleichungen. Die Analyse von Daten aus dem internationalen Netzwerk von Gravitationswellen-Detektoren und Folgeuntersuchungen der Eigenschaften der Quellen sind zentrale Forschungsthemen am Institut. Hierfür werden höchst effiziente Datenanalysemethoden entwickelt. Im experimentellen Bereich stehen Gravitationswellen-Detektoren auf der Erde und im Weltraum im Mittelpunkt. All diese Anstrengungen werden in den nächsten Jahren eine völlig neue Astronomie ermöglichen, die mit dem ersten Nachweis von Gravitationswellen auf der Erde am 14. September 2015 begonnen hat.



Auf dem Weg zur Vereinigung der Schwerkraft mit den anderen Naturkräften



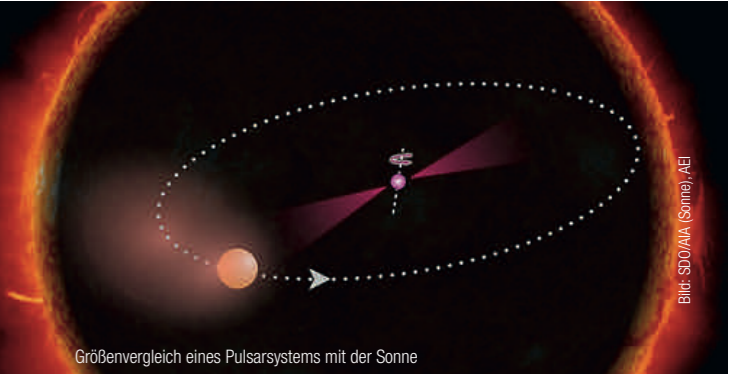
Mathematische Modellrechnung eines sogenannten Einsteinrings



Bei der Verschmelzung von schwarzen Löchern werden Gravitationswellen abgestrahlt



Satellit von LISA, dem geplanten Gravitationswellendetektor im Weltall



Größenvergleich eines Pulsarsystems mit der Sonne

Quantengravitation und Vereinheitlichte Theorien

Bereits in den 1970er Jahren hatten Physiker die Kräfte der Natur in einer Theorie vereint, dem sog. Standardmodell der Teilchenphysik. Nur die Schwerkraft widersetzt sich hartnäckig einer Einordnung: die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantentheorie lassen sich im Rahmen der bekannten physikalischen Gesetze nicht miteinander vereinbaren. Widersprüche treten zwar erst bei unvorstellbar kleinen Abständen von 10^{-33} cm zutage, aber wenn wir verstehen wollen, was im Inneren eines schwarzen Loches oder in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall „passiert“, müssen sie aufgelöst werden.

Daher suchen Gravitationsphysiker nach einer neuen Theorie der Quantengravitation, die das Standardmodell der Quantenfeldtheorie und die Allgemeine Relativitätstheorie als Grenzfälle enthält, deren mathematische Widersprüche aber überwindet. Die Hauptrichtungen der gegenwärtigen Forschung (kanonische Quantisierung, Supergravitation und Stringtheorie, sowie diverse nicht-perturbative Ansätze) sind alle in Gollm repräsentiert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf neuartigen Ideen, welche die Schwierigkeiten der existierenden Ansätze überwinden könnten.

Die neue Theorie erzwingt wahrscheinlich eine radikale Modifikation der herkömmlichen Raumzeit-Konzepte bei extrem kleinen Abständen (der Planck-Skala). Vermutlich wird dort auch die vertraute Unterscheidung zwischen Raumzeit und Materie hinfällig.

Geometrische Analysis und Gravitation

Bei der Untersuchung und Beschreibung von Gravitation sind Physik und Mathematik eng miteinander verbunden. In der Abteilung „Geometrische Analysis und Gravitation“ des AEI werden die physikalischen Modellbildungen und mathematischen Methoden erforscht, mit denen Gravitationsphänomene beschrieben werden können. Besonderes Augenmerk gilt hierbei Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie der Raumzeit.

Die Einsteinsche Theorie wird in der Sprache von Geometrie und Analysis, insbesondere mit Hilfe von Differentialgeometrie und partiellen Differentialgleichungen formuliert. Es ist es daher unerlässlich, die mathematischen Grundlagen in diesen Bereichen eingehend zu untersuchen. Darauf aufbauend werden die Einsteinschen Gleichungen des Gravitationsfeldes erforscht, um Erscheinungen wie „schwarze Löcher“, „Gravitationswellen“ oder „Urknallsingularität“ zu verstehen. Diese theoretischen Untersuchungen sichern die Konsistenz der physikalischen Modellbildung. Sie liefern darüber hinaus Hinweise, wie mit Hilfe numerischer Simulationen explizite Vorhersagen für physikalisch messbare Phänomene gemacht werden können. Diese Vorhersagen sind wiederum wesentlich für Interpretation und Kontrolle physikalischer Experimente, wie sie an den Gravitationswellen-Detektoren durchgeführt werden.

Astrophysikalische und Kosmologische Relativitätstheorie

Die vielversprechendsten und interessantesten Quellen für Gravitationswellen-Detektoren sind Doppelsysteme aus schwarzen Löchern und/oder Neutronensternen. Um Gravitationswellen erfolgreich in den Detektordaten identifizieren zu können, muss man die erwarteten Signale von diesen Quellen sehr genau kennen. Die Wissenschaftler der Abteilung „Astrophysikalische und Kosmologische Relativitätstheorie“ entwickeln ausgeklügelte analytische und numerische Methoden zur Lösung der Einsteinschen Gleichungen und sagen hochgenaue Wellenformen vorher.

Mit diesen sogenannten „Templates“ suchen die Wissenschaftler im Datenstrom der Detektoren nach Gravitationswellensignalen. Sie bestimmen die astrophysikalischen und kosmologischen Eigenschaften der Quellen und testen die Allgemeine Relativitätstheorie für schwache und starke Gravitationsfelder. Die Wellenformmodelle aus dieser Abteilung wurden bei der ersten Beobachtung von Gravitationswellen aus der Verschmelzung zweier schwarzer Löcher in der LIGO Scientific Collaboration eingesetzt.

Wissenschaftler der Abteilung sind Mitglieder der LIGO Scientific Collaboration. Die Abteilung unterstützt zudem Forschung am Europäischen Pulsar Timing Array und LISA, einem zukünftigen Gravitationswellen-Observatorium im Weltraum. Einige Abteilungsmitglieder arbeiten am AEI in Hannover an der Suche nach Gravitationswellen von rotierenden Neutronensternen (Pulsaren).

Laserinterferometrie und Gravitationswellen-Astronomie

Nach jahrzehntelanger Forschung sind die Experimentalphysiker in der Gravitationswellenforschung endlich am Ziel: Die heutigen Observatorien haben die für eine direkte Messung von Gravitationswellen erforderliche Empfindlichkeit erreicht. Der erste Nachweis einer Gravitationswelle im September 2015 hat dies eindrucksvoll bestätigt. An dieser Entwicklung sind die Wissenschaftler der Abteilung „Laserinterferometrie und Gravitationswellen-Astronomie“ weltweit federführend beteiligt. Sie betreiben zusammen mit britischen Kollegen das Gravitationswellen-Observatorium GEO600 und entwickeln dabei neue Spitzentechnologien: Leistungsstarke und extrem stabile Laser, sogenanntes gequetschtes Laserlicht mit besonderen Quanteneigenschaften, raffinierte Schwingungsdämpfung und innovative Detektorlayouts. Viele dieser am AEI entwickelten Methoden werden inzwischen im Rahmen der internationalen LIGO Scientific Collaboration weltweit an allen großen Gravitationswellen-Observatorien verwendet und erhöhen deren Empfindlichkeit signifikant.

Das spektakulärste Projekt zur Gravitationswellendetektion ist sicherlich LISA, die „Laser Interferometer Space Antenna“ – ein Gravitationswellen-Observatorium im Weltall. Das AEI ist die weltweit führende Forschungseinrichtung bei der Entwicklung des Projekts, das zwischen drei Satelliten Laserarme von Millionen Kilometern Länge aufspannen soll. Damit wird LISA empfindlich genug sein, um Gravitationswellensignale aus dem gesamten Universum – möglicherweise sogar vom Urknall – zu hören.

Beobachtungsbasierte Relativität und Kosmologie

Das weltweite Netz der erdgebundenen Gravitationswellen-Observatorien sammelt sehr große Datenmengen. In der Abteilung „Beobachtungsbasierte Relativität und Kosmologie“ forscht das größte auf die Analyse dieser Daten spezialisierte Team der internationalen Wissenschaftlergemeinschaft. Die Forschenden entwickeln und implementieren fortschrittliche und effiziente Methoden, um nach schwachen Gravitationswellen-Signalen in den Daten der LIGO-Detektoren zu suchen und diese anschließend zu charakterisieren. Mit diesen Verfahren gelang die erste Entdeckung einer Gravitationswelle im September 2015. Zusätzlich stellt der vom AEI betriebene Cluster „Atlas“ den Hauptteil der Rechenleistung für die Analyse dieser Daten zur Verfügung. Atlas verfügt über die enorme Rechenleistung von mehr als 14.000 CPU- und 1.000.000 GPU-Rechenkernen und ist damit der weltweit leistungsfähigste zur Gravitationswellen-Datenanalyse genutzte Cluster.

Die Wissenschaftler des AEI sind außerdem federführend am verteilten Rechenprojekt Einstein@Home beteiligt. Im Rahmen dieses weltweiten Projektes kann sich jeder Interessierte mit Hilfe seines PCs, Laptops oder Smartphones zuhause an der Suche nach bislang unbekanntem Neutronensternen beteiligen. Einstein@Home untersucht nicht nur die Daten von Gravitationswellen-Detektoren, sondern auch die von großen Radioteleskopen und vom Gamma-Satelliten Fermi. Mehr als 70 neue Neutronensterne wurden bereits in den Daten der Radioteleskope und des Fermi-Satelliten entdeckt.