Die ESA-Raumsonde LISA Pathfinder wird kritische Technologieentwicklungen für das geplante weltraumgestützte Gravitationswellenobservatorium eLISA testen.

LISA und die Pfadfinder-Mission

ESA

Auf astronomischen Größenskalen ist die Gravitation die treibende Kraft im Universum. Der Forschungssatellit LISA Pathfinder, der Techniken für den Nachweis von Gravitationswellen testet, wird uns dabei helfen, das gesamte Universum zu »hören«.

Von Karsten Danzmann

Das vergangene Jahrhundert war Zeuge der enormen Fortschritte, die unser Verständnis des Universums betreffen. Wir kennen die Lebenszyklen von Sternen und den Aufbau von Galaxien, wir haben den Nachhall des Urknalls beobachtet und ein allgemeines Verständnis für die Entwicklung des Universums erworben. Es ist bemerkenswert, wie weit wir mit der elektromagnetischen Strahlung als Beobachtungsmittel gekommen sind.

Jedoch ist es die Schwerkraft, die zahlreiche Prozesse im Universum antreibt, und diese wirkt meist im Dunklen. Gelingt es uns, ein gravitatives Fenster zum Universum zu öffnen, wird uns dies weiter als alles andere bringen. Die Schwerkraft hat ihre eigenen Boten: Gravitationswellen.Diese Schwingungen im Gefüge der Raumzeit breiten sich im Grunde ungehindert aus und erlauben uns so einen tiefen Blick in die Entstehung der ersten Schwarzen Löcher, die als Saatkörner fungierten. So können wir das Universum bis zu Rotverschiebungen von $z \sim 20$ erkunden und damit in eine Entwicklungsphase vorstoßen, die noch vor der kosmischen Epoche der Reionisierung liegt.

Messungen der Masse und der Rotation Schwarzer Löcher werden in einer Güte möglich werden, die es erlaubt, die Geschichte massereicher Schwarzer Löcher über alle Stadien der Galaxienentwicklung hinweg zu verfolgen und zugleich jegliche Abweichung von der Kerr-Metrik (einer Lösung der einsteinschen Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie für rotierende, ungeladene Schwarze Löcher) einzuschränken.

Das ist geplant

Die Europäische Raumfahrtagentur ESA hat vor Kurzem »Das gravitative Universum« als Thema ihrer dritten Großmission L3 ausgewählt; diese soll 2034 starten. Die Referenzmission für dieses Wissenschaftsthema ist ein großes laserinterferometrisches, weltraumbasiertes Gravitationswellenobservatorium namens »Laser Interferometer Space Antenna«, kurz LISA. Die Machbarkeit von LISA wurde seit zwei Jahrzehnten sowohl von der ESA als auch von der US-Weltraumbehörde NASA intensiv geprüft. Seit 2011 treibt die ESA alleine das Projekt unter dem Namen »eLISA« voran, aber es ist zu erwarten, dass die NASA bald wieder mit von der Partie sein wird.

Im Folgenden verwende ich den Namen LISA als Bezeichnung für ein Observatorium für niederfrequente Gravitationswel-

LISA Pathfinder – Missionsdaten	
Ziel	Die wichtigsten LISA-Technologien im Weltraum zu testen und ein vollständiges Modell aller Rauschquellen zu validieren.
Methode	Widerstandsfreier Betrieb am Lagrangepunkt L1 mit Laserinterferometrie zwischen zwei frei schwebenden Testmassen innerhalb eines Satelliten.
Start	Ende 2015.
Dauer	Sechs Monate für die nominelle Mission.
Orbit	Halobahn um den Lagrangepunkt L1 des Erde-Sonne-Systems.
Instrumentierung	Laserinterferometer, frei schwebende Testmassen, Inertialsensoren, widerstandsfreies Kontrollsystem und Mikrotriebwerke
Team	ESA, Frankreich, Deutschland, Italien, NASA, Niederlande, Spanien, Schweiz, Vereinigtes Königreich.

len, das Laserinterferometrie zwischen frei schwebenden Testmassen nutzt. Durch Raumsonden von äußeren Einflüssen geschützt, befinden sich diese Testmassen an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks mit Seitenlängen von einer Million Kilometer, in einem heliozentrischen Orbit einige zehn Millionen Kilometer von der Erde entfernt.

LISA wird die erste Mission überhaupt sein, die das gesamte Universum mit Hilfe von Gravitationswellen erforscht. Dabei deckt LISA den kompletten Himmel ab und wird über den Nachweis von Gravitationswellen weit reichende Einblicke in einen dynamischen Kosmos bieten. Sie wird uns Nahaufnahmen der frühen Prozesse im Teraelektronvolt-Energiebereich liefern, gesicherte Quellen in Form von bereits bekannten Doppelsystemen im Milchstraßensystem beobachten und es uns ermöglichen, das gesamte Universum zu erforschen, angefangen bei den kleinsten Größenskalen um Singularitäten und Schwarze Löcher bis hin zu kosmischen Dimensionen.

Wo werden wir 2030 stehen?

Es liegt in der Natur der Sache, dass wissenschaftlicher Fortschritt nicht vorhersehbar ist; deshalb werden die interessantesten Entdeckungen bis zum Jahr 2030 diejenigen sein, die wir eben nicht vorhersehen können! Aber die derzeit geplanten Projekte deuten bereits darauf hin, wo die Grenzen der Wissenschaft zu dem Zeitpunkt, an dem LISA in Betrieb geht, verlaufen werden.

Zum Beispiel können wir mit großen Fortschritten in der Astronomie kurzlebiger Ereignisse rechnen. Teleskope wie das Large Synoptic Survey Telescope (LSST) und das Square Kilometer Array (SKA) werden wahrscheinlich Quellen aufspüren können, die unregelmäßig oder nur ein einziges Mal aufleuchten. Und die Chancen stehen gut, dass einige dieser Quellen mit Signalen von Gravitationswellen in Verbindung gebracht werden können.

Ein weiteres Beispiel sind Großobservatorien – das European Extremely Large Telescope (EELT), das Thirty Meter Telescope (TMT) und das Giant Magellan Telescope (GMT) – sowie große Weltraumteleskope wie das James Webb Space Telescope und Athena. Mit diesem Instrumentarium werden wir (Proto-)Galaxien bei eben jenen noch nie zuvor beobachteten Rotverschiebungen entdecken, bei denen auch LISA verschmelzende Schwarze Löcher beobachten wird.

Bis zum Jahr 2030 wird sich die Gravitationswellenastronomie durch erdgebundene Beobachtungen oberhalb von 10 Hertz sowie durch die Messmethode des Pulsar-Timings (Pulsar Timing Arrays, kurz PTA) bei Frequenzen im Nanohertz-Bereich fest etabliert haben. Die riesige Lücke im Frequenzbereich dazwischen wird bis zum Start von LISA völlig unerforscht bleiben.

Das erdgebundene Netzwerk aus hoch modernen interferometrischen Detektoren – drei LIGO-Detektoren, Virgo und der Kamioka Gravitationswellendetektor (KAGRA) – wird bereits Doppelsternsysteme mit bis zu 100 Sonnenmassen beobachtet haben, deren Komponenten sich auf spiralförmigen Bahnen einander nähern, und auch ihre Populationsstatistik erfasst haben. Womöglich ist bis 2030 das Einstein-Teleskop – ein Gravitationswellendetektor dritter Generation – in Betrieb, wodurch sich das Raumvolumen, in dem solche Signale entdeckt werden können, erweitert.

Am anderen Ende der Massenverteilung wird das Pulsar-Timing einen stochastischen Hintergrund liefern, der sich aus den zahlreichen überlagernden Signalen von extrem massereichen Doppelsystemen aus Schwarzen Löchern mit Massen von über 10^9 Sonnenmassen ergibt. Darüber hinaus könnten mit dem Pulsar-Timing einzelne Verschmelzungs-Ereignisse aufgespürt worden sein.

Dieser Hintergrund wird dazu beitragen, die Massenfunktion extrem massereicher Schwarzer Löcher am oberen Ende des Spektrums festzulegen. Allerdings ist er nicht in der Lage, die Massenfunktion für die weit zahlreicheren Schwarzen Löcher im Bereich von rund 10^6 Sonnenmassen einzuschränken, die sich in den Zentren durchschnittlicher Galaxien befinden und die mit Hilfe von LISA-Beobachtungen zugänglich werden.

Neben hochempfindlichen Beobachtungen einzelner Systeme wird es uns LISA ermöglichen, die Populationsstatistik Schwarzer Löcher in galaktischen Zentren zu erfassen, genauso wie die von Schwarzen Löchern mittlerer Masse und von denjenigen Schwarzen Löchern aus der Frühzeit des Universums, die schließlich zu denjenigen extrem massereichen Schwarzen Löchern angewachsen sind, die wir heutzutage beobachten.

Grundlagenforschung mit LISA im Jahr 2030

Eines der grundlegenden Ziele der LISA-Mission besteht darin, die Theorie der Schwerkraft zu testen. Es erscheint unwahrscheinlich, dass bis zum Jahr 2030 andere Methoden die Empfindlichkeit von LISA erreichen werden, was Abweichungen von starken Gravitationsfeldern angeht. Im Unterschied zu erdgebundenen Instrumenten wird LISA empfindlich genug sein, um geringe Abweichungen von der allgemeinen Relativitätstheorie zu entdecken sowie möglicherweise unerwartete Signale aufzufangen, die auf neue Phänomene hindeuten.

Durch Beobachtungen der lang andauernden Wellenformen von so genannten extreme mass ratio inspiral (EMRI) events, also Ereignissen, bei dem sich ein Objekt und ein sehr viel massereicheres Objekt einander annähern und schließlich verschmelzen, wird LISA es ermöglichen, die Geometrie extrem massereicher Schwarzer Löcher mit ausgezeichneter Präzision zu vermessen. Darüber hinaus werden wir zusätzliche, der Schwerkraft ähnliche Skalarfelder entdecken oder eingrenzen können.

Röntgenteleskope und andere Observatorien, die elektromagnetische Strahlung erfassen, mögen die Rotation einer Reihe Schwarzer Löcher vermessen haben; doch

LISAs Fähigkeit, EMRI-Ereignisse zu verfolgen und deren Signale bis hin zur Entstehung des finalen Horizonts zuzuordnen, wird unerreicht bleiben – ebenso wie ihre Fähigkeit, reine Singularitäten oder andere exotische Objekte (beispielsweise Bosonen- oder Gravasterne) zu finden, sollte es sie denn geben.

Bis 2030 werden wir sehr viel mehr über das großräumige Universum wissen. Insbesondere über das Wesen der Dunklen Energie werden wir mit Hilfe der geplanten Durchmusterungen im Optischen und Infraroten, die der Erforschung großer Strukturen gewidmet sind, mehr erfahren. Dennoch kann nur die Entdeckung von Gravitationswellen diejenige Zeitspanne in der Entwicklung des Universums abdecken, die von der Wiedererwärmung nach der Inflationsphase bis zur primordialen Nukleosynthese reicht. Daher kann LISA Informationen über den Zustand des Universums zu viel früheren Epochen gewinnen, als dies anderen kosmischen Beobachtungsmöglichkeiten möglich ist.

Die Informationen, welche Gravitationswellen aus der Frühzeit des Universums enthalten, ergänzen jene, die mit Teilchenbeschleunigern zugänglich sind. Die Existenz eines Phasenübergangs erster Ordnung im Teraelektronvolt-Größenbereich oder kosmischer (Super-)Strings im Universum, die Eigenschaften der niederenergetischen inflationären Wiedererwärmung und sogar das Wesen des Quanten-Vakuumzustandes vor der Inflation – dies sind einige der grundlegenden Fragestellungen, die 2030 immer noch nicht beantwortet sein werden und für welche die LISA-Mission einige Antworten liefern könnte.

LISA und die Kosmologie im Jahr 2030

Bis 2030 ist es durchaus möglich, dass Beobachtungen das Massenspektrum extrem massereicher Schwarzer Löcher besser festgelegt haben werden, im Bereich von 10^7 bis zu einigen 10^{10} Sonnenmassen oder sogar noch höher. Dies gilt aber wahrscheinlich nicht für den hauptsächlich von LISA abgedeckten Bereich von 10^4 bis 10^6 Sonnenmassen, insbesondere für Rotverschiebungen $z > 2$. LISA-Beobachtungen werden diese Lücke füllen und darüber hinaus eine Überprüfung von Auswahleffekten und anderen systematischen Effekten erlauben, die mit Beobachtungen mit elektromagnetischer Strahlung verknüpft sind. LISAs Fähigkeit, die Masse und die Rotation massereicher Schwarzer Löcher als Funktion der Rotverschiebung bis zu $z = 20$ zu messen, ermöglicht es uns besser zu verstehen, wie massereiche Schwarze Löcher so schnell wachsen konnten, dass sie das bei $z \sim 7$ beobachtete Ausmaß angenommen haben.

LISA und massereiche Schwarze Löcher im Jahr 2030

LISA ist besonders für die Erforschung von massereichen Schwarzen Löchern in demjenigen Massenbereich geeignet, wie er für die meisten Schwarzen Löcher in den Zentren von Galaxien typisch ist. Gravitationswellendetektoren wie LISA erfassen von Prinzip aus den gesamten Himmel: Sie sind immer aktiv und ihr Sichtfeld umfasst einen Raumwinkel von nahezu 4π. Sie ergänzen auf natürliche Art und Weise andere Durchmusterungen und Beobachtungsinstrumente, die zur gleichen Zeit in Betrieb sind, beispielsweise das LSST, das SKA, Neutrinodetektoren sowie Observatorien für den Gamma- und Röntgenstrahlenbereich.

Die Verschmelzung massereicher Schwarzer Löcher, die LISA bei Rotverschiebungen im mittleren Bereich von $z = 5$ bis $z = 10$ beobachten kann, könnten auch für das SKA und das LSST als kurzlebige Ereignisse in derselben Himmelsregion sichtbar sein. Daher wäre das Aufspüren von fünf bis zehn Gegenstücken während einer zweijährigen LISA-Mission nicht überraschend. Diese transienten Strahlungsquellen könnten anschließend mit Teleskopen mit großen Lichtsammelflächen nachverfolgt werden, wie etwa dem TMT, dem GMT oder dem EELT, und so einen einzigartigen Einblick in die Umgebung verschmelzender Schwarzer Löcher ermöglichen.

Der Stand der Technik

Alle für LISA wichtigen Technologien werden seit über 15 Jahren intensiv entwickelt und sind alle in Europa verfügbar, und fast alle in den USA. Die Interferometrie mit Armlängen von einer Million Kilometern kann nicht direkt auf der Erde getestet werden, aber sie wird durch skalierte Experimente sowie durch Simulationen erforscht. Alle anderen Techniken werden im Rahmen der Vorgängermission LISA Pathfinder erprobt, die Ende 2015 startet (siehe Tabelle auf der linken Seite). Die Sonde LISA Pathfinder wird das so genannte »LISA Technology Package« (LTP) an Bord haben, das von europäischen Mitgliedsstaaten zur Verfügung gestellt wurde. Das LTP ist ein vollständiges System, das einem auf 38 Zentimeter verkürzten LISA-Interferometerarm ähnelt. Es verfügt über zwei Trägheitssensoren, die Positionen und Ausrichtungen der beiden frei schwebenden Testmassen erfassen, eine optische Bank für die Laserinterferometrie zwischen den Testmassen, einen Auslöse- und Positioniermechanismus, ein Diagnostiksystem sowie das widerstandsfreie Kontrollsystem DFACS (Drag-Free Attitude Control System).

Zwei unterschiedliche Mikrotriebwerke befinden sich an Bord von LISA Pathfinder: ein Satz Kaltgastriebwerke der ESA sowie ein Satz Kolloidtriebwerke, die von der NASA beigesteuert wurden. Diese gehören zur Nutzlast ST7 DRS (disturbance reduction system, Störungsreduktionssystem), welche eine unabhängige Überprüfung des DFACS mit Hilfe des europäischen LTP als Referenzsensor liefern wird.

Mit der LISA-Pathfinder-Mission werden die Funktionstüchtigkeit dieser Systeme und ihre Inbetriebnahme im Weltraum abschließend verifiziert. Nach dem erfolgreichen Ende dieser Mission wird die weltweite wissenschaftliche Gemeinschaft bereit sein, die revolutionär neue Wissenschaft der Gravitationswellenastronomie in Angriff zu nehmen.

KARSTEN DANZMANN ist Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Hannover und Direktor des Instituts für Gravitationsphysik der Leibnitz Universität Hannover. Die vollständige Liste der Autoren und der Beitragenden: http://elisascience.org/authors und http://elisascience.org/contributors

Literaturhinweise

Grothues, H.-G., Reiche, J.: LISA Pathfinder. In: Sterne und Weltraum 7/2014, S. 34–42

Dieser Artikel und Weblinks im Internet: www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1368469

© Nature Publishing Group
www.nature.com/naturephysics
Nature Physics 11, S. 613 – 615, August 2015