

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

ist eine unabhängige gemeinnützige Forschungsorganisation. Sie unterhält rund 84 Max-Planck-Institute und Einrichtungen, welche im Dienst der Allgemeinheit Grundlagenforschung in den Natur-, Bio- und Geisteswissenschaften betreiben.

Insbesondere greift die Max-Planck-Gesellschaft neue, zukunftssträchtige 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-GES. 1927

## 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 ersten Beobachtungen der bisher dunklen Seiten unseres Universums durch Gravitationswellen haben 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*, *Astrophysikalische und Kosmologische Relativitätstheorie* sowie *Numerische und Relativistische Astrophysik*.

Die Abteilungen *Laserinterferometrie und Gravitationswellen-Astronomie* und *Beobachtungsbasierte Relativität und Kosmologie* befinden sich in Hannover.

### Kontakt

Potsdam  
Am Mühlenberg 1  
14476 Potsdam  
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](http://www.aei.mpg.de)

[einsteinathome.org](http://einsteinathome.org)

[www.lisamission.org](http://www.lisamission.org)

[www.geo600.org](http://www.geo600.org)



MAX-PLANCK-GES. 1927

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

## MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR GRAVITATIONSPHYSIK

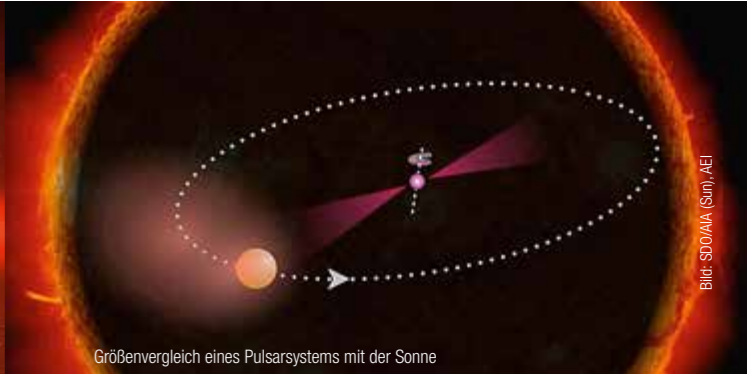
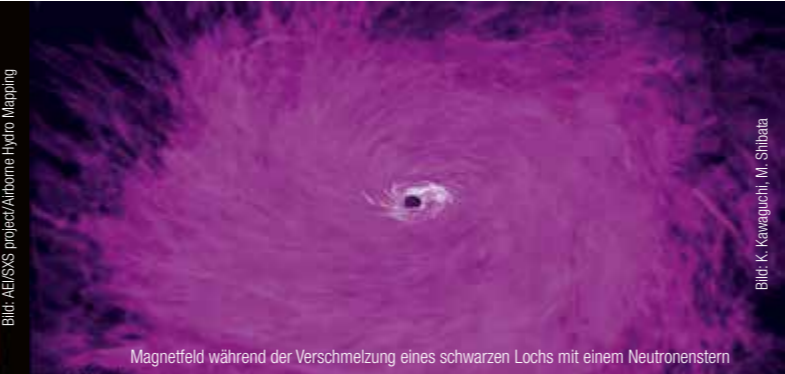
## ALBERT-EINSTEIN-INSTITUT



## 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 Forschungsgebiete unter einem Dach ist weltweit einzigartig. So arbeitet man u.a. an der Entwicklung einer Theorie, die Quantenfeldtheorie und Allgemeine Relativitätstheorie vereint. 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.

Bild: AEI



## Quantengravitation und Vereinheitlichte Theorien

Bereits in den 1970er Jahren hatten Physiker die Kräfte der Natur im sog. Standardmodell der Teilchenphysik vereinigt. 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. Aber wenn wir verstehen wollen, was im Inneren eines schwarzen Loches oder in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall „passiert“, muss dieser Widerspruch aufgelöst werden.

Gravitationsphysiker suchen deshalb nach einer neuen Theorie der Quantengravitation, die Quantentheorie und die Allgemeine Relativitätstheorie vereinigt. Die Hauptrichtungen der gegenwärtigen Forschung (u.a. kanonische Quantisierung, Supergravitation und Stringtheorie, nicht-perturbative Ansätze) sind alle in der Abteilung vertreten. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf neuartigen Ideen, welche die Schwierigkeiten der existierenden Ansätze überwinden könnten.

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

## Astrophysikalische und Kosmologische Relativitätstheorie

Die Beobachtung von Gravitationswellen verschmelzender schwarzer Löcher und Neutronensterne bietet die einzigartige Möglichkeit, Grundlagenphysik, dynamische Gravitation und Materie unter extremen Bedingungen zu untersuchen. Erfolgreiche Suchen, genaue Rückschlüsse auf astrophysikalische Eigenschaften und korrekte Identifizierung der Quellen erfordern detaillierte Kenntnis der erwarteten Signale. Forschende der Abteilung *Astrophysikalische und Kosmologische Relativitätstheorie* sagen genaue allgemein-relativistische Wellenmodelle von Doppelsternsystemen voraus. Dabei kombinieren sie schnell berechenbare Näherungslösungen mit genauen, aber zeitaufwändigen numerischen Simulationen auf Hochleistungsrechnern. Sie nutzen diese Schablonen, um Gravitationswellensignale zu finden, astrophysikalische und kosmologische Eigenschaften der Quellen abzuleiten und die Allgemeine Relativität im hochdynamischen Bereich starker Gravitationsfelder zu testen. Die hier entwickelten Wellenformmodelle wurden verwendet, um die von Advanced LIGO und Virgo beobachteten Gravitationswellen zu identifizieren und waren entscheidend für den Nachweis von GW151226, GW170806 und GW170817.

Wissenschaftler der Abteilung sind Mitglieder der LIGO Scientific Collaboration und der Laser Interferometer Space Antenna (LISA). Die Abteilung forscht auch an den theoretischen Grundlagen für die nächste Generation von Gravitationswellendetektoren auf der Erde.

## Numerische und Relativistische Astrophysik

2017 beobachteten Astronomen erstmals die Verschmelzung zweier Neutronensterne anhand von Gravitationswellen und elektromagnetischen Wellen. Damit begann die Multi-Messenger-Astronomie, die Gravitationswellen- und elektromagnetische Beobachtungen kombiniert. Im Zusammenspiel werden diese komplementären Methoden unser Verständnis extremer astrophysikalischer Ereignisse verbessern.

Der Schwerpunkt der Abteilung *Numerische und Relativistische Astrophysik* liegt auf numerisch-relativistischen Simulationen von kosmischen Ereignissen, bei denen Gravitationswellen entstehen. Dafür werden Einsteins Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie auf Hochleistungsrechnern gelöst. Diese Simulationen spielen eine entscheidende Rolle bei der Vorhersage genauer Gravitationswellenformen für die Suche in den Detektordaten und für die Untersuchung von energiereichen Phänomenen wie Gammastrahlenausbrüchen. Die Wissenschaftler untersuchen die Verschmelzungen von Doppelneutronensternen und gemischten Systemen aus einem schwarzen Loch und einem Neutronenstern, sowie stellaren Kernkollaps. Bei diesen Ereignissen entstehen schwarze Löcher. Sie untersuchen den Prozess während und nach der Verschmelzung und erforschen die Bedingungen, unter denen elektromagnetische Signale entstehen, wie sie bei der von Advanced LIGO und Virgo beobachteten Verschmelzung zweier Neutronensterne entdeckt wurden.

## Laserinterferometrie und Gravitationswellen-Astronomie

Wissenschaftler der Abteilung *Laserinterferometrie und Gravitationswellen-Astronomie* spielen eine weltweit führende Rolle bei der Entwicklung von modernsten Technologien für Gravitationswellen-Observatorien. Zusammen mit britischen Kollegen betreiben sie den Gravitationswellen-Detektor GEO600. Viele der Methoden, die zuerst am AEI eingesetzt wurden, werden nun in allen großen Observatorien der LIGO-Scientific- und der Virgo-Kollaborationen verwendet und haben deren Empfindlichkeit signifikant erhöht.

Das AEI ist die weltweit führende Forschungseinrichtung bei der Entwicklung der Laser Interferometer Space Antenna (LISA), des Gravitationswellen-Observatoriums im All, das im Jahr 2034 starten soll. LISA wird aus drei Satelliten bestehen, die Millionen Kilometer lange Laserarme aufspannen. Damit kann es Gravitationswellensignale aus dem gesamten Universum, möglicherweise sogar vom Urknall, nachweisen.

Die für Gravitationswellen-Detektoren entwickelte Laserinterferometrie wird nun auch zum Nutzen der Erde eingesetzt. Die deutsch-US-amerikanische GRACE-Follow-On-Mission wird durch Überwachung des irdischen Schwerefelds Änderungen der Wasservorräte unseres Planeten beobachten. Das AEI trägt auf deutscher Seite die Verantwortung für das Laser Ranging Interferometer an Bord von GRACE Follow-On.

## Beobachtungsbasierte Relativität und Kosmologie

Das weltweite Netz der irdischen Gravitationswellendetektoren sammelt große Datenmengen. Forscher der Abteilung *Beobachtungsbasierte Relativität und Kosmologie* sind das weltweit größte Team der Wissenschaftsgemeinschaft, das sich auf die Datenanalyse spezialisiert hat. Sie entwickeln und implementieren fortschrittlichste Methoden, um in den Datenströmen der LIGO- und Virgo-Detektoren nach schwachen Gravitationswellensignalen zu suchen und diese anschließend zu charakterisieren. Diese Verfahren ermöglichten die erste Entdeckung von Gravitationswellen im September 2015; Mitglieder der Gruppe waren unter den ersten, die dieses Signal und die späteren GW170104 und GW170608 identifizierten. Der Großteil der weltweiten Rechenressourcen zur Analyse dieser Daten wird am AEI durch den Computercluster Atlas bereitgestellt, der aus mehr als 42.000 CPU-Kernen und 1.000.000 GPU-Kernen besteht.

Die Abteilung spielt außerdem eine führende Rolle beim verteilten freiwilligen Rechenprojekt Einstein@Home. Freiwillige aus aller Welt nehmen an der Suche nach unbekanntem Neutronensternen teil, indem sie Rechenzeit auf ihren PCs, Laptops oder Smartphones bereitstellen. Einstein@Home sucht nach Neutronensternen in Daten von Gravitationswellen-Detektoren, vom Gamma-Satelliten Fermi und von großen Radioteleskopen. Mehr als 70 neue Neutronensterne sind so in den Radio- und Gammadaten entdeckt worden.