Blick ins Nichts

Astronomie Das erste Bild eines schwarzen Lochs aus einer fernen Galaxie ist ein Triumph der Wissenschaft, es erlaubt tiefe Einblicke in das Wesen des Universums. Die Schwerkraftmonster bergen sogar, so glauben die Forscher, den Schlüssel zu einer Art Weltformel.

GRÖNLAND

(seit 2018)

Teleskope

MEXIKO

ls Thomas Krichbaum das Bild erstmals auf dem Schirm seines Laptops sah, mochte er es nicht glauben. Rund, schwarz, drum herum ein verschwommen leuchtender Kranz: Es sah genauso aus, wie er es erwartet hatte. Vielleicht schien es ihm gerade deshalb so unwirklich. Er hatte ja schon viele solcher Bilder gesehen - nur dass dieses, anders als all die anderen, real war.

Der Bonner Radioastronom hat die vergangenen Wochen und Monate damit verbracht, die Analyse, die dem Bild dieses Leuchtkranzes zugrunde liegt, wie-

Hawaii

der und wieder zu prüfen. Am Ende ist er zu der Überzeugung gelangt: Ja, alles spricht dafür, dass es sich wirklich und wahrhaftig um das Abbild eines schwarzen Lochs handelt.

Die Veröffentlichung dieses und drei weiterer Bilder CHILE lässt sich als Triumph menschlichen Entdeckergeistes verstehen und als ein Rekord vermessender Präzision. Acht Teleskope an entlegenen Orten der Erde mussten dazu ihre mächtigen Radioschüsseln exakt synchron auf denselben winzigen Punkt im Sternbild Jungfrau richten. Zwei Jahre hat es gedauert, bis aus den aufgefangenen Signalen die jetzt veröffentlichten Bilder destilliert waren.

Krichbaum ist an jenen vier Apriltagen des Jahres 2017, an denen die Bilder entstanden, mit der Schneeraupe hinauf zum Observatorium auf dem Pico Veleta in der spanischen Sierra Nevada gerumpelt. Dort hatte er mit Orkanböen zu kämpfen - keine Idealbedingung, um mit einer 30-Meter-Schüssel millimetergenaue Messungen durchzuführen. Fortlaufend tauschte er sich mit den Kollegen auf Hawaii, in Arizona, Mexiko und in der Antarktis über das dort herrschende Wetter aus. Das Wichtigste aber war, was das Herzstück der Messkampagne zu melden hatte: das Teleskop »Alma«. Es wurde vor acht Jahren in 5000 Meter Höhe in der chilenischen Atacamawüste in Betrieb genommen.

Jedes der beteiligten Geräte starrte an diesen vier Tagen auf einen Fleck, der am Himmel etwa so groß wie eine Orange auf dem Mond erschiene. Über das, was sie dort sahen, zeichneten die Teles-

kope gigantische Mengen an Daten auf.

FRANKREICH Um sie deuten zu kön-(seit 2018) 🚀 nen, mussten die For-SPANIEN scher alle Festplatten an zwei Datenverarbeitungszentren Das Netzwerk verschicken, das eides Event Horizon ne am Bonner Telescope Max-Planck-Institeilnehmende tut für Radioastronomie, das andere Teilnahme geplant im Haystack-Observatorium bei Boston. Dort wurden die Ergebnisse aller beteiligten Geräte abgeglichen, korrigiert, korreliert und schließlich zum Bild eines virtuellen Teleskops fast von der Größe des Planeten Erde zusammengesetzt. Dann erst tauchten aus dem Ozean von Daten die

In nie zuvor erreichter Auflösung ist auf den Bildern das Zentrum der elliptischen Riesengalaxie Messier 87 (M87*) zu erkennen. Und das Ding, dessen Schatten darauf sichtbar wird, ist ungeheuerlich: ein supermassives schwarzes Loch, schwer wie 6,5 Milliarden Sonnen. Es zeigt den Rand des Nichts, es verkörpert Wirklichkeit gewordene Mathematik, es öffnet den Blick ans Ende der Welt. Auch Physiker können nur stammeln, wenn sie von die-

Schemen des fernen schwarzen Lochs auf.

Antennenschüsseln des »Alma«-Observatoriums in der chilenischen Atacamawüste

DER SPIEGEL Nr. 16 / 13.4.2019



sem rätselhaftesten aller Objekte, die das Universum zu bieten hat, sprechen.

Schwarze Löcher ballen gewaltige Massen auf einem einzigen Raumpunkt zusammen. Nirgendwo sonst wirken so starke Gravitationsfelder auf so engem Raum. Deshalb sind schwarze Löcher der Ort, an dem Theoretiker die Antwort darauf zu finden hoffen, wie sich die Naturgesetze von Mikro- und Makrowelt, von Atomen und Galaxien, zu einer allumfassenden Weltformel vereinigen lassen.

Anton Zensus dagegen betrachtet schwarze Löcher vor allem als ultimative Herausforderung für ihn als beobachtenden Radioastronomen. Die Karriere des Bonner Max-Planck-Direktors lässt sich begreifen als Jagd nach diesem einen Bild. Schon als Jungforscher hatte er, damals am Caltech im kalifornischen Pasadena, den Teilchenstrahl (Jet) untersucht, den M87* ins Weltall schießt. Schritt für Schritt wirkte er dann daran mit, Empfindlichkeit und Auflösung der Radiobilder weiter zu steigern.

Eine immer größere Zahl von Teleskopschüsseln korrelierten die Radioastronomen miteinander, zu immer kürzeren Wellenlängen stießen sie vor.

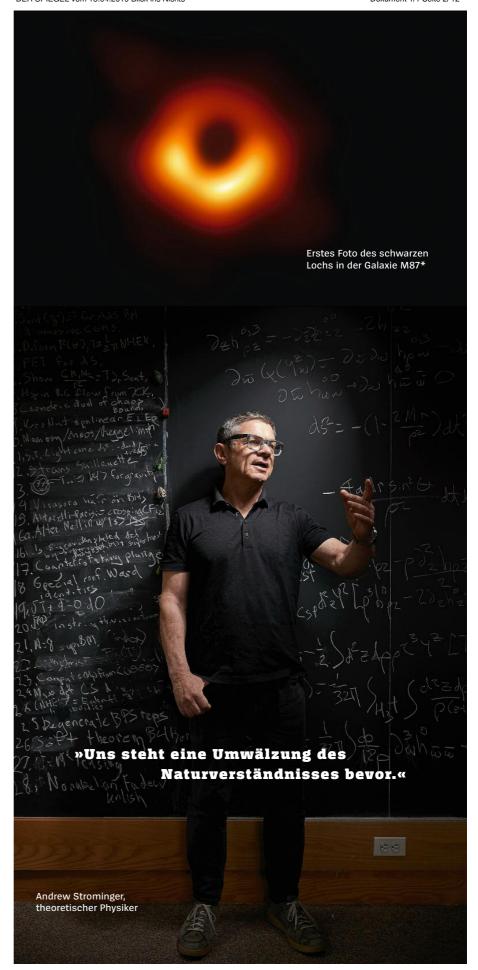
Vor zehn Jahren war die Zeit reif für das »Event Horizon Telescope« (EHT). Zensus und seine Mitstreiter rechneten und kamen zu dem Schluss: Wenn es ihnen gelänge, Teleskope weltweit zu einem Verbund zu koppeln, und wenn sie dann M87* bei einer Wellenlänge von 1,3-Millimetern ins Visier nähmen, dann müsste das Objekt im Zentrum dieser Galaxie Kontur annehmen. Kurzum: Das schwarze Loch müsste sichtbar werden.

Astrophysiker vermuten, dass im Zentrum vieler Galaxien supermassive schwarze Löcher sitzen. Die meisten allerdings sind viel zu weit weg, als dass sich ihr Bild räumlich auflösen ließe. Nur in zwei Fällen zeigt sich die Natur den Astronomen gnädig.

Zum einen ist da die Radioquelle im Zentrum unserer Milchstraße. Sie ist im Sternbild Schütze (Sagittarius) verortet, die Astronomen haben sie Sgr A* getauft. Das dort vermutete schwarze Loch liegt 26 000 Lichtjahre von der Erde entfernt, und es vereint die Masse von vier Millionen Sonnen in sich. Das würde es gerade eben groß genug erscheinen lassen, um mit dem EHT sichtbar zu sein.

Zum anderen M87*: Dieses schwarze Loch ist mehr als tausendmal weiter von der Erde entfernt, doch zugleich auch gut tausendmal schwerer und damit größer. Deshalb erscheinen M87* und Sgr A* von der Erde aus betrachtet in ähnlicher Größe am Himmel.

Das EHT-Team hat im April 2017 beide Quellen beobachtet. Bei der Auswertung jedoch entschieden die Forscher, sich zu-



Titel

nächst auf M87* zu konzentrieren. Denn Sgr A* ist klein und deshalb dynamisch. Binnen Stunden wirbelt das Gas um diesen Schlund herum. Die Folge: Das Bild verwackelt. Aber aufgeben wollen die Forscher nicht: Sie kündigten an, bald wieder vor die Presse treten zu wollen, und dann soll es nicht nur ein Foto, sondern einen Film zu bestaunen geben.

Vorerst aber präsentierten sie stolz den Plasmakranz von M87*. Ihr Teleskop, sagen sie, gucke fast in Draufsicht auf die Scheibe, in der das Gas im Uhrzeigersinn rund um das Loch strudle. Um rund 18 Grad ist die Drehachse den Modellrechnungen zufolge gegenüber der Sichtlinie gekippt.

Damit allerdings endet die Einigkeit. Über weitere Einzelheiten gehen die Meinungen auseinander: Lässt sich der Drehimpuls des schwarzen Lochs bestimmen? Sind Wurzeln des Jets zu erkennen? Und stimmt es, dass der Feuerkranz flackert? Es wird noch viel gestritten werden über dieses Bild.

ie Idee, dass es schwarze Löcher geben müsse, wurde an der Russlandfront geboren, im Feldlager der deutschen Artillerie im Ersten Weltkrieg. Der Vater des Gedankens war Karl Schwarzschild, der Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam und einer der herausragenden Astronomen seiner Zeit. Um zu beweisen, dass er als deutscher Jude patriotisch war, hatte er sich freiwillig zum Kriegsdienst gemeldet.

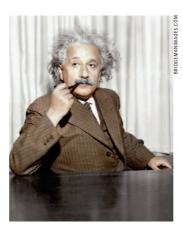
Auch als Soldat blieb Schwarzschild der Wissenschaft treu. Gerade hatte er, ganz im Sinne seines neuen Arbeitgebers, eine Abhandlung Ȇber den Einfluss von Wind und Luftdichte auf die Flugbahn eines Geschosses« abgeschlossen, da bekam er den Aufsatz eines gewissen Albert Einstein in die Finger.

Weltweit diskutierte die Fachwelt damals, was wohl die frisch veröffentlichten Gleichungen des Berliner Gelehrten bedeuten mochten. Doch keiner begriff so schnell wie Schwarzschild die ungeheuerliche Sprengkraft, die Einsteins »Allgemeine Relativitätstheorie« in sich barg. Er beschloss, »Hrn. Einsteins Resultat in vermehrter Reinheit erstrahlen zu lassen«, und begann zu rechnen.

Bald hatte der Leutnant der Feldartillerie das »Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie« ermittelt. Die Arbeit enthält – wenngleich noch nicht unter diesem Namen – die Idee des schwarzen Lochs.

Schwarzschild kam nicht mehr dazu, seine Ergebnisse der Fachwelt vorzutragen. Der Vater der schwarzen Löcher erkrankte an einem schweren Hautleiden, er wurde

Sternstunden der Astronomie



Die Erde kreist um die Sonne

Durch von ihm weiterentwickelte Teleskope beobachtet Galileo Galilei (1564 bis 1641) das Sonnensystem – dabei findet er Belege für das heliozentrische Weltbild.

Schwerkraft

Isaac Newton (1643 bis 1727) beschreibt eine universelle Kraft: die Gravitation. Darüber hinaus fertigt er auch das erste praktikable Spiegelteleskop an.

Einstein hatte recht

Der Brite Arthur Eddington beobachtet, dass Licht durch die Gravitation der Sonne abgelenkt wird (1919) und weist so die gerade von Albert Einstein aufgestellte Allgemeine Relativitätstheorie nach.

Ausdehnung des Universums

Durch die sogenannte Rotverschiebung im Licht von Galaxien kommen der Belgier Georges Lemaître (1927) und der Amerikaner Edwin Hubble (1929) zu dem Schluss, dass das Universum expandiert.

Eine zweite Erde?

Die Schweizer Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz schaffen es, den ersten sicheren Nachweis eines Planeten außerhalb unseres Sonnensystems zu erbringen (1995).

Gravitationswellen

Forschern des Ligo-Projekts gelingt der direkte Beleg von Gravitationswellen (2016). Sie entstanden bei der Kollision zweier schwarzer Löcher. von der Front ins heimische Potsdam überstellt und starb dort am 11. Mai 1916 gerade einmal 42-jährig.

Einstein überbrachte der Preußischen Akademie der Wissenschaften die Todesnachricht. Er würdigte die Leistung des vorzeitig verstorbenen Kollegen, sein geistiges Erbe aber verkannte er: Die Schlussfolgerungen, die Schwarzschild aus Einsteins Theorie gezogen hatte, waren sogar dem Meister selbst zu radikal.

In seiner Allgemeinen Relativitätstheorie hatte Einstein beschrieben, wie Materie den Raum um sich herum verformt und welche Kraft diese Verformung wiederum auf die Materie ausübt. Auf diese Weise waren in Einsteins Feldgleichungen Raum und Materie zu einem dynamischen Ganzen miteinander verwoben.

So komplex schien das Wechselspiel von Wirkung und Gegenwirkung in diesen Formeln zu sein, dass Einstein wenig Hoffnung hatte, exakte Lösungen zu finden. Genau das jedoch war Schwarzschild für den Sonderfall einer einzelnen punktförmigen Masse gelungen. Und die Lösung, die er fand, hatte es in sich.

Der »Massenpunkt«, den Schwarzschild in seiner Arbeit behandelte, krümmt den Raum rund um sich herum. In großer Entfernung ist der Effekt unmessbar klein, doch wächst er, je näher man der Masse kommt, bis ins Unermessliche. Der Raum in seiner nächsten Nähe ist so stark verbogen, dass selbst Licht nicht mehr entkommen kann. Die von der Masse ausgesandten Strahlen sind in einem Knäuel aus Raum und Zeit gefangen.

Als »Ereignishorizont« wird heute dieses Lichtgefängnis rund um den Massenpunkt bezeichnet. Es ist ein Loch, wie aus dem Raum herausgeschnitten. Ein Raumschiff, das in diesen Schlund hineinfiele, verschwände auf Nimmerwiedersehen darin. Nie wieder dränge ein Signal von ihm nach draußen.

Und mehr noch: Zusammen mit dem Raum wird auch die Zeit verzerrt. Die Folge ist, dass Uhren bei der Annäherung an den Ereignishorizont immer langsamer zu laufen scheinen, bis sie schließlich ganz zum Stillstand kommen. Deshalb wird von außen nie jemand ein Raumschiff in diesem Loch verschwinden sehen. Es wird vielmehr so scheinen, als wäre das Bild seines letzten Lebewohls bis in alle Ewigkeit auf der Oberfläche des Lochs eingefroren.

All das war Einstein nicht geheuer. Er fürchtete, dass ein Raum mit Löchern darin unweigerlich kollabieren würde. Er war überzeugt, dass die Natur so etwas nicht zulasse. Deshalb rechnete er, bis er bewiesen zu haben glaubte, dass es schwarze Löcher nicht geben könne.

So also verleugnete Einstein den kühnsten Teil seiner eigenen Idee. Hier irrte er,

DER SPIEGEL Nr.16 / 13.4.2019

Titel

doch wog sein Urteil schwer. Dass der Urheber der Relativitätstheorie selbst die Existenz schwarzer Löcher für unmöglich hielt, stärkte die Fraktion der Zweifler. Es sollte rund 50 Jahre dauern, bis Schwarzschilds Idee in der Fachwelt schließlich ernst genommen wurde.

Gewiss, es war nicht Einsteins Schuld allein. Auch andere Gelehrte waren skeptisch. Vor allem aber bestimmte erneut der Krieg das Schicksal der Schwerkraftmonster.

Im Jahr 1939 stellte der US-Physiker Robert Oppenheimer Überlegungen an, die der Idee der schwarzen Löcher zum Durchbruch hätten verhelfen können: Hinlänglich große Sterne, so argumentierte er, implodierten am Ende ihres Lebens unweigerlich in eine Raumzeit-Singularität.

Doch das Erscheinungsdatum seiner Arbeit war der 1. September – an dem Tag marschierten Hitlers Truppen in Polen ein. Unvermittelt zog damit nun eine neue Form der Vernichtung die Aufmerksamkeit der Physiker auf sich. Oppenheimer und all jene Kollegen, die sich gerade noch für das Inferno beim Tod ferner Sterne interessiert hatten, wandten sich nun der Aufgabe zu, das Sternenfeuer auf der Erde zu entfachen. Erst als die Atombombe gezündet und der Krieg beendet war, rückte die Frage nach Schwarzschilds rätselhafter Singularität wieder in den Vordergrund.

Sgr A*, der Moloch im Zentrum der Milchstraße, war zu diesem Zeitpunkt längst entdeckt – nur dass niemand davon wusste. Schon in den Dreißigerjahren hatte ein Radiotechniker eine Quelle im Sternbild Schütze ausgemacht, die den Telefonverkehr über den Atlantik störte.

Die Astronomen jedoch interessierten sich nicht für das Phänomen. Sie ignorierten die Störquelle, so heftig diese auch funken mochte. Es scheint, als wären sie demselben Motto gefolgt, welches zuvor schon

die theoretischen Physiker beherzigt hatten: dass nicht sein kann, was nicht sein darf. Die Vorstellung, dass irgendwo am Himmel ein Monster schlummerte, das viele Millionen Male stärker als die Sonne strahlte, schien ihnen wohl zu ungeheuerlich, um ihr ernsthaft nachzugehen.

Erst als die Radartechniker, die im Krieg feindliche Flugzeuge aufgespürt hatten, ihre Antennen zunehmend auf den Radiohimmel richteten, bestätigte sich, dass dort auch andere Galaxien als enorm strahlkräftige Radioquellen funken.

In den Sechzigerjahren regte sich dann langsam der Verdacht, dass es sich hier womöglich um Schwerkraftfallen handeln könnte, wie sie einst Schwarzschild beschrieben hatte. Doch selbst da blieb der Widerstand innerhalb der Physikergemeinde groß. Es sollte weitere Jahrzehnte dauern, bis sich die Einsicht durchsetzte, dass schwarze Löcher wirklich und wahrhaftig möglich sind.

ine steile Stiege führt hinauf ins Dachgeschoss von Jefferson Hall. Aus einer Nische dringt das Gemurmel von Doktoranden, die

über eine an die Tafel gekritzelte Formel diskutieren. Sonst herrscht Stille in dieser Denkerklause, in der Andrew Strominger über die tiefsten Rätsel des Universums nachgrübelt.

Oft sitzt er nur auf seinem Sofa und denkt. Nur wenn er von Einsteins Feldgleichungen spricht, gerät er ins Schwärmen: »Sie sind betörend schön«, sagt er. Und: »Sie hören nicht auf, uns zu beschenken.« In den Formeln, die Einstein vor gut hundert Jahren niederschrieb, stecke unermesslicher Reichtum: »Sie bescheren uns immer neue Überraschungen«, sagt Strominger.

Einen erheblichen Teil seines akademischen Lebens hat der Physiker der Harvard-Universität diesen Gleichungen gewidmet. Er hat die Koordinaten, in denen sie gefasst sind, hin- und hergewendet, er hat sie in hochdimensionale Räume transformiert und immer neue Finessen aufgedeckt.

Gerade die vergangenen Monate waren für Strominger eine aufregende Zeit. Denn wieder einmal haben ihm Einsteins Gleichungen ein Geheimnis offenbart, über dessen Bedeutung er nun brütet. Er hat herausgefunden, dass schwarze Löcher, die der Lehrmeinung zufolge außer ihrer Masse, ihrer elektrischen Ladung und ihrem Drehimpuls über keinerlei weitere Merkmale verfügen, vielleicht doch noch verborgene Eigenheiten haben.

Sein neues Theorem sieht Strominger als kleinen Schritt auf dem Weg zu seinem großen Ziel: Er will das Problem der Quantengravitation knacken.

Dieses Vorhaben klingt vermessen. Viele der genialsten Physiker haben sich bereits daran versucht, Einsteins Raumzeit-Theorie mit den mikroskopischen Gesetzen der Quantenwelt zu versöhnen. Und alle sind sie gescheitert.

Doch inzwischen seien wichtige Fortschritte vollbracht, sagt Strominger. Langsam komme das Ziel in Sicht. Zwar will er keine Prognose wagen, wie weit der Weg noch ist. Eines aber glaubt er mit Sicherheit zu wissen: »Die Lösung, wie auch immer sie aussieht, kreist rund um schwarze Löcher.«

Ehedem, als Schwarzschild seine unheimlichen Raumzeit-Singularitäten postulierte, hätten diese den Physikern Angst gemacht, sagt Strominger. Sogar John Archibald Wheeler, der den Begriff »schwarzes Loch« prägte, habe sich schwer mit ihnen getan. »Er sprach von der größten

Schwarze Magie

Paradoxe Raumzeit-Effekte im Bereich des Ereignishorizonts

1 Wollte ein Astronaut in seinem Raumschiff ein schwarzes Loch ansteuern, so wäre dies zwar eine Reise ohne Wiederkehr, jedoch voller erstaunlicher Phänomene. Ein in sicherer Entfernung verbleibender Beobachter würde ganz andere Eindrücke gewinnen als





2 Auf einer spiralförmigen Bahn bewegt sich der Reisende auf das Gravitationsmonster zu und wird dabei fast bis auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Der Raumfahrer spürt die Anziehungskraft des schwarzen Lochs jedoch nicht, solange er selbst und seine Umgebung sich in freiem Fall befinden.





Krise aller Zeiten«, sagt Strominger. »Dabei wissen wir heute, dass schwarze Löcher für uns Physiker die größte Chance aller Zeiten sind.«

Es liege eine Revolution in der Luft, sagt Strominger: »Uns steht eine Umwälzung des Naturverständnisses bevor, die mindestens so tiefgreifend sein wird, wie es vor hundert Jahren die Erschütterung unseres Konzepts von Raum und Zeit durch Einsteins Relativitätstheorie war«, sagt er.

Endlich gibt es nun handfeste Teleskopaufnahmen, anhand deren er seine Ideen überprüfen kann. Oft hat er in jüngster Zeit mit Shep Doeleman, dem Leiter des EHT-Projekts, zusammengesessen und über die Bilder beraten, die da entstanden.

Nicht immer war es leicht, einander zu verstehen, wenn der eine von der »konformen Symmetrie« der Einstein-Gleichung und der andere von »phasentreuer Korrelation« sprach. Doch Strominger ist sich sicher: »Wir werden noch viel Zeit damit verbringen, allen Subtilitäten nachzuspüren, die in den EHT-Daten versteckt sind.«

Seinem Lebensthema begegnete Strominger schon während des Studiums. Damals hatte gerade ein junger Physiker im britischen Cambridge bahnbrechende Neuigkeiten verkündet: Stephen Hawking hatte die Theorie der schwarzen Löcher mit einer Prise Quantenmechanik gewürzt. Es war ihm damit ein erster Schritt in Richtung auf die ersehnte Quantengravitation gelungen.

Im Zuge seiner Rechnungen hatte Hawking festgestellt, dass schwarze Löcher Strahlung aussenden – extrem schwach zwar, doch das reicht, um die Löcher im Verlaufe von Abermilliarden Jahren irgendwann verdampfen zu lassen.

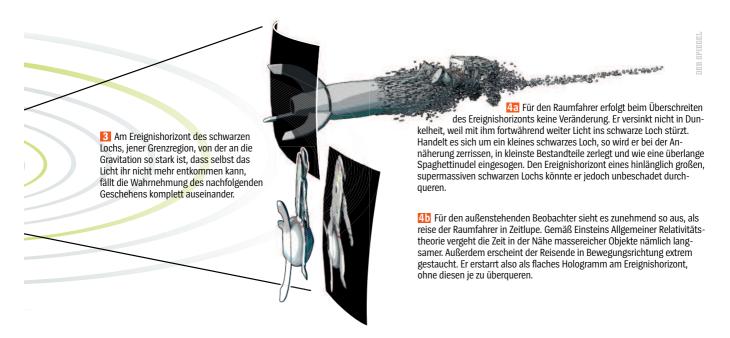
Das warf für die Gemeinde der Physiker ein Rätsel auf: Wo war dann all die Information geblieben, die im Laufe seines Daseins zusammen mit Materie in das schwarze Loch hineingestürzt war?

Anfang der Achtzigerjahre biss sich Strominger an diesem sogenannten Informationsparadoxon fest, und es hat ihn seither nicht mehr losgelassen. Es verhalte sich damit wie mit allen wirklich großen Rätseln, sagt er: »Das Problem ist einfach gestellt, aber unerhört schwierig zu knacken.«

Es dauerte lange, bis die Fachwelt die Tragweite dieses Paradoxons begriff. »Inzwischen aber herrscht Konsens: Wenn es gelingt, dieses Problem zu lösen, dann wird Fantastisches daraus hervorgehen«, sagt Strominger.

Immer wieder haben sich die Wege von Strominger und Hawking gekreuzt. Meist ging es um die Arbeit am Informationsparadoxon. Anfangs, in den Achtzigerjahren, vermochte Hawking noch zu sprechen. Später, als er sich nur noch über seinen Computer verständigen konnte, wurde die Kommunikation schwieriger. »Erst bemaß sich sein Redefluss in Wörtern pro Minute, am Ende dann in Minuten pro Wort«, erzählt Strominger.

Wenige Monate vor Hawkings Tod stand Strominger noch, zusammen mit dem britischen Kollegen Malcolm Perry, bei Hawking daheim an der Tafel. Die beiden rechneten, Hawking sah zu. Nur sel-



ten meldete sich seine Computerstimme. »Natürlich kamen seine Kommentare immer verspätet, sodass wir jeweils drei, vier Schritte in unserem Argument zurückgehen mussten«, berichtet Strominger.

Das Arbeiten mit Hawking war langwierig und zäh. Aber es hat sich gelohnt. Im Oktober erschien posthum sein letzter Aufsatz, mit Strominger und Perry als Co-Autoren. Die drei Theoretiker entwickeln darin eine normalen Menschen kaum mehr begreifliche Idee: Die verlorene Information, so orakeln sie, sei vielleicht in Form energieloser Photonen auf der Oberfläche von schwarzen Löchern eingraviert.

er Traum von der Quantengravitation sei ja schön und gut, sagt Reinhard Genzel, aber eher etwas für den Urlaub. »Die Messungen, die wir machen, sind harte Arbeit«, sagt er. Für Träume fehle ihm in seinem Forscheralltag die Zeit.

Derzeit ist die Arbeit, von der der Astrophysiker des Garchinger Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik spricht, so spannend wie lange nicht mehr. Genzel sind spektakuläre Beobachtungen schwarzer Löcher gelungen. Zu verdanken sind sie einer neuen, schwindelerregend komplexen Teleskoptechnik. Gravity wird sie genannt.

Denn nicht nur die Radioastronomen haben schwarze Löcher im Visier. Die Plasmahölle rund um die Schwerkraftmonstren in den Galaxienzentren versprüht Licht unterschiedlichster Wellenlängen. Begierig wird es von den Astronomen analysiert: Satelliten im All fangen die hochenergetische Röntgenstrahlung auf, Teilchendetektoren messen die noch energiereicheren Gammasignale. Die meisten Details aber liefert Genzel. Seine Spezialität ist der Infrarotbereich.

Er nutzt das derzeit leistungsstärkste optische Teleskop der Welt, das »Very Large Telescope«. Sechs Autostunden südwestlich von Alma, doch noch immer in derselben chilenischen Atacamawüste, tasten vier mächtige Dome mit Acht-Meter-Spiegeln das Firmament ab – so außerweltlich mutet die Szenerie an, dass sie James Bond als Bühne für einen seiner Showdowns diente.

Das wahrhaft außerweltliche Spektakel aber vollzieht sich in den Innereien des Instruments. Nach seiner 26 000 Jahre langen schnurgeraden Reise vom galaktischen Zentrum bis zur Erde verirrt sich das Licht dort in einem verwinkelten Labyrinth aus Spiegeln, Filtern und Detektoren. Mikrometergenau wird es gelenkt, reflektiert und vermessen, bis die Strahlengänge aus allen vier großen Spiegelschüsseln schließlich elektronisch zum Bild eines virtuellen Teleskops mit mehr als hundert Meter Durchmesser vereinigt werden.

Anlage des »Very Large Telescope» in Chile

Kollision zweier schwarzer Löcher (Simulation)

Die Aufnahmen, die so entstanden sind, erreichen nicht ganz die Auflösung der EHT-Bilder, aber sie kommen ihnen nahe. Für Genzel sind sie die Krönung einer Karriere, die der immer präziseren Vermessung des Milchstraßenmittelpunkts galt. Niemand kennt die Zentralregion im Sternbild Schütze so gut wie Genzel.

»Als ich anfing, haben mir die Theoretiker gesagt, dass ich nichts finden würde«, erzählt der Forscher. Genzel versuchte es trotzdem, und er wurde fündig. Dutzende Sterne spürte er auf, die es der Lehrmeinung zufolge gar nicht geben konnte.

Mit immer größerer Präzision vermaß er die Bahnen, auf denen diese um ein unsichtbares Kraftzentrum rasten, und je mehr Daten er sammelte, umso klarer wurde, dass das Objekt in Sgr A*, in dessen Bann diese Sterne standen, kaum etwas anderes als ein monströses schwarzes Loch sein konnte.

Dennoch hat Genzel in all den Jahren der Infrarotvermessung nie verkündet, jetzt habe er den endgültigen Beweis für die Existenz dieses schwarzen Lochs erbracht. »Unsere Aufgabe als Physiker ist es, alles zu tun, um unsere schönsten Hypothesen zu widerlegen«, sagt er.

Im Laufe seiner Forschungsarbeit bekam auch Genzel die eigentümliche Nähe zu spüren, die seit je zwischen der Suche nach schwarzen Löchern im All und der Kriegsführung auf Erden bestand. »Die wichtigsten Fortschritte haben wir Infrarotastronomen den US-Militärs zu verdanken«, sagt er. Weil Nachtsichtgeräte von großer strategischer Bedeutung waren, wurden Materialien entwickelt, die hochempfindlich auf Infrarotstrahlung reagieren. »Sie können sich gar nicht vorstellen, wie schwierig es war, dieses Zeug für die zivile Nutzung zu beschaffen und dann auch noch nach Südamerika zu verschiffen«, erzählt der Max-Planck-Forscher.

Inzwischen, sagt Genzel, hätten die Europäer ihre eigenen Detektormaterialien, die mindestens so leistungsfähig seien wie jene der Amerikaner. Das, zusammen mit der neuartigen Interferenztechnik des Gravity-Instruments, erlaubte es Genzel und seinen Mitstreitern, tiefer denn je in die Strahlenhölle von Sgr A* hineinzuzoomen.



So sondierte Gravity erst vor wenigen Monaten das Terrain, in das nun das EHT vorgestoßen ist. Gemeinsam schlagen die Aufnahmen im Radio- und Infrarotspektrum ein neues Kapitel der Astronomie auf: Erstmals öffnet sich der Blick nicht nur auf das schwarze Loch selbst, sondern auch in jene brodelnd heißen Plasmawirbel, die drum herum strudeln.

Das ins Zentrum einer Galaxie strömende Gas sammelt sich in einer Scheibe rund um das zentrale schwarze Loch. Durch Reibung kann es sich bis auf Temperaturen von vielen Milliarden Grad aufheizen.

Durchwirbelt wird dieses lodernde Plasma von kraftvollen Magnetfeldern, die einen Teil der Materie zu hochenergetischen Teilchenstrahlen bündeln. Senkrecht schießen diese Jets ins All. Tausende Lichtjahre kann die Reichweite der weithin leuchtenden Scheinwerfer betragen.

Die Plasmaöfen rund um schwarze Löcher zählen zu den strahlkräftigsten Objekten des Universums. Nirgendwo sonst wird Materie effizienter in pure Energie umgewandelt. Aber gerade weil die Bedingungen, die hier herrschen, so extrem sind,

mangelt es den Physikern noch an Verständnis. So heiß ist das Plasma, so verzwirbelt sind die Magnetfelder, so verbogen ist der Raum, dass die Computer bei der Simulation dieser Verhältnisse an ihre Grenzen stoßen.

Genzel konnte bereits das flackernde Feuer von Plasmastürmen sichtbar machen, die mit einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit rund um den Abgrund von Sgr A* wirbeln. Auf den EHT-Bildern hoffen die Astronomen, nun auch den Fußpunkt eines Jets erkennen zu können. Es wäre der erste Blick in die Zündkammer einer kosmischen Strahlenkanone.

olker Springel pflanzt schwarze Löcher. Er platziert sie genau ins Zentrum von Babygalaxien. Gleich am Anfang, als er vor rund 15 Jahren seine erste Saat ausbrachte, erlebte Springel eine Überraschung. »Ich war regelrecht geschockt, als ich es sah«, erinnert er sich.

Er hatte zwei Galaxien in seinem Rechner mit schwarzen Löchern bestückt und

ließ sie nun miteinander kollidieren. Ganz wie er es erwartet hatte, kreisten die beiden spiraligen Welteninseln zunächst umeinander herum, bis sie schließlich wirbelnd miteinander verschmolzen. Doch dann, als es gerade schien, als wollte das neu geformte Gebilde zur Ruhe kommen, da quollen unvermittelt große Schlieren aus seinem Inneren hervor. »Es schleuderte plötzlich mit unerhörten Mengen Gas um sich«, erzählt Springel. »Das war für uns völlig unerwartet.«

Man könnte meinen, dass es nichts Vermesseneres geben kann, als das, womit Springel am Garchinger Max-Planck-Institut für Astrophysik seine Tage verbringt: Er erschafft Universen, deren Entwicklung er sodann an seinem Rechner verfolgt. Ihm selbst scheint das gar nicht so ungeheuerlich. In gewissem Sinne sei es leichter als die Berechnung von Wetterprognosen: »Wir haben den Vorteil, dass wir die Anfangsbedingungen sehr genau kennen«, sagt er.

Springel kommt zugute, dass seine Kollegen aus der beobachtenden Kosmologie den Mikrowellenhintergrund am Firmament präzise vermessen haben, und dieser spiegelt das Universum wider, wie es ganz am Anfang, nur rund 400 000 Jahre nach dem Urknall, aussah. In diesen Zustand versetzt Springel seine simulierten Universen. Dann muss er nur noch die Schwerkraft ihr Werk verrichten lassen.

Das Ergebnis überwältigt. Kaum setzt Springel seine Simulation in Gang, beginnt ein wilder Tanz der Pixel auf seinem Bildschirm. Wie von Zauberhand gelenkt, finden sie zu winzigen Wolken zusammen, die feine Spiralärmchen ausbilden – genau wie es wirkliche Galaxien tun.

Diese simulierten Gebilde wiederum umkreisen einander, sie kollabieren, verschmelzen oder fliegen wieder auseinander. Und indem sie ihren tollen Reigen vollführen, ordnen sie sich in netzartig verwobenen Fäden an, die in hell leuchtenden Knotenpunkten zusammenlaufen. Es entsteht ein Muster, das frappierend jener großräumigen Galaxienverteilung ähnelt, wie sie die Astronomen anhand ihrer Beobachtungen am realen Sternenhimmel rekonstruiert haben.

Es gab jedoch auch Probleme. »Das Schlimmste war, dass viel zu viele Sterne entstanden«, sagt Springel. Zu hell, zu dicht, zu schwer gerieten ihm seine Galaxien. So prallvoll mit Sonnen war keine der wirklichen Welteninseln am Nachthimmel. Springel und seine Mitstreiter wussten: Es fehlte etwas in ihrer Simulation. Irgendetwas, das dem Sternenfeuer Einhalt gebieten konnte.

Hier kamen, unter anderem, die schwarzen Löcher ins Spiel. Als Springel mit seinen Simulationen begann, wusste niemand so recht, welche Rolle die Monstren

spielen, die im Zentrum vieler, vielleicht sogar aller Galaxien hocken: Waren schwarze Löcher nichts als Schmarotzer, die sich von herabregnender Materie ernährten? Oder führten sie womöglich von ihrer zentralen Position aus Regie?

Eigentlich schien das eher unwahrscheinlich. Denn so monströs die Materieschlucker in den Galaxienzentren auch anmuten mögen, so sind sie doch an kosmischen Dimensionen gemessen winzig. Wie sollten sie da bis in die Zigtausende Lichtjahre weit ausgreifenden Arme hineinwirken können? Springel wollte sichergehen und begann, seine virtuellen Galaxien mit schwarzen Löchern zu bepflanzen.

Der Effekt war eklatant. Zwar verhielten sich die mächtigen Gravitationsfallen zunächst unauffällig, nur dann und wann strudelte ihnen einmal ein wenig Gas oder Staub in den Rachen. Doch das änderte sich, wenn zwei Galaxien ineinanderrauschten. Dann erwachten die Löcher plötzlich zum Leben.

Bei der Kollision werden viele Sterne aus ihren stabilen Bahnen geworfen, einige ins Zentrum geschleudert, wo die beiden sich bald vereinigenden schwarzen Löcher sie gierig in sich hineinschlingen. Der Sternenschmaus dauert indes nicht lange, denn bald steht dem schwarzen Loch die eigene Gier im Weg. »Wie in einem Dampfkessel baut sich Druck auf, der sich irgendwann entlädt«, erklärt Springel. Unvermittelt speit das schwarze Loch große Mengen Materie und schneidet sich so vom eigenen Nahrungsnachschub ab.

Wie eine Welle durchlaufen diese Eruptionen die Galaxie. Wind bläst durch die Sternenkrippen und stört dort die Entstehung neuer Sonnen. So tragen die schwarzen Löcher dazu bei, das Sternenfeuer herunterzuregulieren: Sie geben ihrer Heimatgalaxie den Takt der Entwicklung vor.

»Besonders ausgeprägt tritt dieser Effekt bei alternden Galaxien auf«, erklärt Springel. In reifen Welteninseln wie etwa der Milchstraße kommen die schwarzen Löcher meist zur Ruhe. Den Großteil der Zeit hungern sie, so wie auch der Koloss im Sternbild Schütze.

Nur einmal noch wird die Galaxis einen weiteren Wachstumsschub durchleben – wenn sie in etwa vier Milliarden Jahren mit der benachbarten Andromeda-Galaxie zusammenprallt. Dann wird der Schlund im Zentrum ein weiteres Mal gemästet, und möglicherweise wird dabei jener Schwellenwert überschritten, jenseits dessen schwarze Löcher die Sternentstehung ganz abwürgen.

Denn die größten der Monster, wie etwa M87*, erzeugen mit ihrem Auswurf so viel Wind, dass sich die Gaswolken der Galaxie gar nicht mehr zu Babysternen zusammenballen können. Dann beginnt das lange Sterben einer Galaxie: Die großen, wei-



ßen Sterne verglühen, die kleinen altern, wobei sich ihr Licht immer mehr ins Rote verschiebt.

Astronomen haben einen Begriff für diese Galaxiengreise: »rot und tot«.

as Grußwort vor drei Jahren musste natürlich von Stephen Hawking kommen. »Können Sie mich hören?«, schnarrte die berühmte Computerstimme. Auf dem Podium prangten auf einem Gemälde wirbelnde Galaxien und wild sprühende Feuerschweife. Daneben stand der Rollstuhl, tief darin versunken der gelähmte Physiker. Er weihte die Black Hole Initiative (BHI) an der Harvard-Universität ein: das welterste Forschungszentrum, das ganz der Erforschung schwarzer Löcher gewidmet ist.

Koryphäen unterschiedlichster Fakultäten haben sich hier zusammengefunden, um die »rätselhaftesten Objekte des Universums« zu ergründen, wie es der Astrophysiker und BHI-Direktor Avi Loeb ausdrückt. »Nichts zieht das Interesse so unterschiedlicher Disziplinen gleichermaßen an«, sagt der Wissenschaftshistoriker Peter Galison. »In den schwarzen Löchern fließen alle Mysterien des Weltverständnisses zusammen.«

Die BHI-Gründer hätten keinen besseren Zeitpunkt für den Start ihrer Initiative wählen können. Schwarze Löcher, erst viele Jahrzehnte lang verkannt und dann viele weitere Jahrzehnte mit großem Misstrauen betrachtet, sind zum Mainstreamthema der Astronomie geworden. Der Nachweis von Gravitationswellen, die vom Crash schwarzer Löcher stammten,

102 DER SPIEGEL Nr. 16 / 13. 4. 2019

galt vor drei Jahren als der erste unumstößliche Beweis ihrer Existenz.

»Die schwarzen Löcher sind an lauter Fronten der Forschung zugleich aufgetaucht«, sagt Theoretiker Strominger. Teleskope melden Signale der Materiefresser in allen Wellenlängenbereichen. Und mit dem ins Eis der Antarktis eingelassenen Riesendetektor »IceCube« sahen die Forscher sogar ein von einem schwarzen Loch entsandtes Neutrino vorbeihuschen.

Stück für Stück setzen die Wissenschaftler die Befunde zu einem Bild zusammen. Die Harvard-Initiative allerdings offenbarte auch, wie schwierig das ist. Oft argumentierten die Forscher aneinander vorbei. Denn Philosophen, Mathematiker und Astronomen gehören verschiedenen Kulturen an, in denen unterschiedliche Werte, unterschiedliche Sitten und unterschiedliche Konventionen gelten. »Der Bau einer gemeinsamen Theorie schwarzer Löcher ähnelte am Anfang dem Turmbau zu Babel, bei dem jedes Gewerk eine andere Sprache sprach«, erzählt BHI-Direktor Loeb.

Jeden Dienstag kommt die Belegschaft zum Lunch zusammen. Im anschließenden Seminar tragen die Plasmaphysiker ihre Modelle der Teilchenjets vor; die Quantenphysiker spekulieren über Lösungen des Informationsparadoxons; oder es wird über die Galaxienevolution in der jüngsten Universumssimulation diskutiert.

»Es lohnt sich«, beteuert Loeb. Im Verlauf vieler Gespräche seien sich alle nähergekommen. »Es eint uns die Überzeugung, dass die schwarzen Löcher geradezu die Verkörperung unseres Unwissens über das Universum sind«, sagt er.

Tief im Schlund der Singularität, dort wo Raum und Zeit aufs Innigste miteinander verknäuelt sind, prallen Quantengesetze und Gravitationskräfte unversöhnlich aufeinander. Dort endet das Wissen der Wissenschaft. Erst wenn es gelinge, in einer allüberwölbenden Theorie der Quantengravitation die beiden großen Ideen der modernen Physik miteinander zu verheiraten, werde man das Wesen des Universums besser verstehen, sagt Loeb.

»Das schwarze Loch ist ein Kind seltsamer Eltern«, sagt er. Es gehe aus der Hochzeit von Quantenphysik und Relativitätstheorie hervor. »Und wenn schon Vater und Mutter so absonderlich sind, wie verrückt wird dann erst das Kind sein, das die Gene beider in sich vereint?«, fragt Loeb.

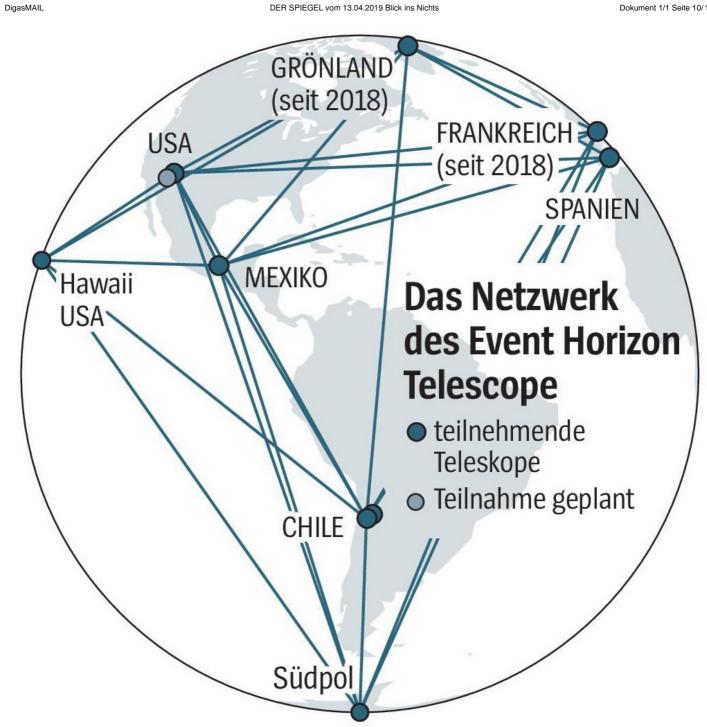
Johann Grolle

Animation

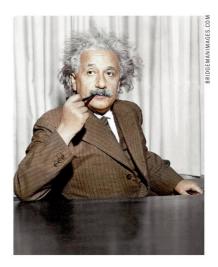
So funktioniert das »Event Horizon«-Teleskop

spiegel.de/sp162019schwarzesloch oder in der App DER SPIEGEL





Sternstunden der Astronomie



Die Erde kreist um die Sonne

Durch von ihm weiterentwickelte Teleskope beobachtet Galileo Galilei (1564 bis 1641) das Sonnensystem – dabei findet er Belege für das heliozentrische Weltbild.

Schwerkraft

Isaac Newton (1643 bis 1727) beschreibt eine universelle Kraft: die Gravitation. Darüber hinaus fertigt er auch das erste praktikable Spiegelteleskop an.

Einstein hatte recht

Der Brite Arthur Eddington beobachtet, dass Licht durch die Gravitation der Sonne abgelenkt wird (1919) und weist so die gerade von Albert Einstein aufgestellte Allgemeine Relativitätstheorie nach.

Ausdehnung des Universums

Durch die sogenannte Rotverschiebung im Licht von Galaxien kommen der Belgier Georges Lemaître (1927) und der Amerikaner Edwin Hubble (1929) zu dem Schluss, dass das Universum expandiert.

Eine zweite Erde?

Die Schweizer Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz schaffen es, den ersten sicheren Nachweis eines Planeten außerhalb unseres Sonnensystems zu erbringen (1995).

Gravitationswellen

Forschern des Ligo-Projekts gelingt der direkte Beleg von Gravitationswellen (2016). Sie entstanden bei der Kollision zweier schwarzer Löcher.

Schwarze Magie Paradoxe Raumzeit-Effekte

Paradoxe Raumzeit-Effekte im Bereich des Ereignishorizont

Wollte ein Astronaut in seinem Raumschiff ein schwarzes ansteuem, so wäre dies zwar eine Reise ohne Wiederkeht, jedoch voller erstaunlicher Phänomene. Ein in sicherer Entfernung verbleibender Beobachter würde ganz andere Eindrücke gewinnen als der Beisende seibt



2 Auf einer spiralförmigen Bahn bewegt sich der Reisende auf das Gravitationsmonster zu und wird dabe fast bis auf Libhtgeschwindigkeit beschleunigt. Der Raumfährer spirat für Anziehungskraft des schwarz Lochs jedoch nicht, solange er selbst und seine Umgeb sich in freien Fäll befinder.



Am Ereignishorizont des schwarzen Lochs, jener Grenzregion, von der an die Gravitation so stark ist, dass selbst das Licht ihr nicht mehr entkommen kann, fällt die Wahrnehmung des nachfolgenden Geschehens komplett auseinander.



12 Für den außenstehenden Beobachter sieht es zunehmend so aus, als eise der Raumfährer in Zeitlupe, Gemäß Einsteins Allgemeiner Relativität heorie vergeht die Zeit in der Nähe massereicher Objekte nämlich langemer. Außerdem erscheint der Revisende in Bewegungsrichtung externet gestaucht. Er erstarrt also als flaches Hologramm am Ereignishorizont, ihner diesen je zu überquieren.