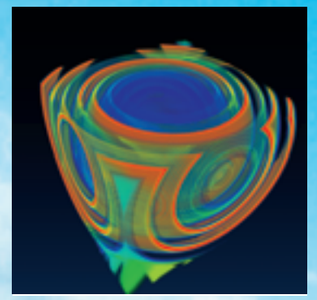
Kollisionen, die im Raum Wellen schlagen



Theoretikern am **Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut)** *in Golm bei Potsdam ist es gelungen, Form und Intensität von Gravitationswellen zu berechnen, die zwei miteinander verschmelzende Schwarze Löcher abstrahlen. Diese Ergebnisse sind von entscheidender Bedeutung für den Erfolg des deutsch-britischen Gravitationswellen-Detektors GEO 600 mit Standort Hannover, der kürzlich seinen ersten Test bestanden hat. Mit ihm wollen Physiker erstmals die von Einstein vorhergesagten Gravitationswellen nachweisen.*

Der Standort von GEO 600 in Ruthe bei Hannover. Nur eine unscheinbare Hütte zeugt von der Hightech-Anlage.

Ende Oktober schlugen im kleinen Ort Ruthe bei Hannover die Herzen des Teams um Karsten Danzmann vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik höher. Zum ersten Mal schickten die Physiker einen Laserstrahl in ihren Gravitationswellendetektor. Mit Lichtgeschwindigkeit traf der Strahl zunächst auf ein optisches Element, das ihn aufspaltete und in zwei senkrecht zueinander stehende Richtungen umlenkte. Anschließend wurden die beiden Teilstrahlen an mehreren Spiegeln reflektiert und in einem Punkt wieder zusammengeführt. Das war alles. Vier Tage lang lief das Experiment unverändert, ohne dass etwas passierte. Genau das hatte das Team erhofft, denn es zeigte:

Fotos: MPI für Gravitationsphysik - Bender / GEO 600

GEO 600 funktioniert. Was sich wenig spektakulär anhört, ist das Ergebnis jahrelanger Studien, neuer Entwicklungen und aufwändiger Experimente (siehe auch MaxPlanck Forschung 3/1999, S. 14f.). Ziel der Anstrengungen ist es, erstmals die von Einstein vorausgesagten Gravitationswellen zu messen.

Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie lässt sich die Schwerkraft einer Materieansammlung, wie eines Sterns oder Planeten, als Raumkrümmung beschreiben. Man kann sich dies an einer Billardkugel veranschaulichen, die auf einem Gummituch liegt und es eindellt. Gerät ein anderer Körper in diese Mulde hinein, wird er scheinbar von der Kugel angezogen und rollt auf sie zu. Bewegt sich nun ein Himmelskörper beschleunigt, so strahlt er Gravitationswellen ab: Die Raumkrümmung dehnt sich wellenförmig in alle Richtungen aus. Analog hieße das, auf dem Gummituch würden Wellen vom Ort der Kugel fortlaufen.

Einstein selbst glaubte nicht daran, dass man „seine“ Gravitationswellen je werde nachweisen können. Heute ist der Traum in greifbare Nähe gerückt, wenn auch nur für die extremsten Vorgänge im Universum. Ein Zahlenbeispiel soll dies verdeutlichen: Die Erde strahlt bei ihrem Umlauf um die Sonne Gravitationswellen mit einer Leistung von 200 Watt ab, Jupiter bringt es immerhin schon auf 5300 Watt. Das sind jedoch äußerst bescheidene Werte im Vergleich zu den wahren Größen im Universum. Zwei kompakte Neutronensterne beispielsweise, die sich im Abstand von hundert Kilometern mit einer Periode von einer hundertstel Sekunde umkreisen, erzeugen eine Leistung von 10^{45} Watt. In dieser Größenordnung liegt auch die in Form von Gravitationswellen abgestrahlte Leistung bei der Explosion eines massereichen Sterns, einer Supernova. Das sind die Ereignisse, auf die es die Gravitationsphysiker abgesehen haben.

Der Nachweis funktioniert nach folgendem Prinzip: Gravitationswellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raum aus. Wo sie auftauchen, wird der Raum für den Bruchteil einer Sekunde gestaucht und gedehnt und nimmt dann wieder seine ursprüngliche Form an. Diese kurzzeitige Raumverzerrung wollen die Forscher mit Laser-Interferometern wie GEO 600 messen. Herz einer solchen Anlage ist ein sehr stabiler, leistungsstarker Laser. Dessen Strahl wird an einem halb durchlässigen Spiegel in zwei Strahlen aufgespalten, die nach links und rechts voneinander wegstreben. Am Ende der beiden Laufstrecken hängt jeweils ein Spiegel, der das Licht zurückreflektiert. Die beiden Strahlen gelangen erneut auf den halb durchlässigen Spiegel, der sie so umlenkt, dass sie in einem gemeinsamen Punkt zusammentreffen und sich überlagern. In diesem Punkt erzeugen die Strahlen ein so genanntes Interferenzmuster, dessen Helligkeit ein Instrument misst.

Warten auf ein kurzes Flimmern

So lange die Anordnung ungestört ist, leuchtet das Interferenzmuster unverändert. Rauscht aber eine Gravitationswelle über sie hinweg, wird der Raum in kurzem zeitlichen Abstand in den beiden Armen des Interferometers gestaucht und gedehnt. In diesem Moment durchlaufen die beiden Laserstrahlen nicht mehr einen ebenen, sondern einen verbogenen Raum – so wie ein Schiff bei Sturm über hohe Wellen kreuzen muss. Das hat zur Folge, dass diese Strahlen einen etwas längeren beziehungsweise kürzeren Weg zurücklegen als zuvor. Und das äußert sich in dem Interferenzmuster als kurzes Flimmern.

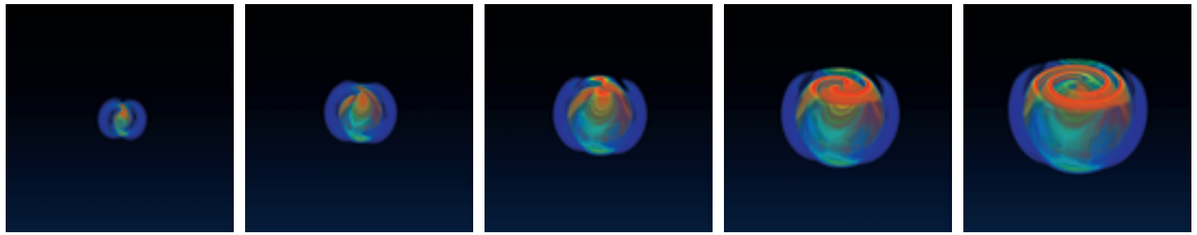
Was sich im Prinzip einfach anhört, liegt an der Grenze des technisch Machbaren. Läuft der Laserstrahl über eine Distanz von einem Kilometer, so verändert eine Gravitationswelle diese Strecke lediglich um den milliardstel Teil eines Atomdurchmessers, der seinerseits nur einen zehnmillionstel Millimeter misst. Ein unglaubliches Unterfangen. Doch jetzt wollen die Forscher damit beginnen. Ein einzelner Gravitationswellendetektor wäre jedoch noch nicht aussagekräftig genug. Zum einen lässt sich mit ihm eine Quelle am Himmel nicht lokalisieren. Zum anderen wäre ein Flimmern im Interferenzmuster noch kein Beweis für den Durchgang einer Gravitationswelle. Es könnte auch Folge einer Störung sein.

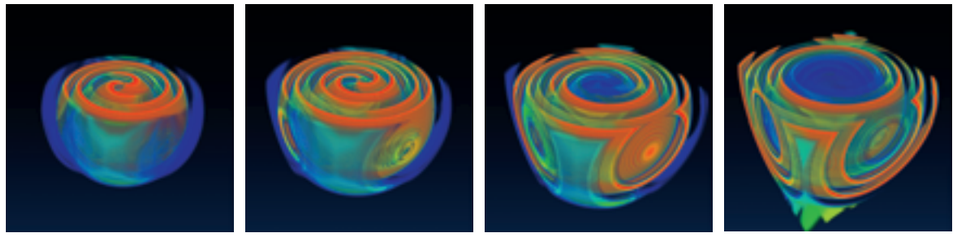
Aus diesem Grund entstehen derzeit neben GEO 600 weltweit noch weitere Instrumente dieser Art. Kurz vor dem ersten Testlauf steht das amerikanische LIGO mit zwei Anlagen jeweils in Hanford und Livingston (USA). Jedes dieser Interferometer verfügt über vier Kilometer lange Arme. In der Nähe von Pisa entsteht derzeit VIRGO mit drei Kilometer langen Armen. Es wird erst in zwei bis drei Jahren fertig sein. Schließlich läuft bereits ein 300-Meter-Interferometer mit Namen TAMA im japanischen Mitaka. Es ist jedoch nicht empfindlich genug, um wirklich astronomische Quellen nachweisen zu können und dient vornehmlich dem Test neuer technischer Komponenten.

GEO 600 besitzt zwei jeweils 600 Meter lange, komplett evakuierte Röhren und wird letztlich mit den weltbesten optischen Komponenten bestückt sein. Es wird gemeinsam mit LIGO die Pionierarbeit leisten. „Vom 28. Dezember an wollen wir den ersten Koinzidenztest mit VIRGO versuchen“, sagt Karsten Danzmann. Etwa zwei Wochen lang sollen die Anlagen dann laufen. So will man erst einmal studieren, wie sie auf Umwelteinflüsse – wie Sonnenausbrüche oder kosmische Strahlungsteilchen – reagieren. Die erzeugen zwar keine Gravitationswellen, können aber eventuell in beiden Anlagen die empfindliche Elektronik stören und ein Gravitationssignal vortäuschen. Außerdem wollen die Physiker eine Vielzahl von Software-Paketen testen, die nach unterschiedlichen kosmischen Gravitationssignalen suchen. ►

Eine der 600 Meter langen Röhren. Sie sind gegen äußere Erschütterungen schwingungsgedämpft aufgehängt.

Computersimulationen am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik zeigen die Schwingungsform einer Gravitationswelle, die beim Verschmelzen von zwei Schwarzen Löchern mit zusammen zehn Sonnenmassen entsteht.





Gravitationswellen rasen in dieser Computersimulation nach dem Zusammenprall zweier Schwarzer Löcher auf die Erde zu. Die Wellen entstehen nahe dem Zentrum der Kollision und breiten sich schalenartig aus.

LIGO und GEO 600 gehören der Ligo Science Collaboration an, was bedeutet, dass die Forscher von beiden Anlagen stets auf alle Daten zugreifen können. Später wird auch VIRGO zu der Kollaboration gehören, und alle vier Anlagen werden wie ein globales Gravitationswellen-Observatorium behandelt. Erst wenn diese Geräte etwa zur selben Zeit ein Signal registrieren, ist eine Gravitationswelle als Auslöser wahrscheinlich. Vier Instrumente haben darüber hinaus den Vorteil, dass man mit ihnen auch grob feststellen kann, aus welcher Richtung die Welle gekommen ist. Die Methode funktioniert ähnlich wie die Landvermessung, bei der man einen Punkt von verschiedenen Orten aus anpeilt. Nach dem Probelauf Anfang 2002 werden die Daten ausgewertet und die vorläufigen optischen Elemente in GEO 600 gegen die endgültigen ausgetauscht. Den regelmäßigen Beobachtungsbetrieb sollen die Anlagen in Deutschland und den USA dann schließlich gegen Ende 2002 aufnehmen.

Die astronomische Interpretation der erhofften Messsignale wird ganz wesentlich von der Qualität theoretischer Modelle abhängen. In dieser Hinsicht hat eine Gruppe junger Physiker am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut, AEI) in Golm bei Potsdam bereits hervorragende Arbeit geleistet. Das Lazarus-Team, wie sich die Wissenschaftler nennen, hat die Form und Intensität von Gravitationswellen berechnet, die entstehen, wenn zwei Schwarze Löcher miteinander verschmelzen. Ein solcher Vorgang hat eine längere Vorgeschichte. Ausgangspunkt sind zwei massereiche Sterne, die einander umkreisen. Wenn sie ihren Brennstoff verbraucht haben, sprengen sie ihre äußeren Hüllen ins All ab und erstrahlen als Supernova. Ihre Kernbereiche aber brechen zu Schwarzen Löchern zusammen. Diese umkreisen sich nach wie vor. Sie strahlen aber Gravitationswellen ab, wodurch sie Bewegungsenergie verlieren und sich einander langsam annähern. Schließlich berühren sie sich und verschmelzen innerhalb des Bruchteils einer Sekunde miteinander. Bei diesem kosmischen Crash werden rund drei Prozent der Masse der Schwarzen Löcher in Energie von Gravitationswellen umgewandelt.

Schwarze Löcher im Computer

Obwohl dies das gewaltigste nur denkbare Ereignis im Universum ist, bleibt es gänzlich unsichtbar, denn es werden weder Licht noch Radiowellen oder Röntgenwellen abgestrahlt. Einzig Gravitationswellen zeugen davon. Die Simulationen sind daher unumgänglich, wenn man von dem gemessenen Signal auf die Natur der Quellen schließen will. Früher simulierte Kollisionen Schwarzer Löcher konnten jedoch nicht den gesamten Verschmelzungsprozess zeigen. Es trat grundsätzlich das Problem auf, gleichzeitig die abgestrahlten Wellen und das Innere des Schwarzen Lochs zu modellieren. Den entscheidenden Fortschritt erzielte das Potsdamer Team, indem es zwei Methoden miteinander kombinierte: die volle numerische Simulation für den Zusammenstoß und eine Näherungsmethode aus der Störungstheorie zur Berechnung der Strahlung, die das entstehende Schwarze Loch abgibt.

Die Ergebnisse der Golmer Forscher können ihren Kollegen bei GEO 600 Mut machen. Demnach sind die Gravitationswellen nämlich deutlicher stärker als bislang vermutet. Günstig ist auch der Frequenzbereich. „Zwei Schwarze Löcher, die zusammen 35-mal schwerer sind als die Sonne, strahlen Gravitationswellen mit einer Frequenz zwischen 600 und 900 Hertz ab“, erklärt Bernd Brügmann, ein Mitglied des Lazarus-Teams. Dieses Frequenzband liegt genau im Messbereich von GEO 600 und den anderen Detektoren.

Zwar sind Zusammenstöße von Schwarzen Löchern extrem selten. Die Fachleute vermuten, dass sich ein solches Ereignis in einer Galaxie wie unserer Milchstraße nur etwa alle 100.000 Jahre einmal ereignet. Aber es schlägt sprichwörtlich so hohe Wellen, dass es sich noch bis in Entfernungen von mehreren hundert Millionen Lichtjahren nachweisen lässt. Da sich in diesem Umkreis um die Erde sehr viele Galaxien befinden, rechnen die Astrophysiker damit, alle zwei Jahre die Kollision von zwei Schwarzen Löchern registrieren zu können.

„Die Achse Golm-Hannover funktioniert ganz hervorragend“, resümiert Danzmann. Und am 1. Januar 2002 wurden die Experimentatoren und die Theoretiker auch verwaltungstechnisch zusammengeführt. Dann hat das AEI offiziell zwei Standorte in Golm und Hannover; bis dahin gehörte die Hannoveraner Außenstelle offiziell zum Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München (vgl. Seite 109 dieser Ausgabe).

Neben verschmelzenden Schwarzen Löchern wollen die Forscher vor allem noch zwei andere Arten von Ereignissen nachweisen. Zum einen Supernovae. In einer Galaxie wie der Milchstraße explodieren pro Jahrhundert etwa zwei oder drei „schwere“ Sterne. Wenn man ein solches Ereignis aber wie erhofft noch bis in Entfernungen von einigen zehn Millionen Lichtjahren nachweisen kann, so sollte man pro Jahr mehrere Ereignisse dieser Art registrieren. Noch attraktiver sind möglicherweise verschmelzende Neutronensterne. Das sind sehr kompakte Sternüberreste mit Durchmessern von etwa 20 Kilometern, deren Materie so dicht gepackt ist, dass ein Teelöffel davon auf der Erde eine Milliarde Tonnen wöge. Wenn sie sich umkreisen und ähnlich wie die Schwarzen Löcher miteinander verschmelzen, werden ebenfalls sehr starke Gravitationswellen frei. Auch von diesen Ereignissen könnte man vielleicht eines pro Jahr registrieren.

Mit der Entdeckung von Gravitationswellen würden die Astrophysiker ein gänzlich neues Beobachtungsfenster zum Universum öffnen. „Darüber hinaus wäre der Nachweis auch ein Meilenstein für Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie“, sagt Bernard Schutz, Direktor am AEI in Golm. Denn Gravitationswellen gehören zu den wenigen von der Relativitätstheorie vorhergesagten Phänomen, die sich bislang nicht nachweisen ließen. Thomas Bührke