

SUCHEN

[Astronomie](#) | [Biologie](#) | [Chemie](#) | [Erde/Umwelt](#) | [IT/Tech](#) | [Kultur](#) | [Mathematik](#) | [Medizin](#) | [Physik](#) | [Psychologie/Hirnforschung](#)

[Startseite](#) » [Albert Einstein und die Schwarzen Löcher](#)

Magazin | 01.08.1996 | [Teilen](#)

Albert Einstein und die Schwarzen Löcher

Aus den Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie läßt sich die Existenz punktförmiger Singularitäten herleiten, in denen Materie und Strahlung auf Nimmerwiedersehen verschwinden. Doch dem Urheber der Gravitationstheorie waren solche Abnormitäten ein Greuel, und er meinte sie widerlegen zu können.

Jeremy Bernstein

Manchmal überfordert eine große wissenschaftliche Leistung nicht nur die Vorstellungskraft ihres Schöpfers, sondern entwickelt sich auch gegen seine Absichten fort. Ein Beispiel dafür sind die Anfänge der Theorie Schwarzer Löcher und insbesondere die Rolle, die Albert Einstein (1879 bis 1955, Nobelpreis 1921) dabei gespielt hat.

Im Jahre 1939 veröffentlichte er in den "Annals of Mathematics" einen Artikel mit dem einschüchternden Titel "On a Stationary System with Spherical Symmetry Consisting of Many Gravitating Masses" (Über ein stationäres kugelsymmetrisches System aus vielen gravitativ wechselwirkenden Massen). Darin wollte er beweisen, daß Schwarze Löcher – Himmelsobjekte von so hoher Dichte, daß selbst das Licht ihrer Schwerkraft nicht zu entkommen vermag – unmöglich seien; und er bediente sich dazu seiner eigenen allgemeinen Relativitätstheorie, die 1916 in den "Annalen der Physik" erschienen war – also just der Gravitationsgleichungen, mit denen man heute begründet, warum Schwarze Löcher nicht nur möglich, sondern unter gewissen Bedingungen sogar unvermeidlich sind.

Als erste legten der amerikanische Physiker J. Robert Oppenheimer (1904 bis 1967) und sein Student Hartland S. Snyder eine solche Folgerung dar. Schon wenige Monate nach Einsteins Arbeit von 1939 – wenn auch ohne Bezug darauf – publizierten sie einen Artikel "On Continued Gravitational Contraction" (Über fortwährende gravitationsbedingte Kontraktion).

Doch damit nicht genug: Die moderne Theorie der Schwarzen Löcher – allgemeiner die Beschreibung kollabierender Sterne – beruht indirekt auf einem weiteren Teil von Einsteins theoretischen Errungenschaften, nämlich seiner Formulierung einer Quantenstatistik. Wie man heute weiß, würde ohne quantenstatistische Effekte überhaupt jedes kosmische Objekt letztlich zu einem Schwarzen Loch zusammenfallen, und das Universum hätte keinerlei Ähnlichkeit mit der uns vertrauten Sternenwelt.

Die Bose-Einstein-Statistik

Zur Formulierung seiner Quantenstatistik wurde Einstein durch einen Brief angeregt, den er im Juni 1924 von einem in Fachkreisen noch gänzlich unbekanntem jungen indischen Physiker namens Satyendra Nath Bose (1894 bis 1974) erhielt. Dem Schreiben lag ein Manuskript bei, das von einer britischen Wissenschaftszeitschrift abgelehnt worden war; doch Einstein übersetzte es nun ins Deutsche und sorgte dafür, daß es in der renommierten "Zeitschrift für Physik" erschien.

Warum hielt Einstein diese Arbeit für so wichtig? Zwei Jahrzehnte lang hatte er sich mit dem Wesen der elektromagnetischen Strahlung beschäftigt – insbesondere mit derjenigen, die innerhalb eines erwärmten Hohlraums entsteht und im Temperaturngleichgewicht mit den Wänden ist. Die Intensitätsverteilung der verschiedenen Wellenlängen hängt dabei nicht vom Material des Behälters ab, sondern nur von der darin herrschenden Temperatur. Bereits um die Jahrhundertwende hatte der deutsche Physiker Max Planck (1858 bis 1947; Nobelpreis 1918) die passende mathematische Formel für die Spektralverteilung dieser Hohlraum- oder Schwarzkörper-Strahlung entdeckt. (Ein schlagendes

AKTUELLE MAGAZINE



BESTELLEN

ABONNEMENT

MEISTGELESEN

- 1 Meeresbiologie | Krake erwürgt Delfin
- 2 Giftige Gliedertiere | Hundertfüßer-Biss tötet blitzschnell
- 3 Trommelfell | Pflanze unerwartete Ursache für Ohrschäden

UNSERE AKTUELLEN TOPSELLER

- 1 Spektrum Kompakt | Motivation und Kreativität
- 2 Digitalpaket: Spektrum der Wissenschaft Jahrgang 2017
- 3 Spektrum Kompakt | Mensch & Erde - Die Besiedlung der Kontinente
- 4 Spektrum Kompakt | Saurier - Fossile Zeugen des Erdmittelalters
- 5 Spektrum Spezial Biologie - Medizin - Hirnforschung | Neue Fronten der Hirnforschung

SPEKTRUM LESERSHOP



Gutschein EUR 50,-

Beispiel für Schwarzkörper-Strahlung sind die vom Urknall übriggebliebenen Lichtquanten, wobei gewissermaßen das ganze Universum den Behälter abgibt. Der derzeit exakteste Wert für die Temperatur, die dieser kosmischen Hintergrundstrahlung entspricht, ist $2,726 \pm 0,002$ Kelvin.)

Bose war eher zufällig auf die statistische Mechanik der Schwarzkörper-Strahlung gestoßen, indem er das Plancksche Strahlungsgesetz mathematisch aus quantenphysikalischen Überlegungen herleitete. Das weckte Einsteins Aufmerksamkeit; er ging einen Schritt weiter und untersuchte mit derselben Methode die statistische Mechanik eines Gases aus Masseteilchen, die den gleichen Regeln gehorchen wie bei Bose die (masselosen) Lichtquanten. Einstein formulierte nun für diesen Fall das Analogon des Planckschen Gesetzes und machte eine erstaunliche Entdeckung: Kühlt man dieses Gas aus Teilchen, die den inzwischen Bose-Einstein-Statistik genannten Regeln gehorchen, immer mehr ab, so sammeln sich unterhalb einer kritischen Temperatur plötzlich alle Partikel in einem einzigen, entarteten Zustand. Dieser Vorgang wird heute als Bose-Einstein-Kondensation bezeichnet.

Ein interessantes Beispiel ist Gas aus dem häufigsten Helium-Isotop He-4, dessen Kern aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Bei einer Temperatur von 2,18 Kelvin verwandelt sich das Gas in eine äußerst seltsame Flüssigkeit, die unter anderem Superfluidität aufweist, das heißt reibungsfrei fließt (Spektrum der Wissenschaft, August 1990, Seite 64). Erst letztes Jahr gelang es amerikanischen Wissenschaftlern, andere Atome – des Elements Rubidium – auf einige milliardstel Kelvin abzukühlen und damit ein Bose-Einstein-Kondensat direkt nachzuweisen (Spektrum der Wissenschaft, September 1995, Seite 34).

Aber nicht alle Naturbausteine zeigen dieses Verhalten. Im Jahre 1925 – kurz nachdem Einstein seine Artikel über die Quantenkondensation veröffentlicht hatte – identifizierte der in Österreich geborene Physiker Wolfgang Pauli (1900 bis 1958; Nobelpreis 1945) eine zweite Teilchenart, zu der das Elektron, das Proton und das Neutron gehören. Wie er feststellte, dürfen niemals zwei solche Teilchen, beispielsweise zwei Elektronen, denselben quantenmechanischen Zustand einnehmen; diese Tatsache ist seitdem als Paulisches Ausschließungsprinzip oder kurz Pauli-Prinzip bekannt. Ein Jahr später stellten der italienische Physiker Enrico Fermi (1901 bis 1954; Nobelpreis 1938) und sein englischer Fachkollege Paul Adrien Maurice Dirac (1902 bis 1984; Nobelpreis 1933) die nach ihnen benannte Quantenstatistik solcher Partikel auf.

Wegen des Pauli-Prinzips bildet diese Teilchensorte bei niedrigen Temperaturen kein Quantenkondensat – ganz im Gegenteil. Komprimiert man beispielsweise ein Elektronengas und kühlt es auf sehr niedrige Temperaturen, so zwingt man die Elektronen gleichsam, sich gegenseitig den Platz streitig zu machen. Doch weil das Pauli-Prinzip das mehrfache Besetzen desselben Zustands (eben einen entarteten Zustand) verbietet, fliehen sie einander mit einer Geschwindigkeit, die der des Lichts nahekommen kann. Bei Elektronen und anderen Fermi-Dirac-Teilchen bleibt der durch ihr Auseinanderstreben erzeugte Entartungsdruck selbst dann bestehen, wenn man das Gas praktisch bis auf den absoluten Nullpunkt abkühlt.

Das hat nichts mit der elektrischen Abstoßung geladener Teilchen zu tun: Neutronen – sie tragen, wie schon ihr Name sagt, keine Ladung – verhalten sich genauso. Es handelt sich um einen rein quantenphysikalischen Effekt.

Quantenstatistik und Weiße Zwerge

Doch was hat all dies mit Sternen zu tun? Vor der Jahrhundertwende waren die Astronomen auf eine seltsame Klasse kleiner und lichtschwacher Himmelsobjekte aufmerksam geworden. Einer dieser sogenannten Weißen Zwerge – er hat etwa die Masse der Sonne, strahlt aber 360fach schwächer – begleitet Sirius, den hellsten Stern am Himmel. Angesichts ihrer Masse bei sehr geringem Durchmesser müssen Weiße Zwerge extreme Dichte haben; zum Beispiel ist der Sirius-Begleiter rund 61000mal dichter als Wasser.

Eine erste Erklärung für solch bizarre Objekte lieferte Sir Arthur Eddington (1882 bis 1944). Als ich Ende der vierziger Jahre mit dem Physikstudium begann, war der britische Astronom eines meiner Idole – freilich aus falschen Gründen. Ohne seine großen astrophysikalischen Leistungen zu kennen, bewunderte ich seine populärwissenschaftlichen Bücher (die mir, seit ich mehr von Physik verstehe, eher einfältig vorkommen). Eddington war ein Neu-Kantianer und glaubte, man könne alles Grundlegende über das Universum durch bloßes Nachdenken erfahren; dabei

Gutschein im Wert von EUR 50,- zum Einlösen im Spektrum.de - Shop. Die Gültigkeit des Gutscheins beträgt drei Jahre ab Kaufdatum.

ZUM LESERSHOP

SCIOLOGS



All creatures will come – Meine Nachgedanken zum #34c3



Ist die neue Wahlordnung der DFG wirklich so ungerecht, wie manche F...



Wie ein umgedrehtes Supergen Schmetterlingen half, Mimikry zu entw...

LESERMEINUNG

- > zu: [Lithium tötet Bienenkiller](#) (1 Kommentar)
- > zu: [Katzen sind häufiger rechtshändig als Kater](#) (2 Kommentare)
- > zu: [Brauchen wir noch Zoos?](#) (3 Kommentare)
- > zu: [Was ist dran an der Phrenologie?](#) (2 Kommentare)
- > zu: [Kann die Spanische Grippe wieder zuschlagen?](#) (2 Kommentare)

LESERBRIEF EINSENDEN

UNS FINDEN SIE AUCH HIER

OFFENE STELLEN

- > [Praktikum in der Redaktion "Sterne und Weltraum"](#)

berief er sich fälschlich auf den deutschen Philosophen Immanuel Kant (1724 bis 1804), der gelehrt hatte, jede mögliche Erfahrung sei durch die Struktur unseres Geistes vorgeprägt. Doch 1919 leitete Eddington die Expedition der Londoner Royal Society zur Beobachtung einer totalen Sonnenfinsternis auf der Insel Principe im Golf von Guinea, bei der er die von Einstein vorhergesagte Ablenkung von Sternenlicht im Schwerfeld der Sonne nachwies. Fortan bis gegen Ende der dreißiger Jahre, als er sich in esoterische Theorien verlor, galt Eddington als einer der führenden Forscher seiner Zeit (siehe Spektrum der Wissenschaft, Dezember 1992, Seite 82). Er begründete praktisch die Lehre vom inneren Aufbau der Sterne ("The Internal Constitution of Stars" hieß auch sein klassisches Werk von 1926). Die Existenz Weißer Zwerge beleidigte zwar sein ästhetisches Empfinden, aber er hatte eine rettende Idee zu ihrer Erklärung.

Im Jahre 1924 stellte er die Hypothese auf, diese Objekte presse der eigene Gravitationsdruck so stark zusammen, daß einige Elektronen sozusagen ihren Halt an den sie bindenden Protonen verlören und abgestreift würden; die Atome büßten dadurch ihre Begrenzung ein und würden zu einem kleinen, dichten Klumpen zusammengedrückt. Der Kollaps würde aber schließlich durch den Entartungsdruck des Fermi-Dirac-Gases zum Stillstand kommen – das heißt, letztlich zwingt das Pauli-Prinzip die Elektronen, einander auszuweichen.

Einen weiteren Fortschritt machte die Theorie Weißer Zwerge, als der neunzehnjährige Inder Subrahmanyan Chandrasekhar im Juli 1930 per Schiff von Madras nach Southampton (England) reiste. Der britische Physiker Ralph Howard Fowler (1899 bis 1944) hatte ihn als Studenten an der Universität Cambridge akzeptiert, wo auch Eddington tätig war. Dessen Werk über den inneren Aufbau der Sterne und Fowlers Buch über Quantenstatistik hatten Chandrasekhar für die Weißen Zwerge begeistert. Um sich die Zeit auf See zu verkürzen, suchte er zu klären, ob es für solche Objekte eine Massengrenze gebe, oberhalb derer sie unter ihrer eigenen Gravitation völlig kollabieren müßten. Chandrasekhars Überlegungen lösten eine Revolution aus (den Nobelpreis erhielt er 1983).

Da ein Weißer Zwerg insgesamt elektrisch neutral ist, muß es zu jedem Elektron ein – rund 2000mal schwereres – Proton geben. Somit liefern die Protonen den Löwenanteil des Gravitationsdrucks. Damit die Materieballung nicht kollabiert, müssen sich der Entartungsdruck der Elektronen und der Gravitationsdruck der Protonen gerade die Waage halten. Wie sich zeigt, ergibt sich aus dieser Bedingung für die Anzahl der Protonen und damit für die Masse Weißer Zwerge ein Schwellenwert. Diese sogenannte Chandrasekhar-Grenze liegt bei rund 1,4 Sonnenmassen; ein Zwerg mit größerer Masse kann nicht stabil sein.

Das Ergebnis mißfiel Eddington zutiefst. Was sollte oberhalb dieser Grenze geschehen? Wenn Chandrasekhar recht hatte und sich nicht ein Mechanismus finden ließ, der die Masse jedes sich zu einem Weißen Zwerg entwickelnden Objekts von vornherein begrenzte, mußten massereichere Sterne unter der eigenen Schwerkraft unweigerlich restlos zusammenbrechen.

Weil Eddington diesen Gedanken unerträglich fand, attackierte er Chandrasekhars Anwendung der Quantenstatistik sowohl öffentlich als auch privat. Die Kritik der Koryphäe machte dem angehenden Physikstudenten zwar schwer zu schaffen, doch er beharrte auf seinem Standpunkt – um so mehr, als er darin von dem dänischen Physiker Niels Bohr (1885 bis 1962, Nobelpreis 1922) und weiteren führenden Forschern bestärkt wurde.

Beunruhigung durch eine Singularität

Während einige Wissenschaftler sich mit Quantenstatistik und Weißen Zwergen herumschlügen, suchten andere Einsteins allgemein-relativistische Beschreibung der Schwerkraft konkreter zu fassen. Meines Wissens bemühte Einstein sich allerdings selbst niemals sehr intensiv um exakte Lösungen seiner Gravitationsgleichungen.

Soweit sie die Schwerkraft in der Nähe großer Massen beschreiben, sind sie äußerst kompliziert, denn die Gravitation verzerrt nach Einstein die vierdimensionale Geometrie von Raum und Zeit derart, daß jedes Teilchen (auch ein Lichtquant) auf gekrümmte Bahnen gezwungen wird. Vor allem aber ließ sich die Materie – die Quelle der Schwerkraft – nicht durch die Gravitationsgleichungen allein beschreiben; Werte dafür mußten eigens eingefügt werden, weswegen Einstein die Gleichungen für unvollständig hielt. Immerhin konnten Näherungslösungen mit hinreichender Genauigkeit zum Beispiel das Phänomen

der Beugung von Sternenlicht an einem Objekt wie der Sonne beschreiben.

Außerdem hatte der deutsche Astronom Karl Schwarzschild (1873 bis 1916) kurz vor seinem Tode erstmals eine exakte Lösung für eine realistische Situation gefunden. Insbesondere konnte er damit die Bahn eines Planeten angeben, der einen Stern umkreist.

Dabei hatte Schwarzschild eine beunruhigende Entdeckung gemacht. In einem bestimmten Abstand vom Sternmittelpunkt – dem sogenannten Schwarzschild-Radius – läuft gleichsam die Mathematik Amok: Die Zeit verschwindet, und der Raum wird unendlich. Mathematisch gesprochen tritt dort eine Singularität auf. Normalerweise ist der Schwarzschild-Radius freilich sehr viel kleiner als der Radius des Objekts; für die Sonne beträgt er drei Kilometer, für eine Murmel von einem Gramm Masse nur 10-28 Zentimeter.

Schwarzschild war sich zwar bewußt, daß seine Formel bei diesem Radius verrückt spielte, maß dem aber keine Bedeutung bei. Er konstruierte ein einfaches Sternmodell und zeigte, daß ein unendlich hoher Druckgradient nötig wäre, den Stern auf diesen Radius zu komprimieren. Darum, so meinte er, sei die Singularität ohne praktische Bedeutung.

Doch damit war nicht jeder zufrieden. Einstein wandte ein, daß Schwarzschilds Modell gewisse mathematische Anforderungen der Relativitätstheorie nicht erfülle. Anderen gelang es, Schwarzschilds Lösungen so umzuformulieren, daß keine Singularität mehr auftrat. Aber war das Resultat wirklich nicht-singulär? Die Frage blieb zunächst offen, denn die meisten Physiker interessierten sich kaum dafür – zumindest bis 1939.

In seinem Artikel aus jenem Jahre führte Einstein seine erneuten Bedenken gegenüber dem Schwarzschild-Radius auf Diskussionen mit dem Kosmologen Harold P. Robertson an der Universität Princeton (New Jersey) und dessen Assistenten Peter G. Bergmann zurück, der heute emeritierter Professor an der Universität Syracuse (US-Bundesstaat New York) ist. Zweifellos wollte Einstein die Schwarzschild-Singularität nun ein für alle Male aus der Welt schaffen. Am Ende des Artikels schrieb er: "Das wesentliche Resultat dieser Untersuchung ist ein klares Verständnis, warum 'Schwarzschild-Singularitäten' in der physikalischen Realität nicht existieren." Das hieß nichts anderes, als daß es keine Schwarzen Löcher geben könne.

Zur Begründung betrachtete Einstein ein Ensemble kleiner Teilchen, die sich unter dem Einfluß ihrer gegenseitigen Schwerkraft auf Kreisbahnen bewegen – eine Art rotierendes Kugelsternhaufen-Modell. Nun fragte er, ob eine solche Konfiguration aufgrund ihrer eigenen Gravitation zu einem stabilen Stern von der Größe des Schwarzschild-Radius kollabieren könnte. Er verneinte dies, denn die Partikel des Haufens müßten sich, um die Konfiguration aufrechtzuerhalten, bereits bei einem geringfügig größeren Radius schneller als Licht bewegen.

Obwohl Einsteins Überlegung in sich schlüssig ist, geht seine Schlußfolgerung am Thema vorbei: Daß ein kollabierender Stern beim Schwarzschild-Radius instabil ist, besagt überhaupt nichts, da der Stern – eben weil er weiter kollabiert – den Radius ohnehin unterschreitet. Mich hat übrigens sehr berührt, daß der damals sechzigjährige Einstein in seinem Artikel Tabellen mit numerischen Resultaten anführt, die er mit einem Rechenschieber gewonnen haben muß. Heute ist der Artikel so überholt wie dieses Instrument.

Von Neutronen zu Schwarzen Löchern

Während Einstein am Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) vergeblich gegen die Schwarzschild-Singularität argumentierte, schufen in Kalifornien Oppenheimer und seine Schüler die moderne Theorie der Schwarzen Löcher (siehe "Der Physiker J. Robert Oppenheimer" von John S. Rigden, Spektrum der Wissenschaft, Oktober 1995, Seite 44). Seltsamerweise steht an ihrem Anfang eine völlig falsche Idee.

Der britische Experimentalphysiker James Chadwick (1891 bis 1974; Nobelpreis 1935) hatte 1932 das Neutron entdeckt, den elektrisch neutralen Baustein des Atomkerns. Bald darauf begannen der Schweizer Astrophysiker Fritz Zwicky (1898 bis 1974) am California Institute of Technology in Pasadena und unabhängig von ihm der sowjetische Theoretiker Lew D. Landau (1908 bis 1968; Nobelpreis 1962) zu überlegen, ob Neutronen vielleicht ein anderes Endstadium der

Sternentwicklung ermöglichen würden als in Form Weißer Zwerge. Bei genügend großem Gravitationsdruck, so ihr Argument, könnte im Sterninneren ein Elektron mit einem Proton zu einem Neutron verschmelzen. (Zwicky vermutete sogar zu Recht, daß dieser Prozeß bei Supernova-Explosionen stattfindet; solche Neutronensterne sind seither als Pulsare nachgewiesen worden.) Damals kannte man noch nicht den tatsächlichen Mechanismus, mit dem Sterne ihre Energie erzeugen. (Zwar identifizierten 1938 Hans Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker die Kernfusion als stellare Energiequelle, doch es dauerte einige Jahre, bis die neue Erklärung allgemein akzeptiert wurde.) Eine Hypothese besagte, im Zentrum normaler Sterne sitze stets ein Neutronenstern – ähnlich wie man heute vermutet, daß Schwarze Löcher die Energie der Quasare liefern.

Damit stellte sich aber die Frage, was bei solchen Sternen der Chandrasekhar-Grenze entsprechen sollte. Das läßt sich viel schwerer beantworten als im Falle der Weißen Zwerge, weil Neutronen miteinander über die starke Kernkraft wechselwirken, deren Wesen man selbst heute noch nicht ganz versteht. Bei welcher Massengrenze die Gravitation diese Kraft übertrifft, hängt stark von Feinheiten ab. Zu diesem Thema publizierte Oppenheimer mit seinen Studenten Robert Serber und George M. Volkoff 1938 und 1939 zwei Arbeiten, in denen sie zu dem Schluß kamen, die neue Massengrenze sei mit der Chandrasekhar-Masse für Weiße Zwerge vergleichbar.

Oppenheimer machte nun genau den gleichen Gedankensprung wie früher Eddington: Was würde beim Kollaps eines Sterns geschehen, dessen Masse jenseits beider Grenzen läge? Einsteins 1939 verfaßte Ablehnung Schwarzer Löcher spielte dabei gewiß keine Rolle, denn das Team in Pasadena arbeitete zur selben Zeit und fast 5000 Kilometer von Princeton entfernt.

Oppenheimer wollte jedenfalls keinen stabilen Stern von der Größe des Schwarzschild-Radius konstruieren, sondern herausfinden, was geschieht, wenn man den Stern durch den Schwarzschild-Radius hindurch kollabieren läßt. Er schlug Snyder vor, das Problem im Detail zu bearbeiten, dabei jedoch – um es zu vereinfachen – den Entartungsdruck und die mögliche Rotation des Sterns außer acht zu lassen. Oppenheimer sah intuitiv voraus, daß diese Faktoren nicht entscheidend sein würden. (Viele Jahre später stellte eine neue Forschergeneration seine Annahmen mittels leistungsstarker Computer in Frage; Snyder hatte nur eine altmodische mechanische Rechenmaschine. Aber Oppenheimer behielt letztlich recht: Seine Vereinfachungen machen keinen wesentlichen Unterschied.) Auf diese Weise entdeckte Snyder, daß die Beschreibung eines kollabierenden Sterns entscheidend vom Standpunkt des Beobachters abhängt.

Zwei Ansichten eines Zusammenbruchs

Stellen wir uns einen ruhenden Beobachter vor, der sich in sicherer Entfernung vom Stern aufhält. Nehmen wir außerdem an, daß es auf der Sternoberfläche einen zweiten Beobachter gibt, der vom Kollaps mitgerissen wird und unterdessen an seinen stationären Kollegen unentwegt Lichtsignale sendet. Der stellt nun fest, daß sich die Signale des todesmutigen Experimentators immer mehr zum roten Ende des Spektrums verschieben. Da er die Signalfrequenz als Zeitmessung interpretiert, wird er zu dem Schluß kommen, die Uhr des vom Kollaps mitgerissenen Beobachters gehe immer langsamer.

Direkt am Schwarzschild-Radius würde die Uhr sogar stehenbleiben. Der stationäre Beobachter muß daraus schließen, daß es unendlich lange dauert, bis der Stern auf seinen Schwarzschild-Radius schrumpft. Was danach geschieht, läßt sich nicht sagen, weil es vom Standpunkt des stationären Beobachters kein Danach gibt; für ihn wird der Kollaps beim Schwarzschild-Radius sozusagen eingefroren.

Demgemäß hießen solche Objekte bis Dezember 1967 – erst damals prägte der Physiker John A. Wheeler, der nun an der Universität Princeton tätig ist, in einem Vortrag den Namen Schwarzes Loch – in der Fachwelt oft eingefrorene Sterne. Dieses Einfrieren ist die eigentliche Bedeutung der Schwarzschild-Singularität. Wie Oppenheimer und Snyder in ihrer Arbeit feststellten, "strebt [der kollabierende Stern] danach, sich gegen jede Kommunikation mit einem entfernten Beobachter abzuschließen; nur sein Gravitationsfeld bleibt bestehen". Das aber bedeutet, daß ein Schwarzes Loch entstanden ist.

Doch was wird aus dem Beobachter auf der Sternoberfläche, der den Kollaps

unmittelbar miterleidet? Er erlebt Oppenheimer und Snyder zufolge etwas völlig anderes. Für ihn hat der Schwarzschild-Radius keine besondere Bedeutung: Er durchquert ihn einfach und bewegt sich, wie eine mitgeführte Uhr anzeigen würde, innerhalb weniger Stunden auf den Mittelpunkt des Sterns zu. Allerdings wird er unterwegs das Opfer gigantischer Gezeitenkräfte, die ihn samt Uhr unweigerlich zerreißen.

In jenem Jahr 1939 brach indes der Zweite Weltkrieg aus, das verheerendste Geschehen auf Erden, und überschattete auch alle Spekulationen über exotische Singularitäten der Raumzeit. Oppenheimer ging bald in die militärische Forschung und baute die zerstörerischste Waffe, die Menschen je erdacht hatten. Über Schwarze Löcher forschte er nie wieder – und soweit ich weiß, gilt das auch für Einstein.

Nach dem Krieg, 1947, wurde Oppenheimer Direktor des Institute for Advanced Study in Princeton, wo Einstein noch immer Professor war. Sie unterhielten sich gelegentlich; aber ob sie jemals über kosmische Mahlströme diskutiert haben, wissen wir nicht. Neue Fortschritte auf diesem Gebiet gab es erst wieder in den sechziger Jahren, als man mit der Entdeckung der Quasare, Pulsare und kompakten Röntgenquellen erneut über das rätselhafte Schicksal der Sterne nachzudenken begann.

Aus: Spektrum der Wissenschaft 8 / 1996, Seite 56
© Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

DIESEN ARTIKEL EMPFEHLEN



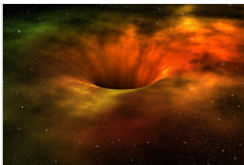
Dieser Artikel ist enthalten in
Spektrum der Wissenschaft 8 / 1996

Login für Abonnenten

[Noch kein Abonnent? Jetzt abonnieren!](#)

Leider noch nicht verfügbar!

THEMEN



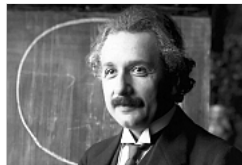
Schwarze Löcher

Die hungrigen Schlunde
des Weltalls



Kosmologie

Schwarze Löcher, Dunkle
Materie und Co



Albert Einstein und die Relativitätstheorie

Ein Jahrhundert Allgemeine
Relativitätstheorie

DAS KÖNNTE SIE AUCH INTERESSIEREN



[Meeresbiologie](#)



[Giftige Gliedertiere](#)

Krake erwürgt Delfin



NaKlar!

Kann Honig schlecht werden?

Hundertfüßer-Biss tötet blitzschnell

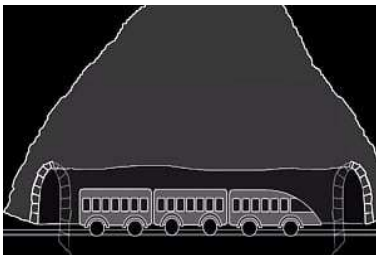


Faszinierende Katzen



Grusel-Foto

Hundertfüßer tötet Schlange beim Eierlegen



Relativitätstheorie: Wie man ein Paradoxon...

hier werben

powered by plista

BLEIBEN SIE AUF DEM LAUFENDEN

RSS Alles zum Thema [Schwarze Löcher](#)

RSS Alles zum Thema [Kosmologie](#)

RSS Alles zum Thema [Albert Einstein und die Relativitätstheorie](#)

Abonnieren Sie unseren kostenlosen Newsletter - fünf Mal die Woche von Dienstag bis Samstag!

Ihre E-Mail-Adresse eintragen

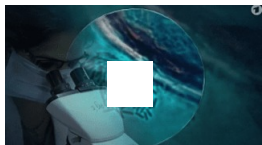
JETZT ABONNIEREN!

INTERESSANTE VIDEOS



Kann es Weiße Löcher geben?

Existieren neben Schwarzen Löchern auch ihre weißen Gegenstücke? Sie könnten so manches kosmi...



Superkeime aus Pharmafabriken

Weltweit sterben jährlich Hunderttausende an Infektionen mit multiresistenten Keimen. Doch...



Wieviel Wasser soll der Mensch trinken?

Am besten trinkt man zwei Liter pro Tag. Oder vielleicht doch nur 1,5 Liter oder eher 2,3 Liter?...

hier werben

powered by plista

LESERMEINUNG

+ ALLE BEITRÄGE ANZEIGEN

1. Das aufgedeckte Rätsel der Schwarzen Löcher

27.06.2013, Erik

Schwarze Löcher entstehen z. B. am Ende der Existenz eines Riesensterns bei einer Hypernova, wobei die (nach innen gerichtete) Schwerkraft über die expansiven Kräfte (der beendeten Kernfusion) siegt. Der Kollaps des Kerns vollzieht sich dabei so rasant, dass mit dem Ende des Kollaps die äußere

Schicht des Sterns mit immenser Geschwindigkeit weggeschleudert wird. Schwarze Löcher beherbergen in ihrem Zentrum eine Sternleiche, deren Anziehungskraft so enorm ist, dass in ihrem Umfeld bis zum so genannten Ereignishorizont, der die Sternleiche kugelförmig umgibt, kein Lichtstrahl nach außen dringt.

Die Erläuterung dieses Phänomens durch ein Beispiel:

Wenn die Geschwindigkeit einer durch das Weltall fliegenden Galaxie rund 200 000 km/s beträgt, stehen für das Erreichen der maximal möglichen Lichtgeschwindigkeit noch rund 100 000 km/s zur Verfügung. Sollte die Anziehungsgeschwindigkeit einer Sternleiche mehr als 50 000 km/s ausmachen, erzielt die Anziehungsgeschwindigkeit am Ereignishorizont jene rund 50 000 km/s (= die Hälfte der zur Verfügung stehenden rund 100 000 km/s), und es entsteht ein so genanntes Schwarzes Loch, weil aus dieser Region kein Licht mehr ins Weltall dringt.

Die Erklärung: Das Licht einer Lichtquelle, die sich genau am Ereignishorizont befindet, unterliegt der Reisegeschwindigkeit der Galaxie von rund 200 000 km/s und der Anziehungsgeschwindigkeit von rund 50 000 km/s in Richtung der Sternleiche. Damit stehen für dieses Licht am Ereignishorizont nur noch rund 50 000 km/s in die entgegengesetzte Richtung (weg von der Sternleiche) zur Verfügung, weshalb der Lichtstrahl den Ereignishorizont nicht verlassen kann. Dieser Lichtstrahl ist somit netto mit rund 200 000 km/s (mit der Galaxie) unterwegs, weil sich die beiden entgegengesetzten Geschwindigkeiten von jeweils rund 50 000 km/s aufheben.

Befände sich ein Lichtstrahl innerhalb des Schwarzen Lochs, würde er die Reisegeschwindigkeit der Galaxie von rund 200 000 km/s ebenso mitmachen. Die Anziehungsgeschwindigkeit im Schwarzen Loch (bzw. innerhalb des Ereignishorizonts) wäre z. B. 51 000 km/s. Dadurch bliebe für einen Lichtstrahl, der von der Sternleiche weggleuchten würde, nur noch eine maximale Geschwindigkeit von rund 49 000 km/s übrig - zu wenig, um zum Ereignishorizont zu gelangen bzw. das Schwarze Loch zu verlassen.

So trivial lässt sich das Geheimnis um die Schwarzen Löcher lüften. Eine angebliche "Krümmung des Raums" oder "der Stillstand des Zeitablaufs" innerhalb eines Schwarzen Lochs wirken dagegen wie ein Hokusfokus der Relativitätstheorie. Siehe auch: 'Die Welt der Relativität – alles falsch? Korrekturen zur Relativitätstheorie' mit ISBN 9788490391730

Titel Ihres Beitrags (erforderlich)

Ihr Beitrag (erforderlich)

Ihr Name (erforderlich)

Ort

Ihre E-Mail-Adresse (erforderlich; wird nicht veröffentlicht)

Wir freuen uns über Ihre Beiträge zu unseren Artikeln und wünschen Ihnen viel Spaß beim Gedankenaustausch auf unseren Seiten! Bitte beachten Sie dabei unsere Kommentarrichtlinien. » weiter

BEITRAG ABSENDEN

SPEKTRUM.DE AKTUELL

- > [Stechmücken lernen, den Duft des Todes zu meiden](#)
Mücken merken sich aggressive Opfer am Geruch

- > [Bricht ein, wer auf dem Jupitermond Europa landet?](#)
Wissenschaftler warnen wie HAL 9000
- > [27 Triebwerke und ein Auto](#)
Die neue Falcon Heavy von SpaceX startet bald zum ersten Mal
- > [Schimpansen können an Menschenschnupfen sterben](#)
Rhinovirus C bedroht Menschenaffen
- > [Wie Forscher den Gefühlskode knacken](#)
Wie weit ist es schon möglich, aus der Hirnaktivität auf unsere Gefühlslage zu schließen?

[NACH OBEN](#) 

MAGAZINE

[Spektrum der Wissenschaft](#)
[Sterne und Weltraum](#)
[Gehirn&Geist](#)
[Spektrum - Die Woche](#)
[Spektrum Neo](#)

SERVICES

[Newsletter](#)
[Kontakt](#)
[Spektrum Shop](#)
[Im Handel kaufen](#)
[Presse](#)

INFO

[Mediadaten](#)
[Datenschutz](#)
[Nutzungsbedingungen](#)
[Nutzungsbasierte Onlinewerbung](#)
[Alle Artikel](#)
[Impressum](#)

WEITERE ANGEBOTE

[Spektrum CP](#)
[Angebote für Schulen](#)
[Angebote für Institutionen](#)
[Lexika](#)
[Autor werden](#)

WEITERE WEBSEITEN

[Wissenschaft in die Schulen](#)
[SciLogs](#)
[SciViews](#)
[NaWik](#)
[AcademiaNet](#)