

Gravitationswellen mit einer Frequenz von Millihertz aus dem Zentrum der Galaxis werden sich mit LISA, der geplanten Laser Interferometer Space Antenna, wie in dieser künstlerischen Darstellung angedeutet, nachweisen lassen. Solche Signale können von einem kompakten Objekt von der Masse Jupiters stammen, welches das extrem massereiche Schwarze Loch auf dem innersten stabilen kreisförmigen Orbit (drei Schwarzschildradien: 0,24 Astronomische Einheiten) umkreist (siehe Inset). Dabei verliert es durch die Abstrahlung von Gravitationswellen Bahnenergie. Wird diese Energie dem Objekt von außen wieder zugeführt, kann die Bahn stabilisiert und eine Gravitationswelle mit konstanter Frequenz erzeugt werden.

Milchstraße: ESO/S. Brunier (www.eso.org/public/germany/images/eso0932a/) / CC BY 4.0 (creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode); Gravitationwellen: R. Hurt/Caltech-JPL; LISA-3-D-Daten: Paul McMahon; Inset: Composing nach Odele Straub; Bearbeitung: A.M. Quetz / SuW-Grafik

Botschaft aus dem Zentrum der Milchstraße

Wie könnte eine technologisch hochentwickelte Zivilisation in unserer Galaxis mit anderen Zivilisationen kommunizieren? Mit Gravitationswellen, sagen Wissenschaftler. Berechnungen zufolge ist es energetisch möglich, mit dem Schwarzen Loch im Zentrum des Milchstraßensystems Botschaften zu senden, die wir auf der Erde empfangen können.

Könnte ein Planet in der Umlaufbahn um das extrem massereiche zentrale Schwarze Loch im Zentrum unseres Milchstraßensystems von der Existenz einer weit fortgeschrittenen Zivilisation künden? Die Antwort ist zwar sehr spekulativ, lautet aber ja.

Ist der Mensch einzigartig im Universum?

Auf einem Hügel am Stadtrand schaut ein Mensch gedankenversunken in den Nachthimmel. Die Milchstraße spannt sich wie

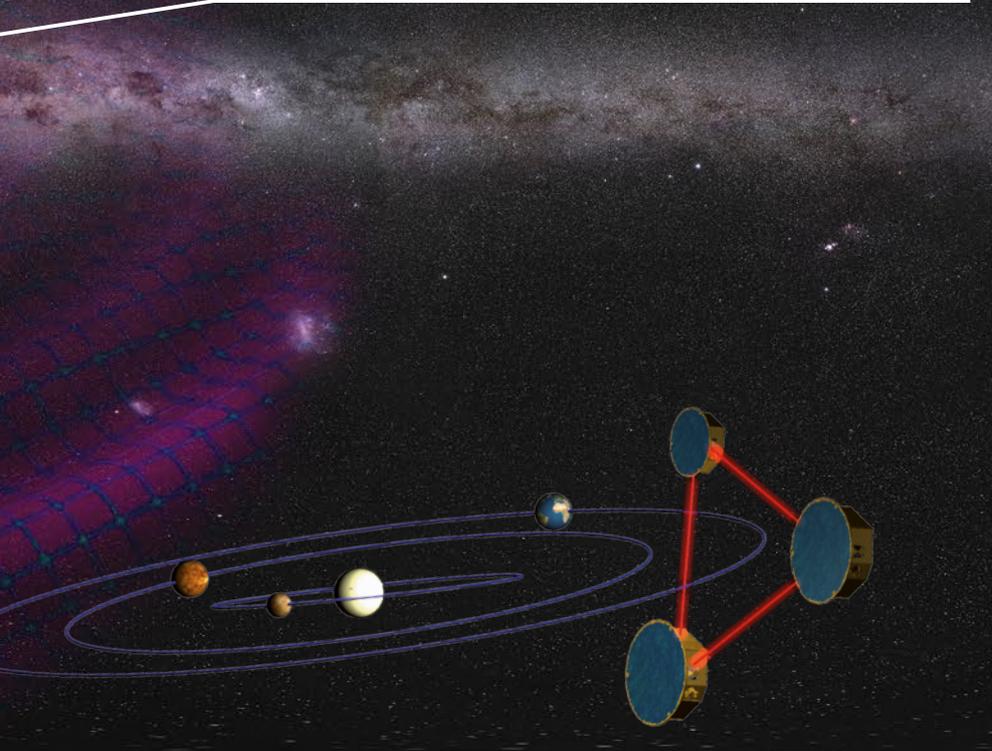
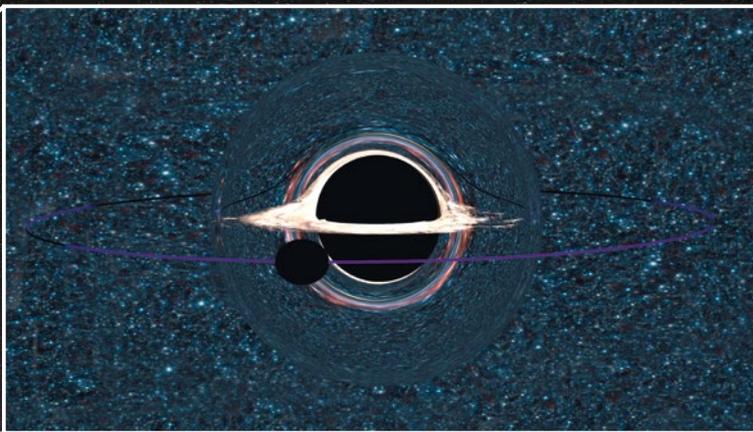
ein verschwommener Lichterkranz über das Firmament. Ihm schwindelt: Das sind alles Sterne. Er erhebt sich langsam – und hebt dabei ab. Erst schwebt er über der Stadt, bald über der Erde, steigt immer höher auf, durch das Sonnensystem und weiter, in den Spiralarm der Galaxis, wo er andere Sonnen mit anderen Erden und anderen Lebewesen findet.

Olaf Stapledon (1886–1950) schickte im Jahr 1937 in seiner wortgewaltigen, philosophischen Utopie »Der Sternmacher« (Originaltitel: »Star Maker«, alternativer

deutscher Titel: »Der Sternenschöpfer«) einen Menschen auf eine fantastische Reise in die Weiten des Kosmos, um das Abenteuer des Menschseins zu ergründen (siehe Bild S. 17 oben). Thematisiert wird dabei eine der ältesten Fragen überhaupt: Ist der Mensch einzigartig im Universum?

Das Wesen von Leben

Erwin Schrödinger gibt im Jahr 1943 am Trinity College in Dublin eine Reihe von Vorlesungen zum Thema »Was ist Leben?«. Er beginnt dabei mit dem zweiten Haupt-



Milchstraße: ESO/S. Brunier (www.eso.org/public/germany/images/eso0932a/) / CC BY 4.0 (creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode); Gravitationswellen: R. Hurt/Caltech-JPL; USA-3-D-Daten: Paul McMahon; Inset: Composing nach Odele Straub; Bearbeitung: A. M. Quetz / SuW-Grafik

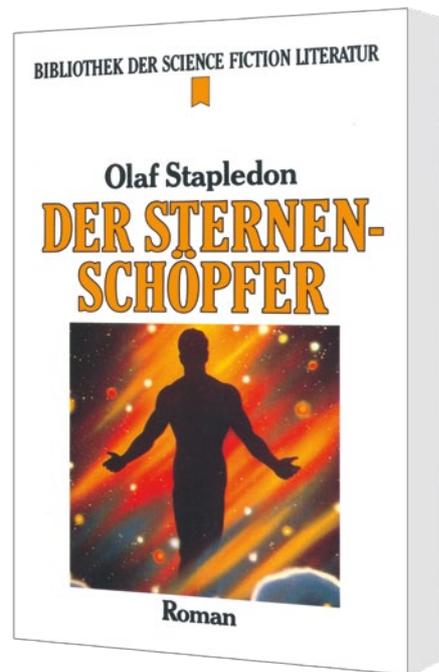
satz der Wärmelehre, gemäß welchem die Entropie eines geschlossenen Systems nur zunehmen oder konstant bleiben kann. Die Entropie als Zustandsgröße der Thermodynamik beschreibt umgangssprachlich die Unordnung eines Systems. Ist es abgeschlossen, dann kann die Entropie nur zu-, aber nicht abnehmen. Beispiel: Die Wassermoleküle in einem Eiskristall haben eine gewisse Ordnung. Beim Zuführen der Schmelzenergie löst sich die Kristallstruktur nach und nach auf, bis nur noch flüssiges Wasser vorliegt, in dem sich die Wassermoleküle voneinander praktisch unbeeinflusst umherbewegen – die Unordnung ist gestiegen.

Die Zunahme der Entropie geschieht so lange, bis ein thermodynamisches Gleichgewicht hergestellt und damit die maximale Entropie des Systems erreicht wird. Jeder Prozess im Universum strebt ein Gleichgewicht an. Ein lebender Organismus aber ist ein hochgradig komplexes, aus Atomen aufgebautes System

von niedriger Entropie, ein energetisches Ungleichgewicht. Leben ist also, erklärt Schrödinger, kein geschlossenes System; es kann dem allgegenwärtigen Zerfall trotzen, indem von außen Energie, unter anderem Nahrung, zugeführt wird. In diesem Sinn sind Stoffwechsel und Aufrechterhaltung eines energetischen Ungleichgewichts bereits ein Indiz für Leben. Es verrät sich dabei durch Biosignaturen. Das sind im einfachsten Fall Gase, die typischerweise nicht in großen Mengen spontan entstehen. Wenn sie in Atmosphären von Planeten nachgewiesen werden, zum Beispiel Methan- oder Sauerstoffgas auf der Erde, kann das – muss aber nicht – ein Hinweis auf Leben sein.

Wo sind sie alle?

Auf dem Weg zum Mittagessen diskutieren im Jahr 1950 vier Physiker, darunter Enrico Fermi, über fliegende Untertassen. Anlass war das wöchentliche Magazin »The New Yorker«, das nach angeblichen Sichtungen



Archiv: A. M. Quetz

Im utopischen Buch »Der Sternenschöpfer« von Olaf Stapledon aus dem Jahr 1937 reist ein Mensch in die Weiten des Kosmos. Die Titelseite stammt von einer Sonderausgabe im Jahr 1982 des Heyne Verlags (ISBN 6-453-30795-X).

von Ufos und dem rätselhaften Verschwinden von Abfallkübeln in der Stadt, einen Cartoon publizierte, der Aliens bei der Abfallentsorgung zeigt. Die Physiker sind sich einig: Das sind Hirngespinnste. Als das Gesprächsthema schon längst ein anderes ist, wirft Fermi plötzlich ein: »Wo sind sie denn alle?« Im Anschluss berechnet er die Wahrscheinlichkeit von erdartigen Planeten, die Leben zulassen und gegebenenfalls sogar eine technologische Zivilisation, und kommt zu dem Schluss, dass wir schon längst außerirdischen Besuch hätten erhalten sollen. Aber in der Praxis sei interstellares Reisen fast unmöglich, da die Distanzen schlicht zu groß wären und technologische Zivilisationen tendenziell nicht lange genug überlebten.

Die wahrscheinlichste Zahl kommunikativer Zivilisationen im Milchstraßensystem berechnet sich mit der Drake-Gleichung, und beläuft sich nach letzten Abschätzungen durch Tom Westby und Christopher J. Conselice von der University of Nottingham, Großbritannien, auf 36.

Die Drake-Gleichung stellte der US-amerikanische Astronom Frank Drake im Jahr 1961 im Green-Bank-Observatorium auf der ersten SETI-Konferenz vor. Er verknüpf-

te mehrere Faktoren, deren Bestimmung mitunter sehr problematisch ist: die Sternentstehungsrate im Milchstraßensystem, der Anteil von Sternen mit Planeten, der Anteil, auf dem Leben möglich ist, und der Anteil, da es tatsächlich entsteht, und so weiter (siehe auch SuW 8/2013, S. 22).

Aliens suchen und benachrichtigen

Es ist denkbar, dass eine Gesellschaft, die sich als Teil des Universums wahrnimmt, einen Weg sucht, sich bemerkbar zu machen. Die Menschheit verschickte ihre erste interstellare Botschaft im Jahr 1974 mit dem Radioteleskop des Arecibo-Observatoriums auf Puerto Rico. Die Nachricht ist seither auf einer 25 000-jährigen Reise zum Kugelsternhaufen Messier 13. Ob sie gerade dort dereinst jemand empfangen wird, ist freilich ungewiss.

Die aktive Suche nach einer außerirdischen Intelligenz, SETI (Search for Extra Terrestrial Intelligence), begann schon gut ein Jahrzehnt vorher mit Radioantennen, die den Himmel systematisch im Frequenzbereich von ein bis zwölf Gigahertz nach unnatürlichen Signalen absuchen. Bislang erfolglos. Radiowellen sind, ebenso wie Mikrowellen, Röntgenstrahlen und das für menschliche Augen sichtbare Licht Teil des elektromagnetischen Spektrums. Wenn diese elektromagnetischen Wellen den Raum durchqueren, nimmt erstens ihre Intensität mit wachsender Distanz quadratisch ab. Zweitens sieht man – wie bei einem Leuchtturm – einen Lichtstrahl nur genau dann, wenn er den Beobachter direkt anleuchtet. In unserer Galaxis gibt es bis zu 400 Milliarden Sterne, und die meisten davon haben mindestens einen Planeten. Aber Welten mit intelligentem Leben, geschweige denn technologisch hochentwickelte Zivilisationen, sind in aller Wahrscheinlichkeit sehr rar und liegen nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich weit auseinander. Das heißt, man findet wohl eher eine Nadel im Heuhaufen als eine extraterrestrische Radiobotschaft im Milchstraßensystem.

Gravitationswellen aus dem Milchstraßenzentrum senden

Wie also soll man in einer Galaxie überhaupt kommunizieren? Mit seinen 4,1 Millionen Sonnenmassen ist das extrem massereiche Schwarze Loch Sagittarius A* (Sgr A*) im Zentrum des Milchstraßensystems ein einzigartiges Objekt an einem einzigartigen Ort. Jede intelligente Spezies

erkennt das früher oder später. Sogar wir Menschen verwenden die nähere Umgebung von Sgr A* mittlerweile als Labor, um Gravitationstheorien von der Erde aus zu testen (siehe SuW 12/2020, S. 22). Hätten wir eine Technologie dafür, würden wir Raumsonden dorthin schicken, um noch genauer hinzuschauen.

Wenn eine Masse um eine andere Masse kreist, entstehen immer Gravitationswellen. Als Folge davon wird Energie aus dem System weggetragen, und die Körper driften aufeinander zu. Diese Geschichte endet stets mit einer Verschmelzung. Der Prozess sendet ein natürliches Gravitationssignal mit einer markant ansteigenden Frequenz aus, einen »Chirp« (siehe SuW 4/2016, S. 24, und SuW 2/2019, S. 38). Unnatürlich wäre eine konstante Frequenz.

Um eine Sonde auf einer stabilen Bahn um das Schwarze Loch zu halten und ein derart konstantes Signal zu erzeugen, muss der natürliche Energieverlust kom-

LISA kann (künstliche) Planeten um das zentrale massereiche Schwarze Loch nachweisen.

pensiert werden, indem das System von außen Energie erhält. Das ist wie bei der Internationalen Raumstation ISS, deren Verlust an Bahnhöhe durch die Reibung mit der Restatmosphäre der Erde mit Raketenantrieben ausgeglichen werden muss. Frequenz und Amplitude von Gravitationswellen hängen von der Distanz zum Schwarzen Loch und der Masse des Satelliten ab. Daraus lässt sich Folgendes berechnen: Auf dem drei Schwarzschildradien großen innersten stabilen kreisförmigen Orbit – im Fall von Sgr A* sind das 0,24 Astronomische Einheiten, etwas weniger als der Bahnradius von Merkur – ließe sich mit der Energie E äquivalent zu einer Sonnenmasse M_{\odot} ($E = M_{\odot} c^2$, $c =$ Lichtgeschwindigkeit) eine kompakte Sonde von einer Jupitermasse eine Milliarde Jahre lang im Umlauf um Sgr A* halten (siehe Bild S. 16).

Das klingt nach viel, ist aber astrophysikalisch vergleichbar mit natürlichen Prozessen. Gravitationswellen durchqueren den Raum ungehindert: Die so erzeugte Frequenz von einem Millihertz ist in der ganzen Galaxie messbar, wenngleich die Amplitude des Signals auch mit zunehmender Distanz abnimmt.

Viele Leser werden sich wohl fragen, wie realistisch das Platzieren einer Son-

de in der Nähe von Sgr A* sein mag, immerhin ist es fast 27 000 Lichtjahre von uns entfernt. Zum Vergleich: Im Rahmen der Breakthrough-Initiative »Starshot« arbeiten Forscher daran, eine Sonde zu Proxima Centauri zu bringen, was wegen der notwendigen Bremsmanöver vermutlich mehr als 100 Jahre dauern wird (siehe SuW 4/2018, S. 24 und S. 32).

Ab dem Jahr 2034 soll LISA, ein Gravitationswellendetektor im All, niedrige Frequenzen messen, wie sie Planetenmassen um massereiche Schwarze Löcher hervorrufen (siehe SuW 4/2019, S. 26). Wir wissen nicht, ob wir die Einzigsten sind, die von den Weiten des Weltalls träumen, und wenn nicht, wo sie alle sind. Aber eines ist sicher: Wenn es in unserer Galaxie auch nur eine technologisch hochentwickelte Zivilisation geschafft hat, eine Sonde in einer stabilen Bahn um Sgr A* zu platzieren, wird LISA ihr Signal messen (siehe Bild S. 16, Inset).

Oder werden vielleicht wir es sein, die eines Tages alle irdischen Konflikte überwinden und als globale Raumfahrtgesellschaft als erste Spezies einen Gravitationswellensender im Orbit um das zentrale extrem massereiche Schwarze Loch im Zentrum der Galaxis bringen und so dem Universum von uns erzählen?

ODELE STRAUB studierte Physik in Zürich, promovierte in Astrophysik in Warschau und forschte nach Aufhalten in Oxford und Paris nun am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik.

Literaturhinweise

Abramowicz, M. et al.: A galactic centre gravitational-wave messenger. *Nature Scientific Reports* 10, 2020

Gast, R.: Planlos durchs Weltall.

www.spektrum.de/artikel/1744458

Gourgoulhon, E. et al.: Gravitational waves from bodies orbiting the galactic center black hole & their detectability by LISA. *Astronomy & Astrophysics* 627, 2019

Westby, T., Conselice, C.J.: The astrobiological Copernican weak and strong limits for intelligent life. *The Astrophysical Journal*, 2020