



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

GEO 600

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik

GEO600 ist ein Horchposten ins All, der Gravitationswellen messen und ganz neue Einblicke ins Universum ermöglichen wird! Gravitationswellen wurden schon 1915 von Albert Einstein vorausgesagt. Sie kündigen von Sternexplosionen, vom Zusammenprall Schwarzer Löcher und sogar vom Urknall selbst. Der experimentelle Nachweis und die Analyse von Gravitationswellen gehören heute zu den größten Herausforderungen der modernen Physik. Da ihre Frequenzen im Hörbereich liegen, werden Physiker und Mathematiker hoffentlich schon bald das Brummeln und Pfeifen des Universums hörbar machen!

Ein Laser-Ohr für das Konzert des Kosmos

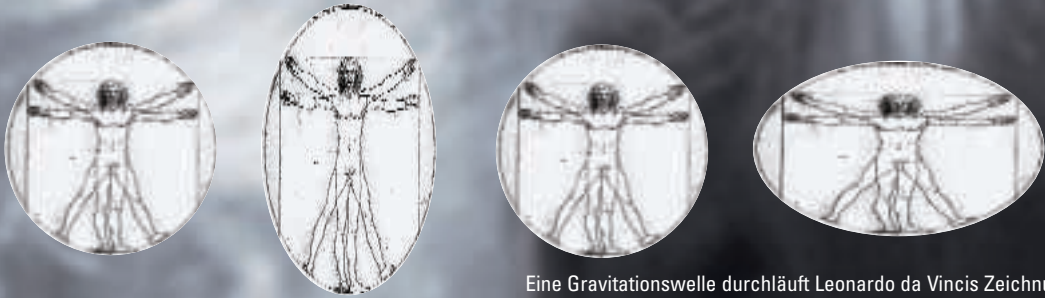
Der Gravitationswellendetektor GEO600 besteht, scheinbar unspektakulär, aus zwei 600 Meter langen im Boden vergrabenen Rohren. In ihnen verbirgt sich hochmoderne Lasertechnik! Betrieben wird GEO600 vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut), gemeinsam mit der Universität Hannover und britischen Forschern von den Universitäten Cardiff und Glasgow in der Nähe von Hannover. Weltweit gehen derzeit vier Gravitationswellendetektoren als Lauscher bei diesem kosmischen Konzert in Betrieb. Für 2011 ist ein Detektor im Weltraum geplant. Auch an dieser Entwicklung ist das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik federführend beteiligt.



GEO600, der Gravitationswellendetektor in Ruthe bei Hannover.

Mit der Allgemeinen Relativitätstheorie entwarf Albert Einstein 1915 ein völlig neues Bild von unserer Welt. Die Schwerkraft (Gravitation) ist bei ihm keine Kraft mehr wie noch bei Newton, sondern eine Eigenschaft der Geometrie von Raum und Zeit. Große Massen – z.B. Sterne und Galaxien – erzeugen gewissermaßen Dellen in der Raumzeit. Bewegen sich andere Sterne durch solche Gebiete, werden sie von ihrer ursprünglichen Bahn abgelenkt und scheinbar von der großen Masse angezogen. Tatsächlich folgen sie aber der von der Verformung bestimmten Bahn. Wenn die Massen sich bewegen, dann breiten sich die erzeugten Störungen im Raumzeitgefüge mit Lichtgeschwindigkeit nach allen Seiten aus. Diese Gravitationswellen stauchen und dehnen abwechselnd den Raum – die Abstände zwischen den im Raum enthaltenen Objekten ändern sich.

Dellen in der Raumzeit



Eine Gravitationswelle durchläuft Leonardo da Vincis Zeichnung.

Allerdings sind diese Abstandsänderungen winzig: Selbst bei einem sehr kraftvollen und nahen Ereignis wie einer Sternenexplosion in der Nähe unserer Milchstraße verändert die entstehende Gravitationswelle den Abstand zwischen Erde und Sonne nur um den Durchmesser eines Wasserstoffatoms – und das auch nur für wenige tausendstel Sekunden. Für kürzere Messstrecken ist die Wirkung entsprechend kleiner: eine einen Kilometer lange Messstrecke ändert sich nur um ein tausendstel des Durchmessers eines Protons. Diesen Effekt wollen die Physiker mit GEO600 messen. Eine große Herausforderung besteht darin, die vielen Störquellen, die ein Signal verdecken würden, auszuschalten. Dazu gehören z.B. Luftdruck- und Temperaturschwankungen sowie Bodenschütterungen aller Art.



Einstein selbst glaubte nicht daran, dass man Gravitationswellen je werde beobachten können, zu schwach seien die Kräuselungen der Raumzeit. Ein erster, allerdings indirekter Nachweis, gelang den amerikanischen Astronomen Russell Hulse und Joseph Taylor: Sie hatten über Jahre ein Binärsystem aus einem Neutronenstern und einem Pulsar beobachtet und bewiesen, dass die beiden umeinander kreisenden Sterne Energie durch die Abstrahlung von Gravitationswellen verlieren und der beobachtete Energieverlust genau dem nach der Allgemeinen Relativitätstheorie berechneten Wert entspricht. Dafür erhielten sie 1993 den Nobelpreis für Physik. Jetzt, knapp 100 Jahre nach Einsteins Prognose, rückt dank immer empfindlicherer Messgeräte und Auswertungsmöglichkeiten auch der direkte Nachweis von Gravitationswellen in greifbare Nähe.

Laserinterferometer zur Messung kleinster Längenänderungen



Bei GEO600 werden die winzigen Längenänderungen mit Hilfe eines Laser-Interferometers gemessen. Ein halbdurchlässiger Spiegel teilt den einfallenden Laserstrahl; die beiden senkrecht zueinander verlaufenden Teilstrahlen durchlaufen die Messstrecken, werden reflektiert und auf einem Photodetektor überlagert. Da das Interferometer so eingestellt ist, dass die beiden Lichtwellen im Gegentakt schwingen, löschen sie sich gegenseitig aus; der Ausgang des Interferometers bleibt dunkel. Verändert eine Gravitationswelle die Länge der beiden Messstrecken, so kommen die Teilstrahlen außer Takt und löschen sich nicht mehr vollständig aus; am Ausgang erscheint ein Signal.



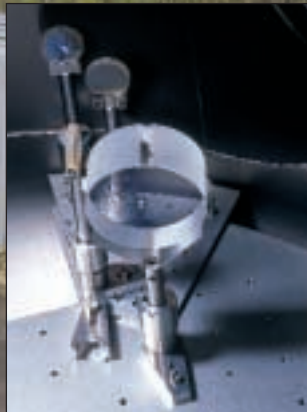
Um Störungen durch Luftdruckschwankungen auszuschließen, verläuft der Laserstrahl in einem evakuierten Rohr. Die 600 m langen Vakuumrohre sind in einem Graben aufgehängt.

Von außen sieht der Gravitationswellendetektor höchst spartanisch aus: zu sehen sind provisorisch anmutende Containergebäude und zwei mit Wellblech abgedeckte Gräben. Da GEO600 mit einem Budget von nur 6 Mio. Euro auskommen muss – einem Zehntel der üblichen Summe, konzentriert man sich hier auf das Wesentliche. Mit innovativen Ideen, viel Eigenbau und der begeisterten Mitarbeit von Studenten und Doktoranden entstand in einfacher Hülle ein physikalisches Großexperiment ersten Ranges. Die bisher verfügbaren Technologien wurden an ihre

Hightech unterm Wellblechdach



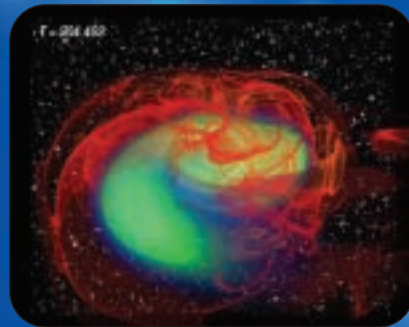
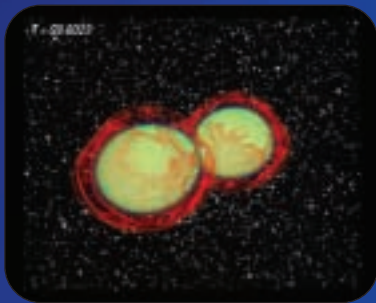
Grenzen getrieben und weiterentwickelt: Laserstabilisierung, absorptionsfreie Optik, Regelungstechnik, Schwingungsdämpfung und Datenverarbeitung erhielten durch die GEO600-Wissenschaftler ganz neue Impulse. Eine Spezialität ist beispielsweise die Verstärkung von Laserlicht und Signal („Duales Recycling“): Durch zusätzliche Spiegel werden sowohl Laserlicht als auch Signal jeweils mehrfach konstruktiv mit sich selbst überlagert und so verstärkt. Zu den wegweisenden Entwicklungen von GEO600 gehört außerdem die Aufhängung der Spiegel an Glasfasern.



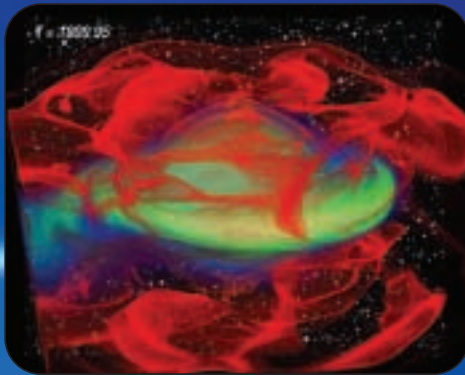
Der deutsch-britische Detektor ist auch Ideenschmiede und Versuchslabor für die technischen Verbesserungen, die für die nächste Generation von Gravitationswellendetektoren benötigt werden!

GEO600 ist ein völlig neuartiges Teleskop. Bisher versuchte man vor allem mit der Licht- und Radiowellenastronomie den Geheimnissen des Universums auf die Spur zu kommen. Weite Teile blieben der Beobachtung jedoch verborgen, weil sie von Dunkelwolken verdeckt werden oder aus nicht-leuchtender Materie bestehen – sie sind weder für Licht- noch für Radiowellen durchlässig. Gravitationswellen dagegen durchdringen solche Wolken ungehindert. Sie werden uns daher genaue Informationen über die Verteilung von Neutronensternen und Schwarzen Löchern im Universum sowie über den detaillierten Ablauf von kosmischen Katastrophen wie einer Sternexplosion (Supernova) oder dem Zusammensturz und Verschmelzen zweier Sterne liefern können.

Ein Horchposten ins All



GEO600 ist Teil eines weltweiten Verbundes von Gravitationswellendetektoren. In den USA werden zwei Anlagen gebaut (LIGO), je eine weitere in Italien (VIRGO) und Japan (TAMA300). Die Vernetzung der Detektoren hat einen doppelten Sinn: Wird eine Gravitationswelle gemessen, kann man erst bei der gleichzeitigen Messung durch einen weit entfernten Detektor sicher sein, nicht lokalen Störungen aufgefressen zu sein. Um darüber hinaus Informationen über die Position der Quelle sowie Zeitstruktur und Schwingungsrichtung der Wellen zu erhalten, braucht man wenigstens vier Detektoren. Alle Projekte haben deshalb einen Datenaustausch vereinbart.

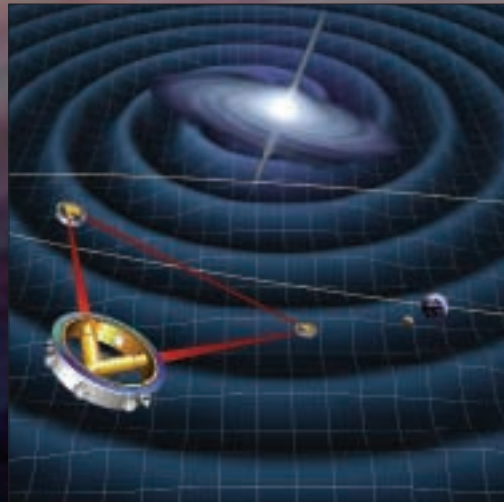


Woher aber wissen die Wissenschaftler, nach welchen Signalen sie im Datenwald suchen müssen? Das Interferometer ist schließlich so empfindlich, dass es auch Ebbe und Flut, weit entfernte Erdbeben oder einen in der Nähe vorbeifahrenden ICE aufzeichnet. Die Wissenschaftler versuchen die Entstehung von Gravitationswellen zu ergründen, indem sie z.B. Kollisionen von Schwarzen Löchern und Neutronensternen auf Supercomputern simulieren. Diese Simulationen liefern Erkenntnisse über die mögliche Form der Signale, die GEO600 beim Durchgang einer Gravitationswelle aufzeichnen würde. So kann in den Detektordaten gezielt nach Signalen gesucht werden.

Wegen des störenden Einflusses der Bodenerschütterungen wird man den Frequenzbereich unterhalb von 1 Hertz auf der Erde wohl nie beobachten können. Dabei senden einige der spektakulärsten Quellen von Gravitationswellen, wie superschwere Schwarze Löcher mit Millionen von Sonnenmassen, Signale im Millihertzbereich aus. Sie haben also Wellenlängen von einigen Millionen Kilometern. Entsprechend große Empfänger lassen sich auf der Erde nicht bauen, wohl aber im Weltraum: dort hat man beliebig viel Platz, außerdem ein ideales Vakuum und keine seismischen Störungen. Ein Interferometer im All ist das Ziel der LISA-Mission, deren Start ESA und NASA gemeinsam für 2011 planen.

LISA: Ein Weltraumdetektor für das Echo des Urknalls

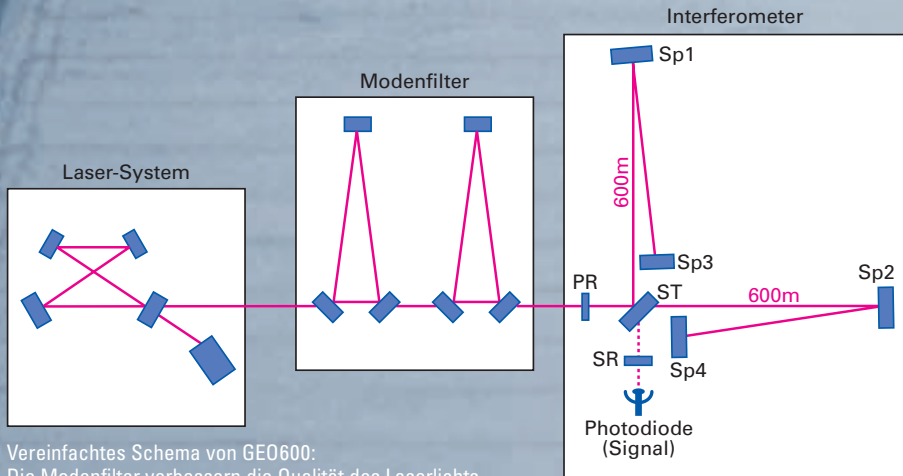
LISA besteht aus einer Anordnung von drei identischen Satelliten, die in Form eines gleichseitigen Dreiecks hinter der Erde entlang der Erdbahn um die Sonne kreisen. Die Satelliten bilden zusammen ein Laserinterferometer mit fünf Millionen Kilometern Armlänge. LISA wird Gravitationswellen von superschweren Schwarzen Löchern im gesamten Universum aufspüren können und vielleicht sogar diejenigen Wellen, die vom Urknall her stammen, der spektakulärsten Quelle von Schwerkraftwellen überhaupt. Der Nachhall dieses Ereignisses sollte nämlich immer noch zu hören sein, da Gravitationswellen praktisch ungeschwächt durch Materie laufen. Die Messung dieses Gravitationswellenhintergrundes könnte uns Aufschluss über die Geburt des Universums geben.



Das spektakulärste Projekt zur Gravitationswellendetektion ist „LISA“, die Laser Interferometer Space Antenna der ESA und der NASA – ein Detektor im Weltall, dessen Laserarme 5 Millionen km lang sein werden. LISA wird das größte je von Menschenhand geschaffene Gebilde sein und vielleicht sogar empfindlich genug, das Echo des Urknalls zu hören!

Vakuumrohr:	2 x 600 m Länge, 60 cm Durchmesser, 0.8 mm Dicke
Vakuum:	Druck $< 10^{-8}$ mbar
Laser:	diodengepumpter Nd:YAG-Laser bei 1064 nm
Laserleistung:	10 W Ausgangsleistung (Einmodenbetrieb)
Leistungsverstärkung:	bis 10 kW
Signalverstärkung:	bis zu 100fach
Optik:	Super-Quarzglaspiegel mit 25 cm Durchmesser
Frequenzbereich:	50 Hz bis 2 kHz, Bandbreite 60 Hz bis 1 kHz
Relative Empfindlichkeit:	10^{-21} für pulsförmige Signale

GEO600: Technische Daten



Vereinfachtes Schema von GEO600:

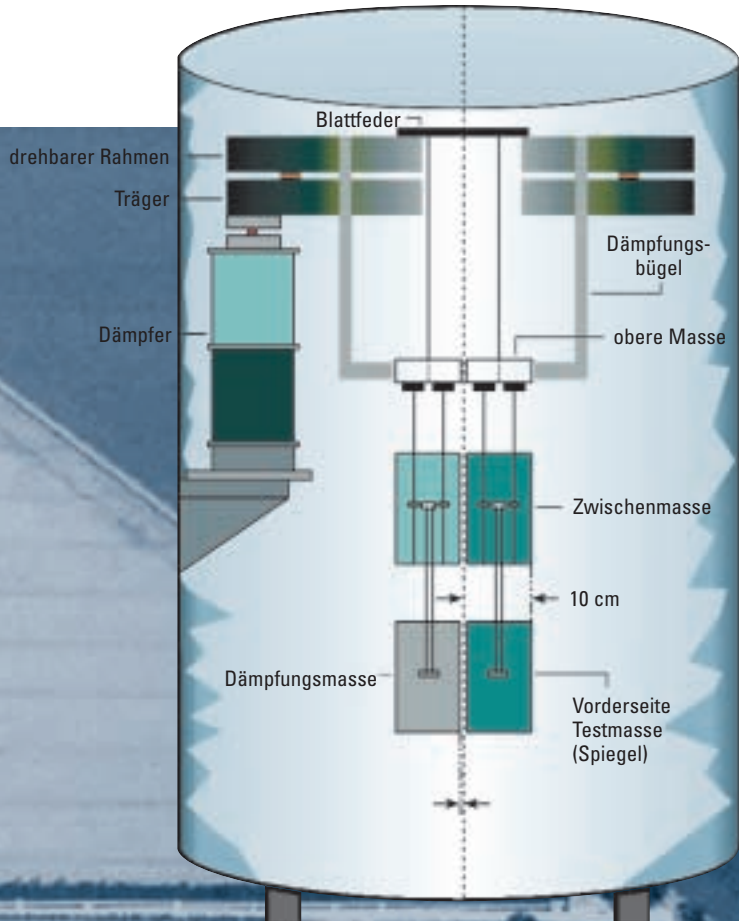
Die Modenfilter verbessern die Qualität des Laserlichts.

ST = Strahlteiler; Sp1 und Sp2 = Spiegel am Ende der Messstrecken;

Sp3 und Sp4 = Spiegel zur Verlängerung der Messstrecken;

PR und SR = Spiegel zur Verstärkung von Laserleistung und Signal.

Die Endspiegel von GEO600 werden durch aktive Schwingungsdämpfer und durch eine dreistufige Pendelaufhängung von seismischen Störungen isoliert. Der Querschnitt durch den Vakuumtank zeigt links nur einen der drei versetzt angebrachten Schwingungsdämpfer.



Das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) hat sich seit seiner Gründung 1995 als international führendes Forschungszentrum für Gravitationsphysik etabliert. Hier erforschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler das gesamte Spektrum der Allgemeinen Relativitätstheorie, z.B. widmen sie sich der Entwicklung einer Theorie, die Quantenfeldtheorie und Allgemeine Relativitätstheorie vereint. Die Erforschung von Gravitationswellen, Schwarzen Löchern und der numerischen Lösung von Einsteins Gleichungen ist ein weiteres Arbeitsgebiet. Um den enormen theoretischen Schwierigkeiten der Relativitätsforschung zu begegnen, werden neue mathematische Methoden entwickelt. Schwerpunkt der experimentellen Arbeit ist die Entwicklung von Gravitationswellendetektoren auf der Erde und im Weltraum.

Das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik



Die Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. ist eine unabhängige gemeinnützige Forschungsorganisation. Sie unterhält 80 Max-Planck-Institute, 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 auf wichtigen Forschungsbereichen auf ideale Weise.

Die Max-Planck-Gesellschaft



MAX-PLANCK-GESellschaft

Die Mittel der Max-Planck-Gesellschaft werden zu 95% von Bund und Ländern bereitgestellt, die restlichen 5% setzen sich aus Mitgliedsbeiträgen, Spenden und aus eigenen Einnahmen zusammen. Das Gesamtbudget für das Jahr 2001 betrug rund 1.252,6 Mio. Euro.

80 Max-Planck-Institute, Forschungsstellen, Laboratorien und Arbeitsgruppen beschäftigen ungefähr 11.000 Mitarbeiter, davon etwa 3.200 Wissenschaftler. Hinzu kommen mehr als 7.600 Doktoranden, Postdoktoranden, Gastwissenschaftler und Stipendiaten aus aller Welt.

So finden Sie uns

Von Hannover aus: B6 (Messeschnellweg) nach Süden, bei „Sarstedt/Heisede“ rechts ab. Rechts abbiegen nach Heisede, dann bei „Schulenburg/Ruthe“ links ab. In Ruthe rechts abbiegen. Nach dem Überqueren der Leine bei „Universität Hannover/Versuchsgelände“ bzw. „Schäferberg“ rechts ab. Die Baumschule entlang bis ganz zum Ende des Zaunes.

Öffentlicher Nahverkehr: bis Sarstedt Stadtbahn Linie 1, dann Bus 2232 bis Ruthe/Mitte; Str. „Schäferberg“ 15 min zu Fuß.



Wir danken für die Unterstützung des Projekts GEO600:
 Bundesministerium für Bildung und Forschung
 Land Niedersachsen
 Max-Planck-Gesellschaft
 Particle Physics and Astronomy Research Council (PPARC), Großbritannien
 VolkswagenStiftung

Leiter

Prof. Dr. Karsten Danzmann,
 Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik und
 Universität Hannover
 Prof. Dr. James Hough, University of Glasgow
 Prof. Dr. Bernard Schutz, Max-Planck-Institut
 für Gravitationsphysik

Beteiligte Institutionen

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik
 (Albert-Einstein-Institut),
 Golm b. Potsdam und Hannover
 Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching
 Universität Hannover
 University of Glasgow
 Cardiff University

Impressum

Herausgeber: MPI für Gravitationsphysik
 Konzeption + Text: MPI für Gravitationsphysik +
 MildeMarketing
 Grafik: MildeMarketing + vitamin.a
 Druck: Christian & Cornelius Rüss

Anschrift

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik
 (Albert-Einstein-Institut)
 Callinstraße 38
 D-30167 Hannover
 Tel.: +49-511-762-22 29
 Fax: +49-511-762-27 84

In Golm bei Potsdam:
 Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik
 (Albert-Einstein-Institut)
 Am Mühlenberg 1
 D-14476 Golm
 Tel.: +49-331-5 67 73 03
 Fax: +49-331-5 67 72 98

Besichtigungen des Detektors

Vorangemeldete Gruppen können GEO600
 besichtigen.
 Kontakt: Dr. Peter Aufmuth
 Tel.: +49-511-762-23 86
 Fax: +49-511-762-27 84



Was sind Gravitationswellen und wieso konnte man sie bislang nicht nachweisen?

Was erzählen uns Gravitationswellen über unser Universum?

Nachweis und Analyse von Gravitationswellen gehören zu den größten Herausforderungen der modernen Physik. Das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) widmet sich diesem Forschungsgebiet und betreibt gemeinsam mit der Universität Hannover und britischen Forschern der Universitäten Cardiff und Glasgow den Gravitationswellendetektor GEO600 in der Nähe von Hannover.

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

<http://www.amps.uni-hannover.de>

<http://www.aei.mpg.de>

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

<http://sci.esa.int/home/lisa/>

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