

LISA LAUSCHT INS ALL

TEXT: AENEAS ROOCH

56

Die größte astronomische Beobachtungsstation ist so groß, dass sie nicht auf die Erde passt: Sie heißt Lisa und wird es wahrnehmen können, wenn eine Strecke von 2,5 Millionen Kilometern gerade mal um einen Atomdurchmesser schrumpft. Forschende des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik in Hannover und Potsdam haben den Detektor für Gravitationswellen mitentwickelt. Durch die Beobachtung kosmischer Wellen wollen sie Einblicke gewinnen in kuriose Vorgänge tief im Weltall.

Wenn man auf ein Trampolin steigt, beult sich das Sprungtuch aus und wippt auf und ab. Ähnliche Verzerrungen erschüttern auch unser Universum: Gravitationswellen. Sie stammen von sonderbaren Vorgängen in den Tiefen des Kosmos, rauschen mit Lichtgeschwindigkeit durch das Weltall und quetschen und dehnen alles, was ihnen in den Weg gerät, auf kleinsten Skalen. Wir können sie dabei weder sehen noch spüren. Forschende der Max-Planck-Ge-

sellschaft wollen besonders lange Wellen nachweisen und mit ihrer Hilfe die dunkle Vergangenheit unseres Universums, den Ursprung schwarzer Löcher und die Natur der Gravitation beleuchten.

Gravitationswellen sind unsichtbare Verzerrungen unserer Welt. Man kann sie sich nur schwer vorstellen, und dass es sie tatsächlich gibt, war umstritten. 1915 legte Albert Einstein eine Idee vor, wie Raum, Zeit und Gravitation zusammenhängen – seine berühmte allgemeine Relativitätstheorie –, und aus den Formeln, mit denen er diese Zusammenhänge beschrieb, lässt sich der Schluss ziehen, dass bestimmte Ereignisse im Universum Stauchungen und Streckungen in Raum und Zeit hervorrufen. Während Einstein selbst mutmaßte,

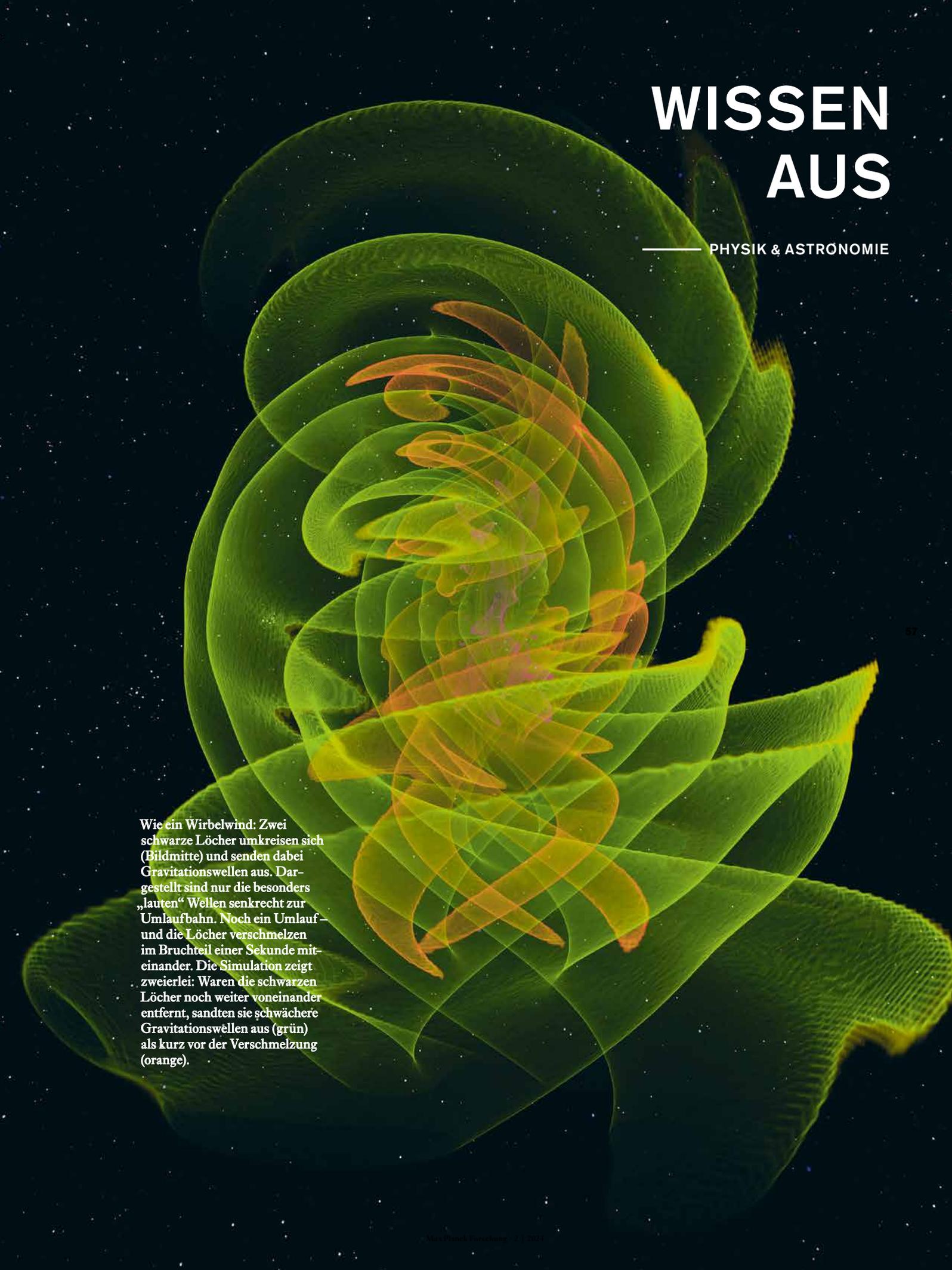
dass diese Gravitationswellen zu schwach seien, um gemessen werden zu können, hielten andere sie von vornherein für ein theoretisches Kuriosum, das zwar aus den Formeln herauspurzelt, dem aber keine realen Vorgänge entsprechen. Es hat einhundert Jahre gedauert, bis Gravitationswellen im Jahr 2015 tatsächlich direkt gemessen wurden.

Gravitationswellen entstehen unter anderem, wenn zwei schwarze Löcher in einem wilden Spiraltanz umeinander kreisen und miteinander verschmelzen. Schwarze Löcher drücken, so kann man es sich vorstellen, tiefe Dellen in ein imaginäres Tuch, in dem Raum und Zeit miteinander verwoben sind. Umkreisen sich die schwarzen Löcher im kosmischen Tanz, pflanzen sich Wellen durch die



WISSEN AUS

PHYSIK & ASTRONOMIE



Wie ein Wirbelwind: Zwei schwarze Löcher umkreisen sich (Bildmitte) und senden dabei Gravitationswellen aus. Dargestellt sind nur die besonders „lauten“ Wellen senkrecht zur Umlaufbahn. Noch ein Umlauf – und die Löcher verschmelzen im Bruchteil einer Sekunde miteinander. Die Simulation zeigt zweierlei: Waren die schwarzen Löcher noch weiter voneinander entfernt, sandten sie schwächere Gravitationswellen aus (grün) als kurz vor der Verschmelzung (orange).

Raumzeit fort und verzerren infolgedessen Abstände zwischen Objekten – so wie sich die Erschütterung beim Sprung auf ein Trampolin über das gesamte Sprungtuch ausbreitet und es vibrieren lässt. Obwohl sie von gigantischen Massen verursacht werden, sind die Verzerrungen selbst äußerst schwach und werden umso schwächer, je weiter entfernt die Quelle liegt: Wenn zwei schwarze Löcher von der Masse einiger Sonnen in einer fernen Galaxie Gravitationswellen losstreuen, stauchen diese den Abstand zwischen Erde und Sonne, immerhin rund 150 Millionen Kilometer, gerade einmal um etwa ein Millionstel des Haardurchmessers.

Extrem präzise

Um solche winzigen Längenänderungen zu bemerken, müssen trickreiche Messmethoden her, denn selbst ein unvorstellbar filigranes Präzisionslineal wäre noch zu ungenau. Eine Möglichkeit, Gravitationswellen zu vermessen, ist ein Laserstrahl, der durch eine kilometerlange Röhre geschickt und unterwegs geteilt wird. Eine Hälfte reist weiter, die andere wird in eine senkrecht abzweigende Röhre geleitet, und beide Hälften werden jeweils an einem Spiegel am Ende der Röhren reflektiert. Wälzt sich nun eine Gravitationswelle durch unser Sonnensystem, die den Raum in die eine Richtung streckt und senkrecht dazu staucht, so verlängert sich die Strecke, die der Laserstrahl in der einen Röhre zurücklegt, während sich die andere verkürzt. Die Lichtwellen in den beiden Röhren schwingen nicht mehr im Takt. Überlagert man sie, bemerkt man diese Diskrepanz in einem Interferenzmuster. Die zarte Stauchung des Raums mit überlagerten Laserstrahlen aufzufspüren, ist ein kompliziertes Unterfangen – schon die Erschütterung eines Lastwagens, der über die nächste Straße donnert, würde die Messung unbrauchbar machen –, doch 2015 ist es Forschenden der Ligo Scientific Collaboration, darunter mehrere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik, erst-

mals gelungen. Allerdings laufen viele Gravitationswellen noch immer unbemerkt an uns vorbei. So ähnlich, wie sich das Licht aus elektromagnetischen Wellen verschiedener Wellenlängen zusammensetzt, bilden auch



FOTO: THOMAS DAMM

Auge fürs Detail: Guido Müller ist Spezialist, wenn es darum geht, extreme Ereignisse im All aufzuspüren, für die herkömmliche Teleskope blind sind.

Gravitationswellen ein Spektrum. Die Laserinterferometer am Boden können lediglich Gravitationswellen mit kurzen Perioden einfangen, lange Gravitationswellen sind bisher noch nicht messbar. Erstens sind sie schlicht zu lang: Man bräuchte einen Messaufbau, der größer ist als die Erde, ähnlich den riesigen Antennen, die lange Funkwellen empfangen. Und zweitens stört das Grummeln und Knirschen aus dem Inneren der Erde: Das schwache Vibrieren des Raumes geht in den Betriebsgeräu-

schen unseres Planeten schlichtweg unter.

Seit Anfang des Jahres 2024 ist es gewiss: Eine außergewöhnliche Messeinrichtung namens Laser Interferometer Space Antenna, kurz Lisa, soll in etwa zehn Jahren als Mission der Europäischen Weltraumorganisation (Esa) ins All starten und dort auch Gravitationswellen mit längeren Perioden einfangen. Lisa wird aus drei Satelliten bestehen, die einen Abstand von etwa 2,5 Millionen Kilometern zueinander einhalten und in dieser Dreiecksformation auf einer irdähnlichen Umlaufbahn um die Sonne kreisen. Zum Vergleich: Die Satelliten sind voneinander etwa sechsmal so weit entfernt wie der Mond von der Erde. Jeder Satellit führt zwei kleine, frei schwebende Metallwürfel in seinem Inneren mit sich, jeweils etwas größer als ein Päckchen Frischhefe und rund zwei Kilo schwer. Das Satellitentrio und die Testmassen darin sollen das zarte Zittern des Raumes spüren, das Gravitationswellen verursachen. Die Gold-Platin-Legierung der Würfel lässt sich von Magnetfeldern kaum beeinflussen, und wenn Sonnenwinde auf die Satelliten einströmen oder das Sonnenlicht mit seiner Strahlung drückt, steuern die Satelliten feinfühlig gegen, sodass als einzige Kraft auf die Würfel immer nur die Gravitation einwirkt. Wenn eine lange Gravitationswelle durch unser Sonnensystem rauscht, dann staucht sie, je nach Ursprung, den Abstand von 2,5 Millionen Kilometern um den Durchmesser eines Atoms oder gar eines Bakteriums. Diese winzige Längenänderung lässt sich im Labor relativ einfach messen, im Weltall jedoch und bei diesen Entfernungen ist es deutlich diffiziler.

Für die Messung tauschen die Satelliten untereinander Laserstrahlen aus und informieren sich so gegenseitig, nach einer Vielzahl trickreicher Schritte, über die Position der Würfel zueinander. Nur so kann enthüllt werden, wenn eine Gravitationswelle den Abstand zwischen den frei schwebenden Würfeln für einen Moment streckt oder staucht. Drei in diesem Satelliten-

dreieck ausgetauschte Laserstrahlen bilden gewissermaßen drei eigenständige, zweiseitige Laserinterferometer, die gleichzeitig die Ohren spitzen.

Diese Laserstrahlen kann man allerdings nicht übereinanderlegen – wie dies die Interferometer auf der Erde tun –, weil sie sich auf ihrem Weg von einem Satelliten zu einem anderen kilometerweit auffächern und nur ein winziger Bruchteil von ihnen beim jeweils gegenüberliegenden Satelliten durch die tellergroße Öffnung des Teleskops gelangt. „Wir schneiden aus einem zehn Kilometer breiten Lichtstrahl dreißig Zentimeter aus“, schildert Guido Müller, der als Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover die Messinstrumente für Lisa entwickelt. „Es ist enorm anspruchsvoll, mit diesem schwachen Laserlicht Interferometrie zu betreiben.“ Nachdem das Signal mit extremer Genauigkeit vermessen und Störungen und Fluktuationen herausgefiltert wurden, wird es in jedem Satelliten aufwendig überlagert und verrechnet. „Mit der klassischen Interferometrie, bei der man zwei Lichtwellen überlagert und ein Muster sehen kann, hat das allerdings nur noch wenig zu tun“, sagt Guido Müller. „Das ist Interferometrie hoch zehn.“ Und es braucht Zeit, um so eine filigrane Messmethode zu entwickeln. Die Idee hierfür hatte Karsten Danzmann, ebenfalls Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover, schon vor mehr als dreißig Jahren.

Das Instrument wird von der Nasa, der Esa und verschiedenen Esa-Mitgliedstaaten gebaut. Das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik hat dabei die Verantwortung für das interferometrische Detektionssystem übernommen und unterstützt die Mission und die Esa bei vielen Fragen rund um das Systemdesign. „Auf dem Papier ist das alles einfach“, findet Guido Müller, „die Herausforderung ist allerdings, dass es auch später im Weltall funktioniert.“ Die Techniktests in Hannover gestalten sich dabei schwieriger, als es der Livebetrieb im

Weltall später zu werden verspricht, wo kein Erdrumpeln und keine heftigen Temperaturschwankungen stören. Dass die Technik filigrane Längenänderungen aufspüren kann, wurde mit der Vorgängermission Lisa



FOTO: SVEN DÖRING

Aufregende Mathematik: Alessandra Buonannos Berechnungen verraten überhaupt erst, wonach Astrophysiker und Astrophysikerinnen im Datensalat suchen müssen.

Pathfinder im Weltall bereits bewiesen, „allerdings noch nicht auf dieser enormen Distanz von 2,5 Millionen Kilometern“, sagt Müller. „Wir tragen daher eine riesige Verantwortung – aber wenn wir nicht irgendetwas ganz Dummes übersehen haben, werden wir das hinbekommen.“

Gravitationswellen mit langen Perioden, wie sie Lisa erstmals aufspüren soll, stammen unter anderem von krassen Vorgängen in den Tiefen des Weltalls, etwa von besonders schweren schwarzen Löchern, jeweils Millionen Mal

so schwer wie unsere Sonne, die einander in einem trägen Tanz umkreisen, bis sie schließlich miteinander verschmelzen. Schwarze Löcher gehören schon als Einzelexemplare zu den spektakulärsten Objekten im Universum: In ihnen ist eine enorme Masse auf so winzigem Raum zusammengepresst, dass ihre Gravitation alles einfängt und verschluckt, was ihnen zu nahe kommt, sogar Licht. Einige schwarze Löcher entstehen, wenn Sterne mit einer vielfachen Masse der Sonne am Ende ihres Lebens in sich zusammenstürzen und dadurch eine ungeheure Masse auf engstem Raum zusammenquetschen. So extrem das auch ist – diese stellaren schwarzen Löcher sind ein Witz gegen ganz besonders massereiche schwarze Löcher, die Millionen bis Milliarden Sonnenmassen in sich tragen und im Zentrum vieler Galaxien sitzen. Wie diese gewaltigen Exemp-

→

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie sagt Gravitationswellen voraus, die entstehen, wenn sich etwa schwarze Löcher eng umkreisen oder verschmelzen.

Gravitationswellen von Neutronensternen oder schwarzen Löchern mit der Masse schwerer Sterne haben relativ kurze Perioden und konnten 2015 erstmals von der Erde aus nachgewiesen werden.

Das Satellitentrio Lisa soll 2035 erstmals Gravitationswellen mit längeren Perioden messen, etwa von sich umkreisenden massereichen schwarzen Löchern, und so einen bisher unzugänglichen Teil des Universums erforschen.

Mit Lisa wollen Forschende besser verstehen, wie Galaxien sich entwickeln, aber auch dunkle Materie und dunkle Energie durch ein neues Beobachtungsfenster erfassen.

lare schwarzer Löcher entstanden sind, welche Rolle sie bei der Entwicklung von Galaxien spielen und wie sie so viel Masse anhäufen konnten, ist nicht abschließend geklärt.

Forscherinnen und Forscher des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik in Potsdam wollen all das aus den besonders langen Gravitationswellen herausdestillieren. Ehe solche Gravitationswellen die Erde erreichen, sind sie Abermillionen Jahre unterwegs, sie gewähren den Forschenden also einen Blick in eine frühere, turbulente Phase des Universums, als vor vielen Milliarden Jahren Galaxien und deren zentrale schwarze Löcher

vermehrt auf Kollisionskurs gingen und durch die gegenseitige Schwerkraft umeinander wirbelten. Dass schwarze Löcher dabei verschmelzen, ist nur eine Erklärung dafür, wie schwarze Löcher in den Zentren der Galaxien so schwer werden. Einige dieser Massemonster wachsen zusätzlich um etwa eine Sonnenmasse pro Jahr, wenn Gas in einer Scheibe um sie herumströmt und auf sie fällt. Dadurch kommt auf kosmologischen Zeitskalen einiges zusammen. Lange Gravitationswellen liefern also nicht nur einen Zugang zu bislang kaum erforschten Bereichen des Universums, sondern helfen auch, die Evolution von Galaxien besser zu verstehen. Zu-

dem erlauben es die Messdaten, eine Inventur schwarzer Löcher durchzuführen und herauszufinden, wie viele von welchem Typ und welcher Masse es wo gibt.

Lisa werden auch andere Signale ins Netz gehen, etwa wenn sich ein superschweres schwarzes Loch einen ungleichen Partner einverleibt, dessen Masse etwa einem Millionstel seiner Masse entspricht – etwa ein schwarzes Loch mit der Masse eines einzelnen Sterns oder ein Neutronenstern. Bei solchen *extreme mass ratio inspirals* zieht sich der Fressvorgang hin: Das leichte Objekt trieselt Millionen Mal auf einer unregelmäßig elliptischen

Der aktuell größte Messapparat der Menschheit besteht aus drei Satelliten, die sechsmal so weit voneinander entfernt sind wie die Erde vom Mond. Das Trio Lisa umkreist die Sonne und tauscht ständig Laserstrahlen aus (hier rot). Wenn es im fernen Weltall rumpelt, etwa wenn zwei schwarze Löcher mit Millionen Sonnenmassen verschmelzen, entsteht eine Gravitationswelle. Erfasst die Welle die Satelliten, schaukelt sie diese um eine millionstel Haaresbreite. Das ist messbar.

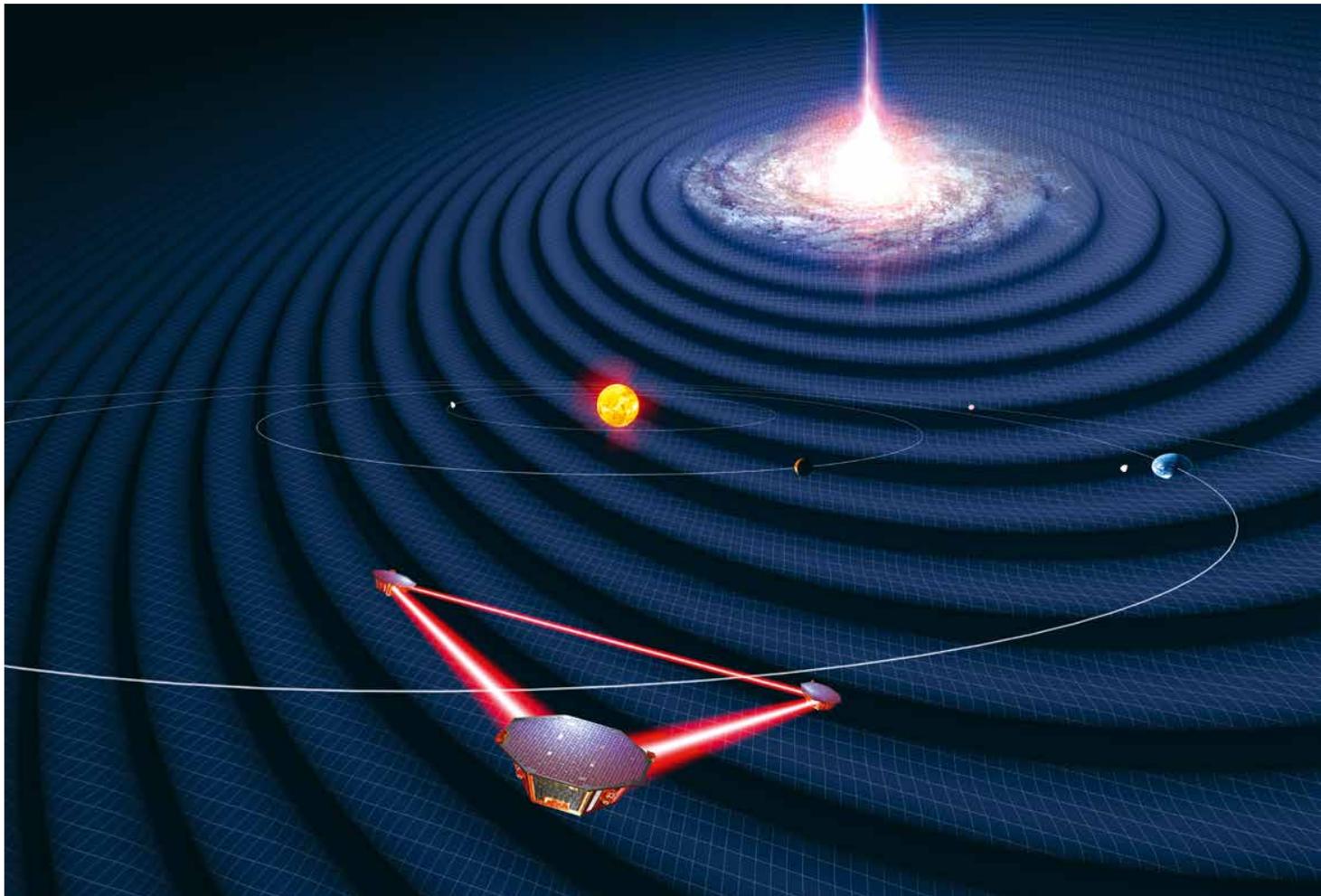
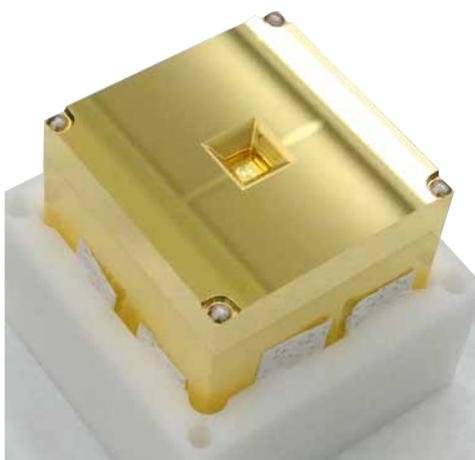


FOTO: ESA



Nur 4,6 Zentimeter Kantenlänge misst dieser Würfel aus Gold und Platin, er ist das Herzstück jedes Lisa-Satelliten. Schubst eine Gravitationswelle diesen Würfel nur um eine Atombreite zur Seite, schlägt ein ausgeklügeltes Lasersystem Alarm.

und sich immer wieder ändernden Bahn um das schwarze Loch herum. Obwohl die Gravitationssignale, die dieser Tanz aussendet, sehr komplex sind, untersuchen die Forschenden mit ihrer Hilfe, wie die Raumzeit um schwarze Löcher beschaffen ist, und prüfen Albert Einsteins Relativitätstheorie damit auf Herz und Nieren.

Was Lisa registrieren wird, ist nicht viel mehr als ein schwaches Zittern, und doch ist es ein Getöse unzähliger, einander überlagernder Wellen aus verschiedenen Richtungen und von ganz verschiedenen Vorgängen. „Wir wissen nicht, wie viele von diesen ungleichen Paaren es da draußen gibt. Wir wissen nicht, wie viele Paare aus zwei massereichen schwarzen Löchern existieren. Und wir wissen nicht, wie viele Gravitationswellen zudem noch als Hintergrundrauschen aus den Tiefen des Weltalls kommen“, sagt Alessandra Buonanno, Direktorin am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam. Eine große Herausforderung ist beispielsweise der Lärm in unserer Milchstraße: Sie beheimatet unzählige Doppelsysteme von zwei weißen Zwergen, die lange Gravitationswellen aussenden und mit diesem ständigen Gemurmel die wesentlich leiseren Signale aus den Tiefen des Weltalls übertönen.

Alessandra Buonanno und ihr Team wollen in diesem chaotischen Chor Einzelstimmen auflösen, um einzelne Vorgänge im All sichtbar werden zu lassen. „Jede Quelle, ob Doppelsystem massiver schwarzer Löcher oder ein massives schwarzes Loch mit einem viel leichteren Begleiter, gibt charakteristische Gravitationswellen ab – es ist wie ein Fingerabdruck“, sagt Buonanno, „und wir können anhand von theoretischen Berechnungen und von Supercomputern vorhersagen, wie genau diese Fingerabdrücke aussehen.“ Sind sich die Forschenden sicher, welches Signal von welcher Quelle stammt, ziehen sie die vorausberechnete Schwingung direkt vom Gesamtsignal ab. Wenn sämtliche Prozesse bekannt sind, die Gravitationswellen verursachen, sollte am Ende vom Stimmgewirr nichts übrig bleiben. Und wenn doch, ist das eine weitere Aufgabe für die Astrophysik. „Damit prüfen wir, ob die allgemeine Relativitätstheorie auch hier vollumfassend stimmt oder ob sich eine neue Gravitationsphysik oder Phänomene auf tun, die wir noch nicht kennen.“

Unsichtbares wird messbar

Das ganze Unterfangen ist mathematisch herausfordernd. Wenn das Modell nicht stimmt, könnte das Signal, das die Potsdamer Forschenden berechnen haben, von dem tatsächlichen Gravitationswellensignal abweichen, das ein Paar schwarzer Löcher ausgesendet hat. Dann werden die Astrophysikerinnen und -physiker aus den Lisa-Daten nicht nur fehlerhafte Schlüsse über dieses Paar und sein Verhalten ziehen, sondern auch rechnerische Artefakte produzieren, wenn sie die prognostizierte Gravitationswelle vom Datenstrom subtrahieren. Es bliebe ein Signal, das als Abweichung von der allgemeinen Relativitätstheorie fehlgedeutet werden könnte. Eine präzise Vorausberechnung der Schwingungen, die Lisa empfangen wird, ist folglich entschei-

dend dafür, sie richtig zu deuten. Fast alles im Universum, mehr als 95 Prozent, sendet weder Licht noch sonstige elektromagnetische Strahlung aus und wird als dunkle Materie und dunkle Energie gehandelt. Was wir über den unsichtbaren und stummen Anteil der dunklen Materie wissen, ist lediglich, dass es ihn gibt und dass er der Schwerkraft unterworfen ist. Lisa könnte winzige Effekte in den Gravitationswellen aufspüren, die auf die dunkle Materie zurückgeführt werden könnten. Das Satellitentrio soll auch unabhängig von bisherigen Teleskopen messen können, wie schnell sich das Universum ausdehnt und wie viel dunkle Energie dafür nötig ist – und damit möglicherweise Rätsel lösen oder neue aufwerfen. „Lisa hat das Zeug, unser Verständnis des Universums zu revolutionieren“, meint Alessandra Buonanno. Indem sie und andere Forschende mit Lisa lange Gravitationswellen entschlüsseln, eröffnen sie ein neues Beobachtungsfenster in einen dunklen Teil des Universums und machen Unsichtbares sichtbar, zumindest auf den Bildschirmen in ihren Laboren. ←

61

GLOSSAR

INTERFERENZ entsteht, wenn zwei Wellensysteme, egal ob Licht-, Wasser-, oder Schallwelle, sich überlagern. Liegen die Wellenberge und -täler übereinander, verstärkt sich die Intensität der Schwingung. Sind die Wellen um eine halbe Wellenlänge gegeneinander verschoben, löschen sie sich gegenseitig aus.

LASERINTERFEROMETRIE ist ein Verfahren zur Vermessung kleinster Abstandsänderungen. Überlagert man zwei Laserstrahlen identischer Wellenlänge, führt dies zu einem Interferenzmuster, das etwa charakteristisch für den Gangunterschied beider Wellen ist. So lassen sich kleinste Abstandsänderungen zweier Laserquellen zueinander messen.
