Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 36 (1978)
Heft: 168

Artikel: Schwarze Löcher : Einstein-Medaille für Prof. S.W. Hawking
Autor: Mitton, Simon
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-899496

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Schwarze Löcher

Einstein-Medaille für Prof. S. W. Hawking

Von SIMON MITTON

Der in diesem Jahr mit der Albert-Einstein-Medaille ausgezeichnete 36jährige Astrophysiker Professor Stephen W. Hawking und sein Team an der Universität Cambridge befassen sich mit Versuchen, Quantentheorie und Gravitationstheorie miteinander in Verbindung zu bringen. Darüber wird im folgenden berichtet.

Professor Stephen W. Hawking von der Universität Cambridge, England, ist in diesem Jahr die in hohem Ansehen stehende Albert-Einstein-Medaille verliehen worden. Er erhielt sie für aussergewöhnliche Erfolge in der Erforschung der Physik der sogenannten «schwarzen Löcher» — der geheimnisvollen Regionen des Universums, die Kernteilchen und Strahlung aussenden — sowie für seine neuen Erkenntnisse hinsichtlich der Eigenschaften superstarker Gravitationsfelder.

Die Albert-Einstein-Medaille wird in unregelmässigen Zeitabständen vom Lewis and Rosa Strauss Memorial Fund, Washington DC, verliehen. Im Jahre 1951 gab Albert Einstein, der Begründer der Relativitätstheorie, seine Zustimmung zur Stiftung dieses Preises für besondere Verdienste auf dem Gebiet, auf dem er selbst so Bedeutendes erreicht hatte.

Professor Hawking ist erst der fünfte, der diesen Preis erhielt; einer der vorherigen Gewinner, Dr. Willard Libby, wurde später auch mit dem Nobel-Preis für Physik ausgezeichnet.

Der erst 36jährige Hawking ist ein brillanter Wissenschaftler und Leiter eines Teams von Astrophysikern in Cambridge, das neue Entdeckungen hinsichtlich der sogenannten «schwarzen Löcher» macht. Mit 30 Jahren galt er bereits als eine Autorität auf dem Gebiet der Gravitationsphysik.

Zu Beginn der 70er Jahre nahm Hawking die äusserst schwierige Aufgabe in Angriff, zwei bedeutende Teilgebiete der Physik — die Quantentheorie und die Gravitationstheorie — in enge Verbindung zueinander zu bringen. Vor etwa drei Jahren würdigte die Royal Society seine Verdienste, indem sie ihm eine Fellowship verlieh. Er war eine der jüngsten Persönlichkeiten der heutigen Zeit, denen diese Ehre zuteil wurde.

In Anerkennung seines internationalen Ranges hat die Leitung der Universität Cambridge eigens für ihn einen Lehrstuhl für Gravitationsphysik geschaffen.

Der Gedanke, dass es sogenannte «schwarze Löcher» im Weltraum geben könnte, ist keineswegs neu, wenn er auch erst seit einigen Jahren zu einem dominierenden, vielbehandelten Thema in der Astrophysik geworden ist. Schon im Jahre 1796 stellte der französische Naturwissenschaftler Simon Laplace die Behauptung auf, dass die grössten leuchtenden Körper im Universum möglicherweise unsichtbar seien. Aus Newtons Gravitationsgesetz glaubte er den Schluss ziehen zu können, dass Licht durch Schwerkraft angezogen wird. Das führte ihn zu der Annahme, ein Stern von entsprechend gewaltiger Grösse müsse eine so starke gravitationsbedingte Anziehungskraft besitzen, dass er alles Licht, das er auszustrahlen versuche, wieder zurückhole. Er errechnete, dass ein Stern von der gleichen Dichte wie die Erde und mit einem 250mal so grossen Durchmesser wie die Sonne all seine Lichtstrahlen durch die anziehende Wirkung seiner Schwerkraft wieder einfangen würde.

In unserem Jahrhundert sind diese Ideen im Rahmen der Einsteinschen Relativitätstheorie detaillierter ausgearbeitet und behandelt worden. Die Anwendung der Ergebnisse auf die Entstehung der Sterne ist besonders faszinierend.

Ein Stern ist eine grosse Kugel aus Materie, die durch die zwischen allen ihren Teilchen wirkenden Gravitationskräfte zusammengehalten wird. Weil Gravitation stets eine anziehende Kraft ist, kann ein Stern nur dann existieren, wenn er eine Möglichkeit besitzt, seine äusseren Schichten durch eine der von innen her wirkenden Anziehung entgegengesetzte Kraft zu stützen.

Bei einem gewöhnlichen Stern wird dieser notwendige Druck nach aussen durch Erwärmung seines Inneren aufgrund von Kernverschmelzungsreaktionen erzeugt. Doch was geschieht, wenn ein Stern das Ende seines Lebens erreicht? Dann kühlt das Feuer in seinem Innern aus, und wenn keine andere Kraftquelle erschlossen werden kann, kommt es unvermeidlich dazu, dass sich der Stern ad infinitum zusammenzieht.

Handelt es sich um Sterne von geringer Masse, so wirkt diesem Gravitationskollaps bei einem Radius von etwa 1000 m 'die Zerfallsenergie von Elektronen' entgegen (Zerfallsenergie ist ein Quantenphänomen — bedingt durch das sogenannte Pauli-Verbot, wonach sich nicht zwei Teilchen im gleichen Einteilchenzustand bzw. bei gleichem Spin am selben Ort befinden können).

Einige Sterne sind jedoch zu gross, als dass ihre Komprimierung durch den Druck der Zerfallsenergie aufgehalten werden könnte, und diese kollabieren zu den legendären Neutronensternen, die man gegen Ende der 60er Jahre unseres Jahrhunderts entdeckte und Pulsare benannte. Doch ein Objekt, das eine mehr als doppelt so grosse Masse wie die Sonne hat, kann sich nicht zu einem Neutronenstern stabilisieren: der durch den Neutronenzerfall erzeugte Druck ist nicht stark genug, um den Kollaps aufzuhalten.

Die unabdingbare Folgerung ist, dass stellare Objekte mit mehr als der doppelten Masse der Sonne bis zu einem Punkt, von dem es kein Zurück mehr gibt, kollabieren müssen. Und wenn es auch stimmen mag, dass Sterne mit grösserer Masse bei einer Explosion einiges von ihrer Materie von sich schleudern, so bleibt doch die grundsätzliche Schlussfolgerung unverändert: Ein Stern mit entsprechend grosser Masse wird am Ende seines Lebens zwangsläufig einen Rumpfkern zurücklassen, der ad infinitum implodieren wird.

Hält man sich strikt an das, was die allgemeine Relativitätstheorie besagt, so gibt es nichts, was diesen Kollaps aufhalten könnte, bis der singuläre Punkt erreicht ist, an dem der Radius des Sterns gleich Null und die Schwerkraft unendlich wird.

Irgendwann im Verlauf dieses Sturzes nach innen schrumpft der betreffende Stern so weit zusammen, dass er den Radius erreicht, bei dem die Fluchtgeschwindigkeit von seinem Gravitationsfeld die Lichtgeschwindigkeit übersteigt. Ist die Materie durch die Schwerkraft erst einmal bis in diese Zone hinein gezogen worden, so können wir den Stern nicht mehr sehen, weil er nun völlig daran gehindert ist, noch irgendein informierendes Signal auszusenden. Der Physiker John A. Wheeler, Princeton, USA, prägte daher den Begriff «black hole» (schwarzes Loch), um einen solchen sich unserer Beobachtung entziehenden Punkt im Kosmos zu charakterisieren.

Seit dem Jahre 1971 befasste sich Professor Hawking

mit einer neuartigen Theorie der Entstehung der «schwarzen Löcher». Er begann, Mechanismen zu erforschen, von denen er annahm, dass sie zur Bildung «schwarzer Löcher» in einem sehr kleinen Massstab geführt haben könnten. Den Ergebnissen seiner Forschungen zufolge waren die Bedingungen in der Frühzeit des Universums offenbar besonders geeignet für die Entstehung solcher winzigen schwarzen Löcher. In der Ära des «Urknalls» war das Universum sehr viel dichter als heute, und unter diesen Bedingungen kann es sehr wohl möglich gewesen sein, dass Materie durch gewaltigen Druck zu genügend dichten Konzentrationen zusammengepresst wurde, um schwarze «Mini-Löcher» zu bilden.

Diese «Mini-Löcher», die, wie man annimmt, am Anfang der Zeit entstanden und die dementsprechend als «primordiale schwarze Löcher» bezeichnet werden, können die winzige Grösse von nur 10^{-8} kg bei einem Radius von nur 10^{-35} m haben. Dies ist die untere Grenze, während ein typisches primordiales schwarzes Loch vielleicht eine Grösse von 10^{12} kg bei einem Radius von 10^{-15} m hat. Im wesentlichen ist dies ein Objekt mit einer Masse, die ungefähr der eines kleinen Asteroids entspricht, und mit einem Radius, der in seiner Grösse dem Radius eines Kernteilchens entspricht. Ein Atom, das in engen Kontakt mit einem derart winzigen schwarzen Loch käme, würde auseinandergerissen, und vielleicht gelänge es dem schwarzen Loch sogar, einige Teilchen des Atoms zu «schlucken». Doch auf der Ebene unserer Alltagswelt würden solche schwarzen Löcher so gut wie keinerlei praktische Bedeutung haben.

Von grosser Bedeutung hingegen sind die primordialen schwarzen Löcher für die Kosmologie — jenen Zweig der Astronomie, der Struktur und Eigenschaften des Universums in seiner Gesamtheit zu erforschen sucht. Weil diese primordialen schwarzen Mini-Löcher so schwer zu entdecken sind, könnte ein beträchtlicher Teil der Masse unseres Milchstrassensystems wie auch des gesamten Universums sehr wohl in der Form solcher winzigen schwarzen Löcher eingeschlossen (und damit für uns verborgen) sein. Wenn das aber stimmt, so ist es schwierig, sich vorzustellen, wie sie jemals direkt entdeckt werden können.

Die gegenwärtigen Beobachtungen der leuchtenden Materie sowohl innerhalb unseres Milchstrassensystems als auch ausserhalb seines Bereichs sprechen nämlich sehr stark dafür, dass eine grosse Materie-Menge noch unentdeckt ist. Die sichtbaren Galaxien beispielsweise Bildern nur 1/50 der Masse, die das Universum nach dem heutigen Forschungsstand insgesamt enthalten dürfte. Hawkings Forschungsarbeit wird vielleicht den Weg zur Entdeckung der 98 Prozent unseres Universums weisen, die uns heute noch verborgen sind. Was die Physiker am meisten bewegte, ist seine geniale Entdeckung, dass ein kosmisches schwarzes Loch nicht ganz und nicht für allezeit von unserem Universum abgeschlossen ist. Er gelangte vielmehr zu der erstaunlichen Erkenntnis, dass ein schwarzes Loch evaporiert, als ob es ein heisser Körper sei.

Dieser Prozess beginnt zunächst langsam, gewinnt dann aber an Geschwindigkeit, bis es schliesslich zu einer heftigen Explosion des schwarzen Loches kommt, mit der die reiche Vielfalt fremdartiger Teilchen und energiereicher Strahlung hervorgebracht wird. Diese noch umstrittene Forschung könnte sich sehr wohl als einer der grossen Wendepunkte in der theoretischen Physik des ausgehenden 20. Jahrhunderts erweisen.

In gewissem Sinne besteht das Ziel der Gravitationstheorie darin, die Wechselwirkungen der Materie im grossen zu beschreiben, während die Quantentheorie die Eigenschaften der Materie im mikrophysikalischen Bereich beschreibt. Als man die «schwarzen Löcher» zu erforschen begann, wurde die Quantentheorie zunächst nicht dazu herangezogen.

Doch ab 1970 gingen Professor Hawking und seine Kollegen dazu über, in der Physik der schwarzen Löcher auch die Quantentheorie anzuwenden. Gemeinsam mit J. M. Bardeen und B. Carter zeigte Hawking 1973, dass man einem schwarzen Loch Temperatur zuschreiben kann. Sie fanden auch Analogien der thermodynamischen Gesetze, die sich auf die schwarzen Löcher anwenden liessen. Von einem Objekt, das eine Temperatur hat, wird jedoch erwartet, dass es Strahlung emittiert. Ein Jahr später gelang es Hawking, indem er neben der Relativitätstheorie auch die Quantenfeldtheorie heranzog, diesen scheinbaren Widerspruch zu erklären. Er zeigte, dass ein schwarzes Loch im Grunde «undicht» ist und dass es tatsächlich Materie und Energie in unser Universum ausstrahlt. Dies ist in weiten Kreisen als eine der grossen Entdeckungen auf dem Gebiet der theoretischen Physik anerkannt worden.

Hawkings Forschungsarbeit lässt sich vielleicht in der folgenden Weise verstehen: Sehr nahe am Rand eines kleinen schwarzen Loches existieren gewaltige gravitations- und gezeitenbedingte Kräfte. In einem solchen System können spontan Teilchen-Paare, die aus einem Materie-Teilchen (Elektron) und einem Antimaterie-Teilchen (Positron) bestehen, aus der Energie eines Gravitationsfeldes erzeugt werden.

Weil die genannten starken Kräfte vorhanden sind, können diese Teilchen jedoch voneinander getrennt werden, ehe sie sich gegenseitig vernichten und Energie erzeugen. Unter bestimmten Bedingungen ist es für ein solches Teilchen möglich, aufgrund eines dem Tunneleffekt in der Quantenmechanik analogen Vorganges aus dem schwarzen Loch gewissermassen «herauszufallen».

Je mehr das schwarze Loch zusammenschrumpft, desto leichter entsteht dieser Tunneleffekt, und dementsprechend erhöht sich die Geschwindigkeit, mit der Teilchen von einem schwarzen Loch evaporiert werden. Je mehr Masse (und gleichbedeutend damit Energie) ein schwarzes Loch durch den Evaporationsvorgang verliert, desto heisser und kleiner wird es. Dementsprechend strahlt es immer schneller und mit immer höherer Energie aus. Schliesslich wird ein Endstadium erreicht, in dem die ganze noch in dem schwarzen Loch verbliebene Energie innerhalb einer Zehntelsekunde in das Universum ausbricht; aus dem Raum-Zeit-Kontinuum springt eine Energiemenge heraus, die gleich einem Hundertstel der Leuchtkraft der Sonne ist, aber einem Volumen entstammt, das um 10^{15} kleiner als das eines Atoms ist!

Als eine Möglichkeit der Entdeckung dieses erstaunlichen Phänomens hat Martin Rees von der Universität Cambridge vorgeschlagen, nach Strahlungsimpulsen zu suchen, die von den geladenen, durch die Explosion ins Universum geschleuderten Teilchen emittiert werden.

Wenn eines Tages die Errungenschaften der Physiker

des 20. Jahrhunderts objektiv gewertet werden, wird man der Forschungsarbeit von Stephen Hawking einen hervorragenden Platz in den Annalen der Naturwissenschaften zuerkennen. Seine bemerkenswerten Leistungen sind denen der grössten Physiker der Vergangenheit gleichzustellen, weil er ein Bindeglied zwischen Quantentheorie und Gravitationstheorie schuf.

Er hat einen so grossen Schritt wie Michael Faraday getan, der Elektrizität und Magnetismus miteinander in Verbindung brachte — oder wie Einstein, der eine Beziehung zwischen Energie und Masse feststellte — oder wie Dirac, der die spezielle Relativitätstheorie und die Quantenmechanik miteinander verband. Hawking hat gezeigt, wie die Welt der Mikrophysik, in der die Gesetze der Quantentheorie herrschen, und die Struktur des Universums im grossen, in der die Gesetze der Gravitationstheorie herrschen, zueinander in Beziehung stehen.

Seine Suche nach einer zusammengefassten Theorie — einer Quantentheorie der Gravitation — wird die Art und Weise aufzeigen, in der die Natur den unendlichen Kollaps von Materie bis zu einem singulären Raum-Zeit-Punkt aufzuhalten vermag — denn sicherlich muss es innerhalb der schwarzen Löcher ein System und eine Wechselwirkung geben, die einen unaufhaltsamen Kollaps bis zum absoluten Nichts verhüten.

(BF), Dr. SIMON MITTON, Astron. Institut, Uni Cambridge, England

---

Ableitung der parabolischen Keplerbewegung aus dem Newtonschen Gravitationsgesetz

von F. SPIRIG

Der interessante Artikel von Herrn GUBSER im ORION 166 hat mich dazu angeregt, mich wieder einmal mit dem Keplerproblem zu beschäftigen. Dabei ist die vorliegende Notiz entstanden, welche vielleicht bei dem einen oder andern ORION-Leser auf Interesse stösst, dem die einfachsten Regeln der Differential- und Integralrechnung vertraut sind. Im folgenden versuche ich auf möglichst elementarem Weg, die Bewegung eines Himmelskörpers, etwa eines Kometen, aus dem Newtonschen Gravitationsgesetz herzuleiten. Der Einfachheit halber beschränke ich mich auf den parabolischen Fall.

Wählt man ein kartesisches Koordinatensystem, in dessen Ursprung sich die Sonne befindet, so lässt sich der Ort des Kometen relativ zur Sonne durch die Koordinaten (x, y, z) beschreiben. Nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz gilt dann

$$\ddot{x} = -k^2 \frac{x}{r^3} \tag{1.1}$$

$$\ddot{y} = -k^2 \frac{y}{r^3} \tag{1.2}$$

$$\ddot{z} = -k^2 \frac{z}{r^3} \tag{1.3}$$

Dabei ist r gleich der Distanz Sonne—Komet, also $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, und • bezeichnet die Ableitung nach der Zeit t, also etwa

$$\dot{x}(t) = \frac{dx}{dt} \quad \text{und} \quad \ddot{x}(t) = \frac{d^2x}{dt^2}.$$

Multipliziert man Gleichung (1.3) mit y, Gleichung (1.2) mit — z und zählt die so erhaltenen Gleichungen zusammen, so bekommt man

$$y\ddot{z} - z\ddot{y} = 0 \text{ oder } (y\dot{z} - z\dot{y})^{\cdot} = 0.$$

Es muss also eine Konstante A geben, so dass

$$y\dot{z} - z\dot{y} = A. \tag{2.1}$$

Analog schliesst man, dass es Konstanten B und C gibt, so dass

$$z\dot{x} - x\dot{z} = B, \tag{2.2}$$

$$x\dot{y} - y\dot{x} = C. \tag{2.3}$$

Der Vektor $(y\dot{z} - z\dot{y}, z\dot{x} - x\dot{z}, x\dot{y} - y\dot{x})$ heisst *Drehimpuls.* Die Gleichungen (2) drücken somit die Erhaltung des Drehimpulses aus. Setzt man für A, B und C die entsprechenden Ausdrücke aus (2) ein, so folgt sofort

$$Ax + By + Cz = 0. \tag{3}$$

Das heisst aber nichts anderes, als dass sich der Komet in einer *Ebene* bewegen muss. Denkt man sich das Koordinatensystem von Anfang an so gelegt, dass die Bahnebene des Kometen mit der x-y-Ebene zusammenfällt, so ist $z \equiv 0$, und als interessante Gleichungen bleiben nur noch (1.1), (1.2) mit $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ und (2.3) übrig. Wegen (1.1) und (1.2) gilt nun weiter