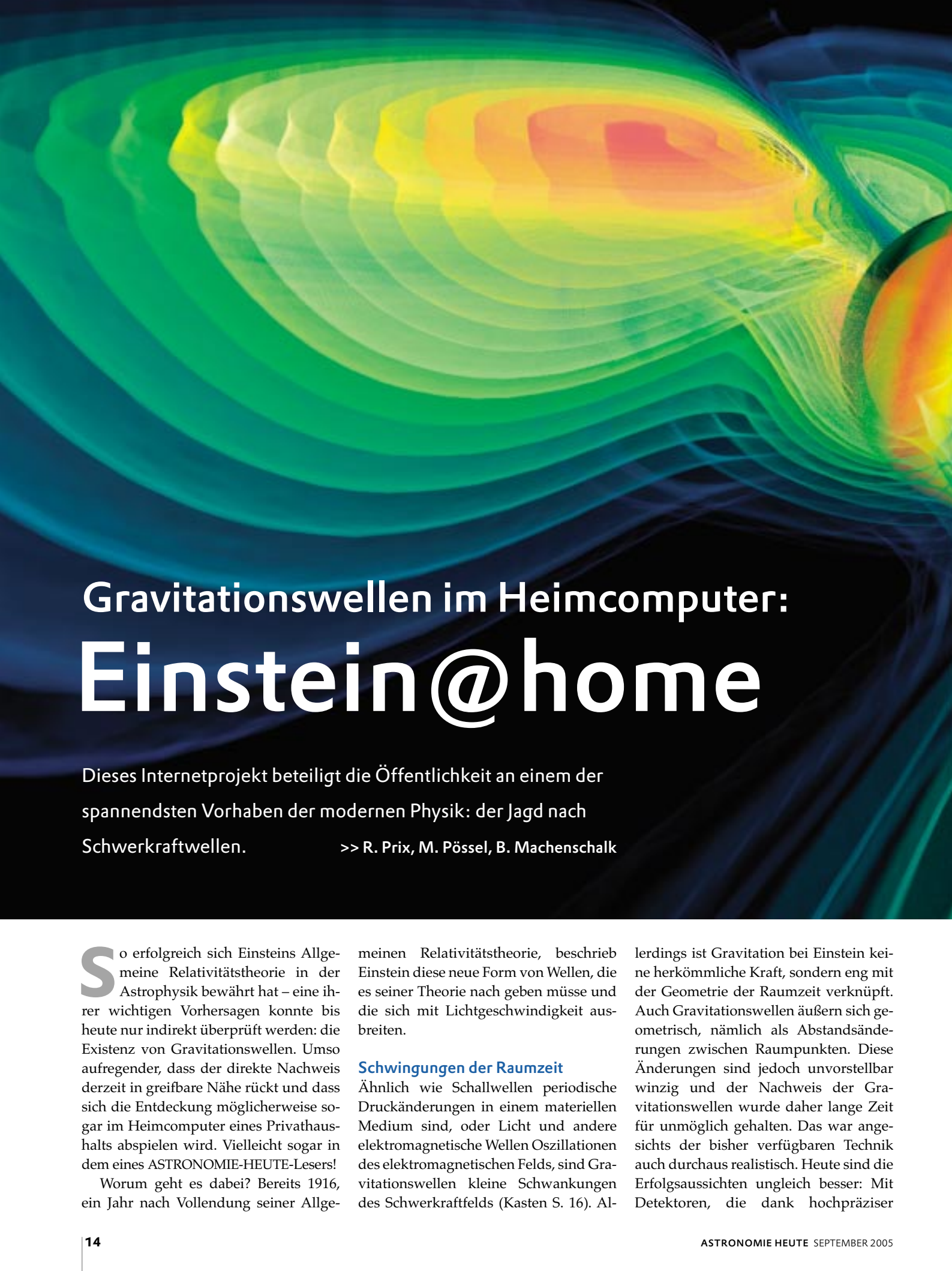




Gravitationswellen im Heimcomputer: Einstein@home

Dieses Internetprojekt beteiligt die Öffentlichkeit an einem der spannendsten Vorhaben der modernen Physik: der Jagd nach Schwerkraftwellen.

>> R. Prix, M. Pössel, B. Machenschalk

So erfolgreich sich Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie in der Astrophysik bewährt hat – eine ihrer wichtigen Vorhersagen konnte bis heute nur indirekt überprüft werden: die Existenz von Gravitationswellen. Umso aufregender, dass der direkte Nachweis derzeit in greifbare Nähe rückt und dass sich die Entdeckung möglicherweise sogar im Heimcomputer eines Privathaushalts abspielen wird. Vielleicht sogar in dem eines ASTRONOMIE-HEUTE-Lesers!

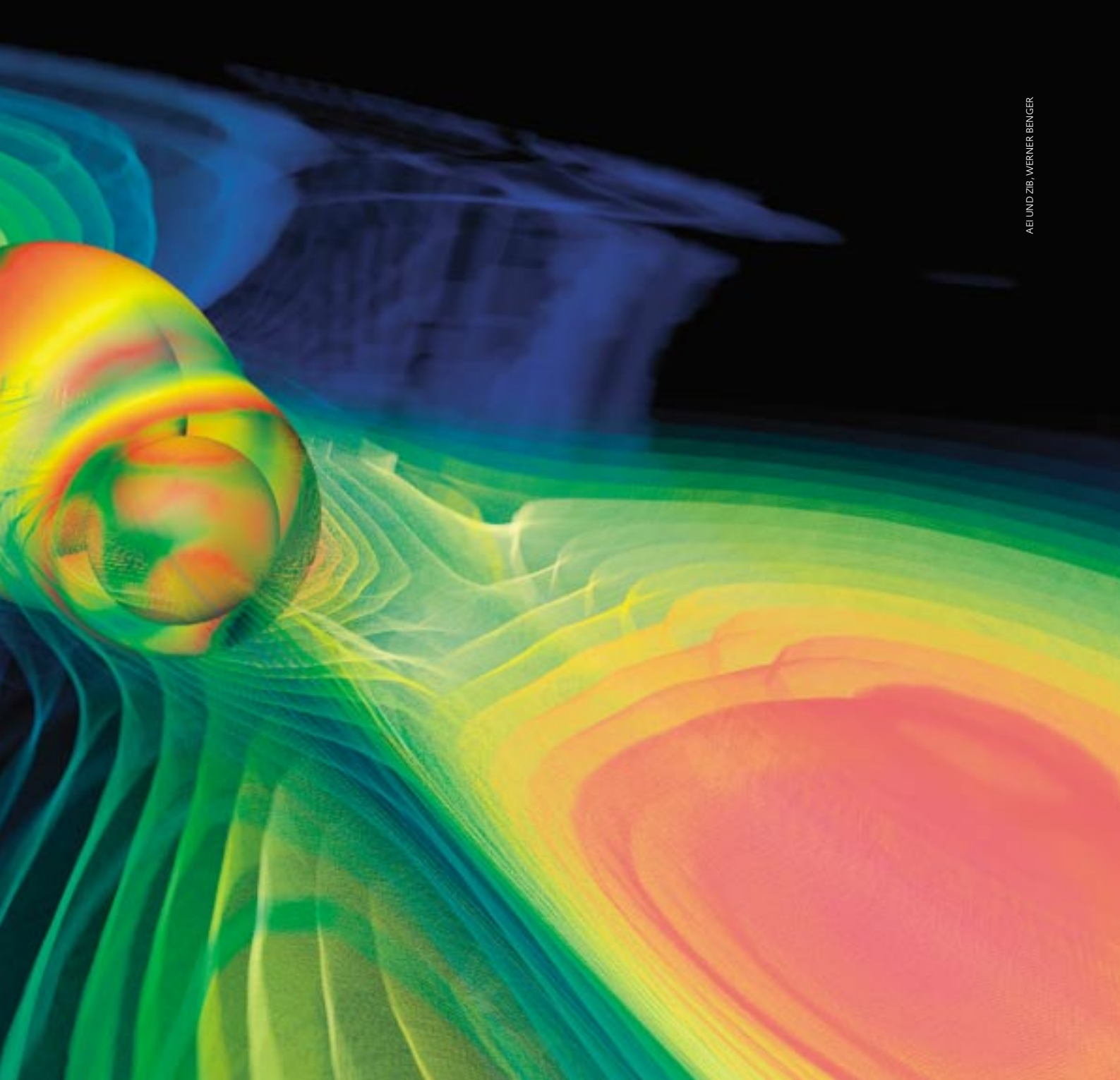
Worum geht es dabei? Bereits 1916, ein Jahr nach Vollendung seiner Allge-

meinen Relativitätstheorie, beschrieb Einstein diese neue Form von Wellen, die es seiner Theorie nach geben müsse und die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Schwingungen der Raumzeit

Ähnlich wie Schallwellen periodische Druckänderungen in einem materiellen Medium sind, oder Licht und andere elektromagnetische Wellen Oszillationen des elektromagnetischen Felds, sind Gravitationswellen kleine Schwankungen des Schwerkraftfelds (Kasten S. 16). Al-

lerdings ist Gravitation bei Einstein keine herkömmliche Kraft, sondern eng mit der Geometrie der Raumzeit verknüpft. Auch Gravitationswellen äußern sich geometrisch, nämlich als Abstandsänderungen zwischen Raumpunkten. Diese Änderungen sind jedoch unvorstellbar winzig und der Nachweis der Gravitationswellen wurde daher lange Zeit für unmöglich gehalten. Das war angesichts der bisher verfügbaren Technik auch durchaus realistisch. Heute sind die Erfolgsaussichten ungleich besser: Mit Detektoren, die dank hochpräziser



Überlagerung von Laserstrahlen winzigste Abstandsänderungen zu messen im Stande sind, hoffen Forscher, Gravitationswellen in den nächsten Jahren direkt nachweisen zu können.

Der Wellenjagd sind mehrere internationale Großprojekte gewidmet, wie die deutsch-britische Anlage Geo-600 in der Nähe von Hannover (Foto S. 17) und die zwei Ligo-Detektoren in den USA. Sie sind seit rund drei Jahren in Betrieb und nehmen fleißig Messdaten auf. Zwei andere solche Interferometer befinden sich in Italien (Projekt Virgo) und Japan (Ta-

ma) und weitere Anlagen sind in Planung oder werden gerade gebaut.

Die benötigte Empfindlichkeit der Detektoren ist enorm. Denn selbst die Wellen der effektivsten Quellen im Universum, etwa von schnell umeinander kreisenden, kleinen, aber massereichen Objekten wie Neutronensternen und Schwarzen Löchern, sind extrem schwach, wenn sie die Erde erreichen.

Die stärksten zu erwartenden Wellen würden die vier Kilometer Abstand zwischen den Spiegeln der Ligo-Interferometer nur um einen milliardstel Milli-

Zwei Schwarze Löcher in der Todesspirale

zeigt diese Computersimulation. Die Farbabstufungen machen deutlich, in welche Richtungen die Gravitationswellen abgestrahlt werden.

ardstelmeter verändern, also um das Tausendstel eines Atomkerndurchmessers. Das alleine macht das Vorhaben schon fast unmöglich. Doch es kommt noch schlimmer: Denn selbst für die besten heutigen Detektoren ist ein Gravita- >



AEI, MARKUS PÖSSEL

> tionswellensignal nur eine Nadel im Heuhaufen gegenüber den verschiedenen Störeinflüssen, denen das Experiment ständig ausgesetzt ist. Und derer gibt es viele – angefangen von Erschütterungen durch die an die Hunderte von Kilometern entfernte Küste schlagenden Nordseewellen bis zu den Gravitationsfeldern vorbeifahrender Lastwagen. Entscheidend für den Nachweis sind daher computergestützte Auswertungen, bei

denen die Messdaten nach charakteristischen Spuren von Gravitationswellen durchforstet werden. Diese Suche ist freilich äußerst rechenaufwändig.

Ein Paradebeispiel dafür sind die Gravitationswellen, die von rotierenden Neutronensternen abgestrahlt werden, wenn diese nicht vollkommen rotations-symmetrisch sind und etwa leichte Beulen aufweisen. Einige dieser Neutronensterne sind den Astronomen schon lange

Der Merlin-Cluster aus 180 PCs wird von der Rechenleistung Einstein@homes übertroffen. Machenschalk und Prix zeigen dessen Bildschirmschoner.

als Pulsare bekannt. Ihre Gravitationswellen sind äußerst regelmäßig, es sind Sinuswellen mit der doppelten Frequenz der Sternrotation. Trotz der einfachen Form dieses Signals ist jedoch gerade bei

Wellen aus Schwerkraft?

Von Radio- bis Gammastrahlungswellen, das ganze elektromagnetische Spektrum wird erzeugt, wenn Ladungen – meist sind es Elektronen – beschleunigt werden. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie besagt, dass es einen vergleichbaren Effekt gibt, wenn Massen in bestimmter Weise beschleunigt werden, beispielsweise wenn

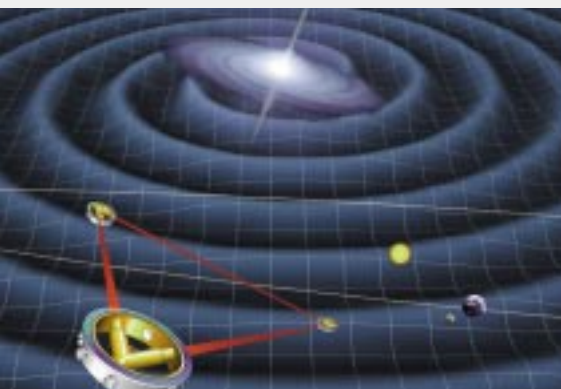
Körper umeinander kreisen oder ein Stern asymmetrisch in sich zusammenfällt. Dann werden »Geometriestörungen« abgestrahlt: Gravitationswellen. Sie bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit fort und verraten sich durch systematische Abstandsänderungen der Teilchen, über die sie hinwegfegen.

Am ehesten sieht man ihren Einfluss, wenn auf diese Teilchen keine weiteren Kräfte wirken. Dann bewirkt der Durchgang der Welle, dass sich alle Teilchenabstände in einer Richtung verkleinern und sich gleichzeitig senkrecht dazu vergrößern. Wenig später kehrt sich das Spiel um, die gestauchten Abstände werden nun gestreckt und um-

gekehrt. Stauch- und Streckphasen folgen aufeinander so regelmäßig wie die Berge und Täler einer einfachen Wasserwelle.

Statt Teilchen verwenden die Forscher Spiegel, deren gegenseitige Abstandsänderungen durch Gravitationswellen kosmischer Ereignisse mit Laserstrahlen geprüft werden. Dieses Laserlicht läuft durch die beiden Arme einer Anlage, die von oben die Form eines gleichseitigen Ls hat (Foto oben rechts), wird an den Spiegeln reflektiert und läuft wieder zurück. Am Scheitelpunkt werden die Strahlen überlagert, also zur Interferenz gebracht. Bleiben die Längen der beiden Arme gleich, ergibt sich immer das exakte Interferenzmuster am Scheitelpunkt. Läuft jedoch eine Gravitationswelle durch und staucht den einen Arm und streckt den anderen, verändert sich das Signal.

So sollen die heutigen Detektoren beispielsweise sich umkreisenden Neutronen-



NASA/JPL

Auf Haaresbreite genau müssen die drei Satelliten des Lisa-Experiments ihre Abstände einhalten (Schemazeichnung, nicht maßstabsgetreu).



AEI / U. HANNOVER, MATHIAS SCHREMPPEL

diesen Objekten der Suchaufwand enorm. Da es sich dabei um besonders schwache Signale handelt, sind lange Beobachtungszeiten nötig um sicher sein zu können, ob die Detektordaten ein solches Signal enthalten – umso länger, je weiter die Quelle von uns weg ist. Für einen erfolgreichen Nachweis mit den heutigen Detektoren muss mindestens einige Monate beobachtet werden. Das führt zur nächsten Schwierigkeit, denn wäh-

sternpaaren, Supernova-Explosionen und verschmelzenden Schwarzen Löchern auf die Spur kommen.

Das gemeinsame europäisch-amerikanische Projekt Lisa will allen irdischen Störeinflüssen entfliehen: bis 2013 soll der Gravitationswellendetektor einsatzbereit sein – im Weltraum. Lisa besteht aus drei Satelliten, die in Dreiecksformation hinter der Erde her fliegen (Illustration links). Jede Seite des Dreiecks ist fünf Millionen Kilometer lang – das ist der dreizehnfache Abstand von der Erde zum Mond. Damit können die Wellen von verschmelzenden supermassereichen Schwarzen Löchern mit einigen Millionen oder gar Milliarden Sonnenmassen in fernen Galaxien nachgewiesen werden, aber beispielsweise auch Signale aus der Frühzeit unseres Universums, Sekundenbruchteile nach dem Urknall.

rend dieses Zeitraums rotiert die Erde – damit auch der Detektor – und läuft um die Sonne. Diese Bewegung der Messanlage verursacht einen Doppler-Effekt wie beim Martinshorn eines vorbeifahrenden Polizeiautos, wodurch sich die Frequenz des Wellensignals rot- oder blauverschiebt. Für die Suche nach bislang unbekannten Neutronensternen bedeutet das: Es reicht nicht, in den Daten nach sinusförmigen Gravitationswellensignalen verschiedener konstanter Frequenzen zu suchen. Für jede Position der Quelle am Himmel ist das Muster auf Grund von Erdbewegung und Doppler-Effekt ein wenig anders.

Gravitationsstecknadel im Störsignalheuhaufen

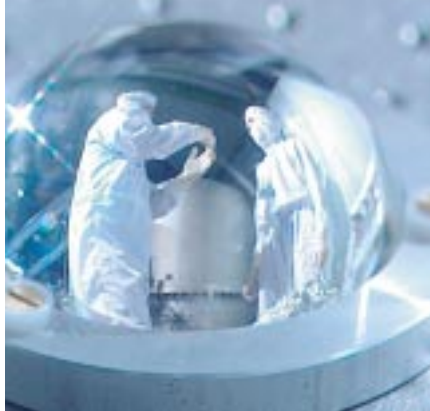
Dazu kommt auch noch, dass die Rotation der Neutronensterne mit der Zeit langsamer wird – wobei wir nie im Voraus wissen, wie schnell die Abbremsung ist –, daher ergibt sich insgesamt eine Vielzahl von möglichen Mustern, die selbst die leistungsfähigsten Computer nicht bewältigen können. Ob wir Gravitationswellen unbekannter Neutronensterne aufspüren, steht und fällt also hauptsächlich mit einem einzigen Faktor: der verfügbaren Rechenleistung.

Allerdings hat die Suche nach Myriaden Mustern auch eine positive Eigenschaft: Sie lässt sich problemlos auf verschiedene Computer verteilen, von de-

L wie Laserinterferometer

Das deutsch-britische Geo-600-Experiment ist in Ruthe, nahe Hannover, angesiedelt. Sein Name leitet sich von den 600 Meter langen Lichtlaufstrecken ab.

nen jeder nur einen kleinen Teil der Musterliste abarbeitet. Das genau ist die Idee hinter Einstein@home: verteiltes Rechnen. Weltweit stehen in Firmen und Privathaushalten Millionen Computer, deren Rechenkapazität oft bei Weitem nicht ausgelastet ist. Wer die »Freizeit« dieser Computer nutzt, gewinnt ein enormes Rechenpotenzial, das alle Supercomputer des Planeten in den Schatten stellt. Diese geniale Idee stammt von den Mitarbeitern des Seti-Projekts, der Suche nach Radiosignalen außerirdischer Intelligenzen. Sie haben mit Seti@home das Prinzip, Aufgaben auf viele Privatrechner zu verteilen, erstmals praktisch umgesetzt (AH September 2004, S. 73). Einstein@home nutzt die von den Seti-Kollegen entwickelte Software, die frei verfügbare Bibliothek Boinc, verbindet sie mit den Suchalgorithmen für die Signale rotierender Neutronensterne und lässt so freiwillige Teilnehmer an der Durchkämmung des Datenwirrwarrs mithelfen (AH Mai 2005, S. 59). Wenn der Computer eines Teilnehmers gerade nicht genutzt wird, läuft das Suchpro- >



BEIDE FOTOS: AEI / MILDEMARKETING / EXOZET



Spieglein, Spieglein an der Wand

Zwei Wissenschaftler sind, während sie den Detektor montieren, in einem der Umlenkspiegel zu sehen (links). Das Herzstück der Anlage ist der Strahlteiler, ein halbdurchlässiger Spiegel (rechts). Die Laserstrahlen sind nachträglich eingezeichnet.

> gramm als Bildschirmschoner (Foto S. 16) und analysiert dabei Daten von den Ligo- und Geo-Detektoren. Die Ergebnisse werden an einen der Forschungs-Server zurückgesendet und neue Arbeit wird automatisch heruntergeladen. Ein Punktesystem schafft zusätzliche Anreize: Einzelne Benutzer und Gruppen können anhand einer Rangliste sehen, wie viel sie persönlich zur Suche nach den Gravitationswellen beigetragen haben.

Entwickelt wurde die Einstein@home-Software an der Universität Wisconsin-Milwaukee (UWM) in den USA und am Max-Planck-Institut für Gravitations-

physik (Albert-Einstein-Institut, AEI) in Potsdam. Das Projekt ist Teil einer Initiative der American Physical Society zum Weltjahr der Physik 2005.

Suche mit 50 Teraflops

Die Resonanz ist bereits jetzt enorm: Seit dem Startschuss am 19. Februar dieses Jahres haben sich über 80 000 Benutzer mit mehr als 100 000 Computern angemeldet und täglich kommen einige hundert Nutzer dazu. Damit ist die Rechenleistung von Einstein@home mit rund fünfzig Billionen Rechenoperationen pro Sekunde (50 Teraflops) heute schon mit

den jeweiligen Leistungen der zehn weltbesten Supercomputer vergleichbar. Die Forschergruppe arbeitet jetzt daran, die Suchstrategien für diese gigantische Rechenleistungen weiter zu optimieren, um so die Wahrscheinlichkeit für einen Treffer zu erhöhen. So wird Einstein@home schon bald zum empfindlichsten und leistungsfähigsten Instrument zur Suche nach Gravitationswellen von Neutronensternen werden – und könnte dabei den ersten direkten Nachweis von Gravitationswellen überhaupt liefern! Dies wäre gleichzeitig die erste wirkliche Entdeckung mit Hilfe des verteilten Rechnens und Projektleiter Bruce Allen, Physikprofessor an der UWM, wäre nicht überrascht, wenn sie mit einem Nobelpreis ausgezeichnet würde.

Ziel ist letztendlich aber nicht nur dieser Nachweis und damit eine weitere Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie. Vielmehr hoffen die Physiker, durch die Messung von Gravitationswellen wichtige Lücken im Wissen über Neutronensterne, ihren inneren Aufbau und die Eigenschaften der Materie schließen zu können. Dies ist nur ein Beispiel für einen ganz neuen Zweig der Astrophysik – die Gravitationswellenastronomie als neues Fenster zum Universum. <<

Ein heißer Kandidat: J0806

Doppel- und Mehrfachsternsysteme enthalten zusammen die Mehrheit aller Sonnen in der Milchstraße. Meist sind die Sterne jedoch noch ausgedehnt und die Umlaufzeiten lang.

Nicht so das 1994 vom deutschen Röntgensatelliten Rosat entdeckte Doppelsternsystem RX J0806.3+1527, das aus zwei Weißen Zwergen besteht. Der Abstand der beiden nicht viel mehr als erdgroßen, aber sonnenschweren Himmelskörper beträgt nur etwa 80 000 Kilometer – ein Fünftel Entfernung von der Erde zum Mond.

Sie rasen mit Bahngeschwindigkeiten von über einer Million Kilometern pro Stunde einmal in fünfeinhalb Minuten umeinander, damit hat J0806 vermutlich den engsten Orbit aller bekannten Doppelsys-

teme, wie Beobachtungen Ende der 1990er Jahre mit großen europäischen Teleskopen in Chile und auf der Kanareninsel La Palma ergeben haben.

Neue Daten, die der US-Röntgensatellit Chandra gesammelt hat, lassen erwarten, dass das Zwergpaar derzeit stärkere Gravitationswellen produziert als jedes andere Objekt in der Galaxis (schematische Illustration). Denn die Bewegungsenergie von J0806 nimmt messbar ab: Pro Jahr verringert sich die Dauer eines Umlaufs um etwa eine tausendstel Sekunde. Das ist genau der Betrag, den die Relativitätstheorie für die Energie der abgestrahlten Gravitationswellen vorhersagt.

Bislang haben die Forscher diese Gravitationswellen noch nicht direkt gemessen, die bestehenden Anlagen am Erdboden sind aber auf Empfang. Für die geplante Weltraummission Lisa (Kasten S. 16) dürfte J0806 eines der ersten Untersuchungsobjekte sein. >> dre

Tödlicher Bolero

Die beiden Zwergsterne umrunden sich in 321,5 Sekunden. Jeden Tag kommen sie sich fast einen Meter näher und werden immer schneller. Das schlägt mächtige Wellen im Raumzeitgefüge (Grafik).



KIP S. THORNE, CALTECH / NASA, GSFC, T. CARNAHAN

Die Physiker **Reinhard Prix** und **Markus Pössel** sowie der Informatiker **Bernd Machenschalk** forschen und arbeiten am Albert-Einstein-Institut in Potsdam. Sie haben Einstein@home mitentwickelt und sind gespannt auf die erste Gravitationswelle.

Einstein@home Anmeldung und Download der Software: <http://einstein.phys.uwm.edu> Empfohlene Systemvoraussetzungen: Breitband-Internetanschluss. Betriebssystem: GNU/Linux, Mac OS X 10.3, Windows 98. Prozessorleistung: Pentium II (300 MHz) oder höher. RAM: 70 MB. Freier Plattenspeicher: 100 MB.

Weblink:

www.einstein-online.info