

Einsteins Wellen

Albert Einstein sagte die Existenz von Gravitationswellen voraus. Jetzt wurden diese erstmals auf der Erde nachgewiesen. Der Theoretische Physiker Philippe Jetzer möchte sie nun auch im Weltall messen. Von Stefan Stöcklin

Der 3. Dezember 2015 ist einer der schönsten Tage im Leben des Physikers Philippe Jetzer. Punkt vier Minuten nach ein Uhr hebt eine Vega-Rakete in den Nachthimmel von Französisch Guyana ab und transportiert LISA Pathfinder in den Weltraum. Der Satellit an Bord soll die Technik zum Nachweis von Gravitationswellen im Weltraum testen. Als Mitglied des wissenschaftlichen Komitees ist Philippe Jetzer einer der massgebenden Köpfe und Wegbereiter des 400 Millionen Euro teuren Pionierprojekts. Gut zehn Kilometer vom Abschussort entfernt in Südamerika beobachtet der Theoretische Physiker den Raketenstart und durchlebt denkwürdige Momente. «Es war überwältigend, einerseits die Freude über den geglückten Start, andererseits die Vorfreude auf die geplanten Experimente und Daten.»

Nun sitzt der Wissenschaftler in seinem Büro auf dem Campus Irchel der UZH und sinniert über das Projekt. Für viele Menschen sind Gravitationswellen erst seit dem 11. Februar dieses Jahres ein Thema. An diesem Tag haben Forschende in den USA bekannt gegeben, dass sie mit dem Observatorium LIGO ihre Existenz auf der Erde gemessen haben. Die Meldung schlägt hohe Wellen, denn erstmals ist eine direkte Messung gelungen.

Philippe Jetzer beschäftigt sich seit Jahren mit Gravitationswellen und bleibt etwas nüchterner. Sein Blick wandert zum lebensgrossen Porträt von Albert Einstein an der Rückseite seiner Bürotüre. Vor hundert Jahren hat das Physikgenie die Existenz dieser Wellen aufgrund der Allgemeinen Relativitätstheorie vorausgesagt. «An der Existenz dieser Wellen gezweifelt hat niemand, weil bereits indirekte Beweise vorliegen», sagt Jetzer. «Einstein war sich aber nicht sicher, ob der Effekt für eine Messung überhaupt gross genug ist», so der Physiker. «Jetzt wissen wir, dass der

experimentelle Nachweis möglich ist.» Gravitationswellen entstehen bei der Beschleunigung massiver Körper kosmischen Ausmasses. Ihre Bewegung beeinflusst das Raum-Zeit-Kontinuum und pflanzt sich als Welle im Universum fort. So, wie ein Kieselstein, der auf eine Wasseroberfläche fällt, konzentrische Wellen hervorruft, bewegen sich Gravitationswellen mit Lichtgeschwindigkeit durchs Universum.

Im Vergleich mit anderen physikalischen Kräften wie dem Elektromagnetismus oder der starken Wechselwirkung zwischen subatomaren Teil-

GRAVITATIONSWELLEN

Botschaften aus dem All

Gravitationswellen entstehen durch kosmische Ereignisse wie die Fusionen Schwarzer Löcher. Sie tragen die Kunde dieser Ereignisse durchs All – vom Beginn des Universums bis heute.

chen ist die Gravitationskraft allerdings schwach. Die daraus resultierenden Gravitationswellen haben verschwindend kleine Effekte. Eine durchschnittliche Gravitationswelle, ausgelöst durch ein kosmisches Ereignis wie die Fusion zweier Schwarzer Löcher, verändert den Erddurchmesser um weniger als die Grösse eines Protons, das heisst den Kern eines Wasserstoffatoms.

Gespiegelte Laserstrahlen

Seit Albert Einsteins Prognose brüten Heerschaaren von Physikern über Möglichkeiten, diesen Hauch eines Effekts zu messen. Schliesslich entwickelten die Forscher Experimente basierend auf der Laserinterferometrie: Dabei werden zwei Laserstrahlen senkrecht zueinander auf Spiegel gelenkt. Feinste Veränderungen der Laufstrecke durch eine passierende Gravitationswelle, die

den Raum für einen kurzen Moment verändern, bewirken charakteristische Interferenzmuster der gespiegelten Strahlen. Auf dieser Technologie basieren die erfolgreichen Messungen durch LIGO, dem Laser-Interferometrie-Gravitations-Observatorium in Hanford (Washington) und Livingston (Louisiana), die im Februar veröffentlicht wurden. Messgeräte registrierten diese Signale bereits im September 2015.

Weil längere Gravitationsinterferometer empfindlicher sind und unterschiedliche Frequenzen messen, dachten die Physiker schon bald daran, ein Observatorium im Weltall zu installieren. Während die Spiegel von LIGO vier Kilometer entfernt von der Laserquelle aufgestellt sind, können sie im All in Abständen von Millionen von Kilometern platziert werden. Darüber hinaus ist die Anordnung im Universum nicht den Erschütterungen ausgesetzt, vor denen die Anlagen auf der Erde mit aufwendigen Technologien geschützt werden müssen.

Philippe Jetzer kramt in seinen Unterlagen und zieht einen älteren Bericht der Europäischen Raumagentur ESA aus dem Jahr 1996 hervor. «LISA – Laser Interferometer Space Antenna for the Detection of Gravitational Waves», heisst es darauf. Das gelbe Dokument ist eine alte Skizze für das Projekt, dessen erste Etappe – zwanzig Jahre später – endlich realisiert wird. «Gravitationswellen und ihr Nachweis haben mich schon immer fasziniert», sagt Jetzer mit Blick auf den Bericht und versorgt das Dokument wie eine liebgewordene Reliquie. Zum Job als wissenschaftlicher Berater von LISA Pathfinder kam er aber erst auf Umwegen. Zuerst nimmt ihn die Teilchenphysik im Cern, danach die Astrophysik gefangen.

Verborgene Sterne suchen

Gemeinsamer Nenner dieser verschiedenen Disziplinen, die sich mit den denkbar kleinsten subatomaren Teilchen und den grösstmöglichen Strukturen im Universum befassen, ist die Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins. Nach seinem Physikstudium an der ETH Zürich konzen-

trierete sich Philippe Jetzer auf die Theorien des Physikers, der von 1909 bis 1911 als Professor an der UZH gelehrt hatte. Wie viele Forscher beschäftigt er sich mit Einsteins umfassenden Arbeiten, die genügend Material für Generationen von Wissenschaftlern hergeben. Ein zentrales Thema in den 1980er-Jahren waren subatomare Teilchen, die in den Beschleunigermaschinen etwa im Cern oder Fermilab in den USA nach und nach entdeckt wurden. Die Theoretiker suchten nach einer vereinheitlichenden Theorie dazu.

Jetzers Fokus wechselte mit seinen Forschungsaufenthalten langsam von exotischen Quarks und Bosonen zu Dunkler Materie und zum Weltall. Mit dem Mikrolinsen-Effekt, einem Spezialfall von Gravitationslinsen, suchte Jetzer in unserer Milchstrasse und der benachbarten Andromedagalaxie nach verborgenen Sternen und Dunkler Materie. Sein Ruf als Einstein-Experte ist längst etabliert, als ihn 2003 Domenico Giardini von der ETH Zürich kontaktiert. Der Seismologe Giardini war zusammen mit dem Ingenieur Peter Zweifel auf der Suche nach einem Spezialisten für die Allgemeine Relativitätstheorie. Die Kollegen brauchten wissenschaftliche Unterstützung, um sich am Gravitationswellenprojekt der ESA mit LISA Pathfinder beteiligen zu können. Jetzer musste nicht lange überlegen. Das Telefongespräch markierte den Beginn eines neuen Abschnitts seines Forscherlebens: der intensiven Beschäftigung mit Gravitationswellen. «Ein alter Traum ging in Erfüllung», sagt Philippe Jetzer rückblickend.

LISA Pathfinder ist die Nagelprobe für die «evolved» eLISA-Mission. In diesem Projekt soll in rund zwanzig Jahren ein riesiges Interferometer mit drei Satelliten aufgebaut werden, die je eine Million Kilometer voneinander entfernt im All um die Sonne kreisen. Zuerst aber muss der Testlauf mit dem Pathfinder erfolgreich absolviert werden. Der Satellit befindet sich unterdessen am Bestimmungsort im All, 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt. In seinem Innern schweben in einer hantelähnlichen Kammer zwei würfelförmige Testmassen aus einer Gold-Platin-Legierung.

Während die ETH-Ingenieure die Steuerungselektronik entwickelten, um die Würfel berührungsfrei in Position zu halten, analysierte Philippe Jetzer mit seinem Team Auswirkungen der Gravitationskräfte auf das Messsystem. Zwischen

den 38 Zentimeter voneinander liegenden Würfeln schwingen Laserstrahlen hin und her und messen relative Distanzänderungen. Die Apparatur muss in der Lage sein, kleinste Abstandsveränderungen im Grössenbereich eines Atomkerns, das heisst im Pikobereich, zu messen. Die Anordnung simuliert die Messgenauigkeit, die eLISA zum Nachweis von Gravitationswellen brauchen wird. «Vorläufige Resultate sehen sehr gut aus», sagt Philippe Jetzer. Genaueres wird man diesen Herbst am internationalen LISA-Symposium an der UZH erfahren.

Fusion von Schwarzen Löchern

«Der Paukenschlag vom 11. Februar hat für LISA Pathfinder nur Vorteile», sagt Jetzer. Der erfolgreiche LIGO-Nachweis hat ein Physikthema ins Rampenlicht gerückt, das vorher nur Insidern

*Wie mit Galileos Galileis Fernrohr
die optische Erkundung des
Universums begann, werden mit den
Gravitationswellen bisher nicht
bekannte Objekte sichtbar.*

bekannt war. Nun blicken alle in den Himmel und fragen sich, was die LISA-Missionen und die verschiedenen Laserinterferometer auf der Erde bringen. Für Jetzer und seine Kollegen ist der Fall klar: So, wie mit Galileo Galileis Fernrohr die optische Erkundung des Universums begann, werden mit Gravitationswellen bisher nicht bekannte Objekte sichtbar. Mit etwas Glück wird es sogar gelingen, bis an den Anfang des Universums zurückzublicken.

Denn Gravitationswellen kommen in vielen Formen vor und ihre Analyse lässt erstaunlich detailreiche Schlüsse zu. So haben die von LIGO entdeckten Wellen eine Frequenz zwischen 35 und 250 Hertz und liegen – wenn sie verstärkt werden – im hörbaren Bereich des menschlichen Ohrs. Sie entstanden vor 1,3 Milliarden Jahren bei der Fusion zweier Schwarzer Löcher, bei der gewaltige Massen in Gravitationsenergie umgewandelt wurden. Schwarze Löcher sind unsichtbar, weil ihre Schwerkraft aufgrund der dichten Masse so gross ist, dass kein Licht entweichen kann. Die Analyse der Gravitationswellen aber

erlaubt erstmals detaillierte Beschreibung dieses kosmischen Ereignisses: Demzufolge haben sich zwei Schwarze Löcher von der Grösse von 36 und 29 Massen unserer Sonnen zu einem Gebilde von rund 62 Sonnenmassen fusioniert. Gut drei Sonnenmassen wurden in Gravitationsenergie und -wellen verwandelt und setzen sich seither als Störung des Raum-Zeit-Kontinuums fort.

eLISA wird empfindlicher sein und in einem tieferen Frequenzbereich unterhalb von einem Hertz Signale auffangen können. «Wir können viel weiter hinaus in den Weltraum blicken und andere kosmische Ereignisse messen», sagt Philippe Jetzer. Dazu gehören kompakte Doppelsysteme ausgebrannter Sonnen (weisse Zwerge) in unserer Galaxie. eLISA dürfte auch das Verschmelzen von Supermassiven Schwarzen Löchern nachweisen können. Diese weisen Millionen von Sonnenmassen auf und werden im Zentrum von allen Galaxien vermutet, auch unserer Milchstrasse.

Einzig messbaren Zeugen der Zeit

Weiter hinaus schauen bedeutet in der Astrophysik auch länger zurück – zu den Anfängen des jungen Universums vor rund 13,5 Milliarden Jahren. Unmittelbar nach dem Urknall dehnte sich das entstehende Universum während einer extrem kurzen Zeit von 10^{-32} Sekunden unvorstellbar schnell aus. Die dabei produzierten Gravitationswellen bewegen sich noch immer durch den Raum und sind die einzigen messbaren Zeugen dieser Zeit. Bisher können die Astrophysiker nur bis etwa 400 000 Jahren nach dem Big Bang zurückblicken, als das Universum transparent für Licht wurde. Mit Gravitationswellen blickt man über diesen Moment hinaus – idealerweise an den Anfang des Universums.

Philippe Jetzer reibt sich die Hände: «Gravitationswellen sind für die Theoretische Physik von enormer Bedeutung.» Die Forschung mit LISA-Pathfinder ist für ihn persönlich die perfekte Kombination theoretischer mit astrophysikalischer Forschung. Er erinnert sich gerne an den Moment des Vega-Raketen-Starts zurück: «Dies ist der Startschuss in eine neue Ära, eine Revolution der Weltraumbeobachtung», sagte er sich damals. Es klingt nicht nach Übertreibung.

Kontakt: Prof. Philippe Jetzer, jetzer@physik.uzh.ch