

# UNHEIMLICHE GIGANTEN

Der Anziehungskraft von Schwarzen Löchern kann sich auch die Astronomie nicht erwehren. Physiker versuchen mit ihrer Hilfe die Entstehung des Universums zu erklären – und die Relativitätstheorie zu beweisen. Von Theo von Däniken

Lange Zeit galten sie lediglich als dunkler Schlusspunkt in der Entwicklung einstmaliger heller und funkelnder Sterne. Ausgebrannt kollabieren diese am Ende ihrer Lebenszeit und verdichten ihre Masse – bis zum Zehnfachen der Sonne – zu einer Kugel von wenigen Kilometern Durchmesser. Ein Objekt mit ungeheurer Anziehungskraft entsteht, das nichts wieder loslässt, was jemals in seinen Bann gezogen wurde, nicht einmal das Licht: Schwarze Löcher werden die unheimlichen Giganten deshalb genannt, weil sie alles verschlingen, was ihnen zu nahe kommt. Seit einigen Jahren geraten auch die Astronomen immer mehr in den Bannkreis ihrer Anziehungskraft. Denn das Bild der Schwarzen Löcher hat sich grundlegend gewandelt: Nicht mehr als vernichtendes Ende kosmologischer Entwicklungen, sondern als die treibende Kraft, die unser Universum formt und gestaltet, werden die Schwarzen Löcher nun angesehen.

Grund dafür ist eine neue Klasse von Schwarzen Löchern, die erst in den 1990er-Jahren entdeckt wurde: die sogenannten Supermassiven Schwarzen Löcher. Im Gegensatz zu stellaren Schwarzen Löchern, die höchstens die zehnfache Sonnenmasse erreichen, können diese kosmischen Monster die Masse von mehreren Millionen bis Milliarden Sonnen umfassen. In ihren aktiven Phasen verschlingen sie Gase in ungeheureren Mengen und machen auch vor ganzen Sternen nicht halt. Wie die Materie, die dabei derart beschleunigt und erhitzt wird, dass sie in allen Wellenbereichen zu strahlen beginnt und die hellsten beobachtbaren Objekte im Universum – die Quasare – schafft, so entbrennt auch immer mehr das Interesse der Wissenschaft an diesen gewaltigen Energiezentren.

Das ist verständlich, denn nicht nur die Kosmologen erhoffen sich von ihnen Antworten

auf bisher ungelöste Fragen. Die Supermassiven Schwarzen Löcher könnten auch einen lang gehegten Wunsch der modernen Physik Wirklichkeit werden lassen: den Beweis der Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein. Kommen sich nämlich zwei solche Giganten nahe genug oder kollidieren gar miteinander, werden Kräfte frei, die das Universum richtiggehend aus den Fugen bringen. Dies jedenfalls sagt Einsteins Theorie voraus: Die Gravitationskräfte eines solchen Ereignisses müssten die Raumzeit verkrümmen und sogenannte Gravitationswellen entstehen lassen. Bisher ist es allerdings noch nicht gelungen, diese Wellen nachzuweisen. Zu gering sind die Ver-

zerrungen in der Raumzeit, um – selbst bei stärksten Ereignissen – auf der Erde spürbar zu sein. Gibt es die Wellen aber tatsächlich, dann wären sie ein Beweis für die grundlegende Theorie der modernen Physik.

In einem gross angelegten Projekt, der Laser Interferometer Space Antenna, kurz LISA, wollen deshalb die Amerikanische und Europäische Weltraumagentur, NASA und ESA, Gravitationswellen im Weltall messen. «LISA ist eines der ambitioniertesten und mindestens von seinen Abmessungen her sicherlich das grösste je in Angriff genommene physikalische Experiment», erklärt Philippe Jetzer, Professor am Institut für Theoretische Physik an der Universität Zürich und eines von rund 50 Mitgliedern des Wissenschaftlichen Beirats von LISA. Drei Satelliten sollen im Weltraum so stationiert werden, dass sie ein gleichseitiges Dreieck mit einer Seitenlänge von fünf Millionen Kilome-

tern bilden (zum Vergleich: Der Abstand Erde-Mond beträgt zwischen 360 000 und 400 000 Kilometer). Zwischen den drei Satelliten werden Laserstrahlen hin und hergeschickt. Das Lichtdreieck wird so im Schlepptau der Erde um die Sonne kreisen und sich dabei pro Orbit auch einmal um sich selber drehen. «Wenn eine Gravitationswelle auf LISA trifft, dann wird dieses Dreieck durchgerüttelt und deformiert», erklärt Jetzer. Die «Erschütterungen», die LISA messen soll, bewegen sich dabei im Bereich von Bruchteilen von Atomdurchmessern.

Die Anforderungen an die Technologie, die Satelliten zu stationieren, auszurichten und in der Bahn zu halten, sind deshalb gewaltig, der Zeitrahmen für LISA ist entsprechend gross: 2011 soll eine Pathfinder-Mission starten, in der einzelne Komponenten von LISA getestet werden. Die eigentliche Mission ist für 2018 geplant. Epo-

---

*Supermassive Schwarze Löcher verschlingen Gase in ungeheuren Mengen und machen auch vor ganzen Sternen nicht halt.*

---

chal sind nicht nur die Dimensionen des Projekts, epochal sind auch die Erwartungen der Wissenschaft an seine Ergebnisse: «Die Gravitationswellen», sagt Jetzer, «sind die einzigen Wellen, die wir bisher noch nicht messen können. Wenn dies möglich wird, so wird daraus eine ganz neue Astronomie entstehen. Denn die Astrophysik würde mit der Grundlagenphysik verschmelzen, wie dies in der Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben wird.»

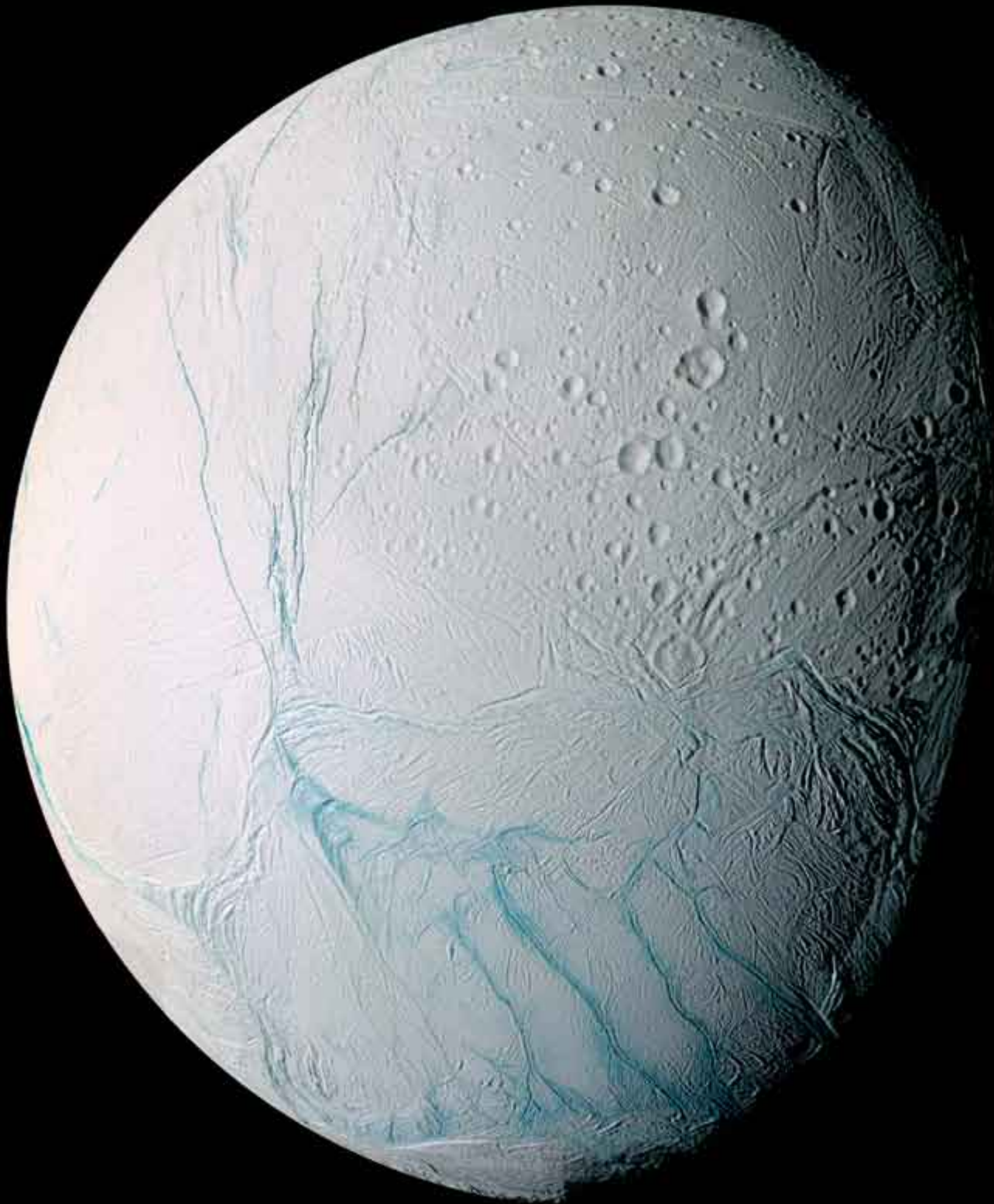
## GALAKTISCHE GENERATOREN

Doch gibt es überhaupt Kollisionen zwischen Supermassiven Schwarzen Löchern, die Gravitationswellen erzeugen? Antwort auf diese Frage sucht der Kosmologe Lucio Mayer – SNF-Förderungsprofessor am Institut für Theoretische Physik der Universität Zürich – nicht am Himmel, sondern im Computer. Weil die galaktischen Zusammenstösse sich in Zeiträumen



#### **KLEINER TITAN**

Hyperion ist ein kleiner Saturn-Mond mit einem Durchmesser von rund 250 Kilometern. Seine schwammartige Struktur verdankt er den Kratern, mit denen seine Oberfläche übersät ist. Der Mond erinnert an die Bausteine grösserer Planeten, die durch die Kollision mit kleineren Himmelskörpern entstanden sind.



#### UNTERIRDISCHE OZEANE

Eine hoch aufgelöste Aufnahme des Saturn-Mondes Enceladus, festgehalten vom Satelliten Cassini. Es wird angenommen, dass Enceladus über riesige unterirdische Ozeane mit Salzwasser verfügt, in denen organisches Leben möglich sein könnte.

abspielen, die sich der direkten Beobachtung entziehen, simuliert Mayer solche Vorgänge in aufwendigen Berechnungen auf leistungsfähigen Supercomputern.

15 Milliarden Jahre – die Zeit 700 Millionen Jahre nach dem Urknall bis heute – laufen auf Mayers Computerbildschirm als Film in wenigen Minuten ab: Da klumpt sich eine amorphe Gasmasse zu kleinen Haufen zusammen, Nebelfetzen ziehen vorbei und werden aufgesogen. Langsam bilden sich rotierende spiralförmige Sternenhaufen, die wild durcheinanderwirbeln und immer wieder miteinander kollidieren. Dabei werden sie zunächst arg zerzaust, verbinden sich aber bald zu einem einzigen, grösseren Wirbel. Mit der Zeit bildet sich ein zentrales System, das sich immer mehr anreichert und weitere Stern- und Gasnebel in seinen Bann zieht. Am Ende präsentiert sich eine mittelgrosse Galaxie, unserer Milchstrasse nicht unähnlich.

Die treibende Energie, die dieses System entstehen und wachsen lässt, so die heute gängige Annahme, ist ein Supermassives Schwarzes Loch in dessen Zentrum. Innert weniger Jahre hat sich die Ansicht durchgesetzt, dass Supermassive Schwarze Löcher die meisten spiralförmigen und elliptischen Galaxien im innersten zusammenhalten und antreiben. Direkte Beweise dafür fehlen zwar, doch verschiedene Beobachtungen machen die Hypothese sehr wahrscheinlich. Kronzeuge dieser Theorie ist unsere eigene Galaxie, die Milchstrasse. Astronomen des Max Planck-Instituts für Extraterrestrische Physik haben aufgrund langjähriger Beobachtungen der Umlaufbahn von Sternen im Zentrum der Galaxie berechnet, dass sich dort «mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit» ein Schwarzes Loch mit rund vier Millionen Sonnenmassen befindet.

Die Frage, die Mayer am meisten interessiert: «Was passiert, wenn zwei kleinere Galaxien zusammenstossen und sich die beiden Supermassiven Schwarzen Löcher im Zentrum verbinden?» In diesem Zustand, einem sogenannten binären System, müssten sie gemäss der Relativitätstheorie beginnen, Gravitationswellen auszustrahlen. Vor zwei Jahren ist es Mayer gelungen, erstmals die Annäherung zweier Galaxien und ihrer zentralen Super-

massiven Schwarzen Löcher in einer Computersimulation darzustellen. Rund zwei Millionen Stunden haben mehrere Supercomputer dafür gerechnet.

#### GALAXIEN AUF KOLLISIONSKURS

Die Simulation zeigte, dass zwei Galaxien auf Kollisionskurs in relativ kurzer Zeit ein System bilden, in dem die beiden Schwarzen Löcher einander umkreisen. Eine immer dichter werdende Gas-Scheibe im Zentrum dieses Systems bremst die Bewegung der Schwarzen Löcher auf ihrem Orbit umeinander und bewirkt, dass die Fliehkräfte geringer werden: Die beiden Schwarzen Löcher rücken in der Folge immer näher zusammen. Wie es genau weitergeht, das konnte Mayer noch nicht detailliert darstellen; dazu muss er die Auflösung seiner Simulationen weiter verfeinern. Doch jede Verfeinerung bringt wieder neue Parameter ins Spiel, da sich die Umgebungsverhältnisse im System dynamisch verändern. Mayer muss dabei verschiedenste Bereiche der Physik berücksichtigen, etwa die Teilchenphysik, um

men, dass sie Gravitationswellen auszustrahlen beginnen, so interessiert sich Jetzer als Relativitätstheoretiker dafür, wie die Gravitationswellen beschaffen sind, die von einem solchen System ausgehen. Denn wenn LISA dereinst tatsächlich Gravitationswellen misst, dann müssen diese möglichst genau interpretiert werden können. «Man muss aus den Signalen die Informationen über ihre Quelle wieder herausfiltern können», erklärt Jetzer. Die Gravitationswellen erlauben Rückschlüsse sowohl auf die Masse als auch auf die Position, die Distanz und den Spin, also die Drehung eines Systems, das die Wellen verursacht.

Die Berechnungen zu den Wellenmustern sind jedoch sehr komplex und werden umso aufwendiger, je mehr Parameter berücksichtigt werden. Jetzer und seine beiden Mitarbeiter Antoine Klein und Mauro Sereno haben in einer jüngst publizierten Arbeit Berechnungen für verschiedene Wellenmuster durchgeführt und gezeigt, welche Auswirkungen sie auf die Präzision, beispielsweise der Distanzbestimmung, haben. Je besser man weiss, wo genau und in

---

*Supermassive Schwarze Löcher halten die meisten spiralförmigen und elliptischen Galaxien im Innersten zusammen und treiben sie an.*

---

die Effekte der theoretisch angenommenen «kalten dunklen Materie» einzuschliessen, oder die aktuellste Forschung über Sternbildung und Strömungslehre. Denn selbst Prozesse auf der Ebene einzelner Sterne, wie etwa Supernova-Explosionen, können ungeahnte Rückkoppelungen und Wechselwirkungen auf das ganze System haben, die Mayer in seinen Modellierungen abbilden muss. So haben er und sein Doktorand Simone Callegari in einer kürzlich veröffentlichten Arbeit über die Fusion von Schwarzen Löchern mit ungleich grossen Massen herausgefunden, dass nicht nur Dichte und Temperatur des Gases wichtig sind, sondern auch dessen Verteilung: Ist es gleichmässig verteilt, ist die Bremswirkung und damit die Wahrscheinlichkeit, dass die beiden Schwarzen Löcher fusionieren, grösser.

Während Mayer sich damit befasst, wie Supermassive Schwarze Löcher so weit kom-

welcher Distanz sich eine Fusion von Supermassiven Schwarzen Löchern ereignet, umso eher kann man diese mit anderen Beobachtungsinstrumenten, etwa mit optischen Teleskopen, ebenfalls ins Visier nehmen.

Jetzer ist gespannt, ob es mit LISA gelingt, endlich mehr Licht in die dunkelsten Objekte des Universums zu bringen, die keineswegs nur tote Giganten sind, die mit dem Licht auch jegliche Erkenntnismöglichkeit zu verschlingen drohen. Vielmehr bergen die Schwarzen Löcher möglicherweise den Schlüssel zur uralten Menschheitsfrage, wie das Universum entstanden ist. Wenn nicht das, dann könnten sie immerhin einen Beweis für Einsteins Relativitätstheorie liefern, auf der die moderne Physik beruht.

KONTAKT Prof. Philippe Jetzer, jetzer@physik.uzh.ch, Prof. Lucio Mayer, lmayer@physik.uzh.ch