

Ein Wurmloch in der Raumzeit: Ein Bild der Raumkrümmung eines Schwarzen Lochs

Dr. rer. nat. W. Tausendfreund

12. September 1998

Eigenartig, wie ein großes Schwarzes Loch auf uns wirkt. Irgendwie fesselt es uns, zieht uns an. Haben wir nicht gelacht, als wir zum ersten Mal von einem Schwarzen Loch hörten? Aus Lust an der Angst? Freude am Schaden? Dabei müßte uns so ein Ungeheuer abstoßen. Denn endgültig ist verloren, wer oder was ihm zu nahe kommt.

In seiner alles überwältigenden Stärke tut es selbst dem Raum und der Zeit Gewalt an: An seinem Rand kommt die Zeit, wie sie der entfernte Beobachter wahrnimmt, zum Stillstand (daher der nicht mehr gebräuchliche Name Gefrorener Stern für einen zum Schwarzen Loch zusammengebrochenen Stern, einen Kollapsar). Und der Raum scheint sich zu einem Wurmloch zu öffnen, zu einer Brücke in ein Gegenuniversum, in dem ein Weißes Loch dem Schwarzen Loch unseres Universums gegenüberzustehen scheint.

Das Wurmloch ist berühmt geworden, nicht zuletzt als Gegenstand der Science Fiction: "Ich glaube, es handelt sich bei den Tunneln um Einstein-Rosen-Brücken", sagte er. "Die Allgemeine Relativitätstheorie läßt eine Klasse von Lösungen zu, die Wurmlöcher genannt werden " [Sagan: Contact, S. 450)].

Was ein Wurmloch ist, wollen wir genauer wissen. Wir sind bescheiden und beschränken uns auf das einfachste Wurmloch überhaupt, eine Verformung der Raumzeit durch ein Schwarzes Loch ohne elektrische Ladung und ohne Drall. Seine Gravitation wollen wir als Raumkrümmung verstehen und im Hyperraum anschaulich machen.

Ein Schwarzes Loch hat eine derart starke Gravitation, daß nichts, was in sein Gebiet fällt, wieder herauskommen kann: kein Teilchen und kein Lichtstrahl. Hätten wir ein Schwarzes Loch vor uns, nicht gerade ein winzig kleines, so sähen wir von ihm nur einen Kreis tiefer Schwärze, ein schwarzes Loch. Noch hat kein Mensch ein Schwarzes Loch gesehen; also ist es für uns ein theoretisches System: ein System der Newtonschen Theorie (mit Einschränkungen) oder der Allgemeinen Relativitätstheorie (ohne Einschränkungen) - kein modernes Lehrbuch der Allgemeinen Relativitätstheorie, in dem nicht ein Kapitel oder mehr von Schwarzen Löchern handelt.

(Die Definition schließt nicht aus, daß ein Schwarzes Loch von sich aus Teilchen aussendet: Nach Stephen Hawking strahlt es Teilchen aus, und um so mehr, je kleiner es ist: es sind Teilchen, die an seiner Grenze zum Außenraum

aus Fluktuationen des Vakuums neu entstehen. So mischt sich in die Schwärze dieser Löcher mehr oder weniger Weiß, so daß jedes dieser Löcher eigentlich dunkelgrau ist, mehr oder weniger dunkel. Bei den großen Schwarzen Löchern (so groß, daß sie für uns ohne Mikroskop zu sehen wären) könnten wir das Grau nicht vom Schwarz unterscheiden. Und das Grau der winzig kleinen Schwarzen Löcher, der Schwarzen Minilöcher, die es vielleicht auch gibt, könnten wir nicht sehen, eben weil sie so klein sind. Aber sollten wir die Zerstrahlung eines der kleinsten Schwarzen Löcher sehen, wobei sich seine Masse in Energie umwandelt, dann hoffentlich aus großer Entfernung. Denn so schlagen Raum und Zeit auf das Schwarze Loch zurück: auf die Dauer lassen sie sich nicht Gewalt antun!

Nach Newton (1687) ist Gravitation eine Fernwirkungskraft: Zwei Körper ziehen sich proportional zum Produkt ihrer Massen und umgekehrt proportional zum Quadrat ihrer Entfernung an.

So genau erklärt die Newtonsche Theorie die Bewegung der Planeten um die Sonne, daß kleine Störungen der Bewegung eines Planeten Rückschlüsse auf die Gravitation anderer Planeten zulassen. Aus zunächst unerklärlichen Abweichungen der Bewegung des Uranus berechnete Adams und unabhängig von ihm Leverrier die Bewegung eines neuen Planeten: Der Planet Neptun wurde zuerst am Schreibtisch entdeckt - nach der Bewegung des Uranus auf Grund des Newtonschen Gravitationsgesetzes!

Aber so genau die Newtonsche Theorie ist, sie ist nicht genau genug, die beobachtete Verschiebung des sonnennächsten Punkts der Bahn des Merkurs, seines Perihels, vollständig zu erklären: Der Anteil von 42,98 Bogensekunden im Jahrhundert an der gemessenen Periheldrehung von 5600,73 Bogensekunden läßt sich im Rahmen der Newtonschen Theorie nicht verstehen. Viel größer ist die Abweichung zwischen Theorie und Wirklichkeit der Bewegungen im Doppel-Neutronenstern PSR 1913+16: die entsprechende Drehung beträgt in ihm 4,226 62 Winkelgrad im Jahr! Die Periheldrehung des Merkurs erklärte Einstein (1915) als erster mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie. Für die Entdeckung des Neutronenstern-Paars PSR 1913+16 und seiner Periastrondrehung (1915) erhielten Taylor und Hulse den Physik-Nobelpreis des Jahres 1993: ihre Entdeckung war der erste (indirekte) Nachweis von Gravitationsstrahlung (Periastron heißt derjenige Punkt in der Bahn eines Sterns um einen zweiten, in dem die beiden Sterne sich am nächsten sind).

Nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (1915) ist Gravitation eine Krümmung des Raumes: Die Massen bestimmen, wie stark die Raumzeit gekrümmt wird; und die Krümmung der Raumzeit bestimmt, wie sich die Massen bewegen.

Ein Gedankenversuch soll das illustrieren: Stellen Sie sich vor, Sie legen eine große magnetische Stahlkugel mitten auf einen Billardtisch und stoßen vom Rand aus kleinere Kugeln aus Eisen so an, daß sie an der großen Kugel vorbeigehen müßten, wenn diese nichtmagnetisch wäre. Wie es sich gehört, zieht die große Kugel als Dauermagnet die kleineren Kugeln an und lenkt sie ab: statt geradlinig an der großen Kugel vorbeizurollen, treffen die kleineren Kugeln auf die große, oder sie bewegen sich auf Hyperbeln an der großen vorbei, wie Kometen an der Sonne. Dieses Szenario illustriert die Anziehung des Magneten - und die Gravitation der Sonne - als Fernwirkungskraft.

Stellen Sie sich weiter vor, nach diesem ersten Teil des Versuchs drückt der Versuchsleiter auf einen Knopf, und unter dem grünen Tuch des Billardtisches senkt sich leise surrend die Holzplatte um zehn Zentimeter. Aber das grüne Tuch senkt sich nicht mit der Holzplatte, bleibt an seiner Stelle: nach wie vor waagrecht straff gespannt vom Billardtischrahmen (dem Rahmen, an dem die Billardkugeln reflektiert werden, wenn sie nicht vorher zur Ruhe kommen). Dem Tisch ist nicht anzusehen, daß die Holzplatte abgesenkt wurde - er ist eine Sonderanfertigung für den zweiten Teil unseres Gedankenversuchs.

Daß die Holzplatte weg ist, sehen auch Sie erst, nachdem Sie eine große Holzkugel mitten auf das Tuch gelegt haben. Die Kugel hat ihr Gewicht und verformt deutlich sichtbar das Billardtuch: sie ruht nun in einer Mulde des grünen Tuchs. Danach legen Sie kleinere Holzkugeln auf den Rand des Tuchs und stoßen sie derart an, daß sie an der großen Holzkugel vorbeierollen müßten, wenn das grüne Tuch nicht eingebault wäre. Und was sehen Sie? Statt geradlinig an der großen Kugel vorbeizurollen, treffen die kleineren Kugeln auf die große, oder sie bewegen sich auf Hyperbeln an der großen vorbei, wie Kometen an der Sonne.

Sie verstehen auch warum: Die Verformung des grünen Tuchs bewirkt, daß die kleineren Holzkugeln aus ihrer geraden Bahn abgelenkt werden. Denn je näher eine der kleineren Kugeln der großen Kugel kommt, desto stärker ist das Tuch unter ihr zur großen Kugel hin geneigt und desto stärker wird diese kleine Kugel zur großen Kugel hin beschleunigt - ganz so, als wäre die große Kugel magnetisch, oder sagen wir, als übe die große Holzkugel eine Anziehungskraft auf die kleineren Holzkugeln aus. Dieses Bild beschreibt die Gravitation als Krümmung des Raumes.

Der Gedankenversuch soll zeigen: Während der Raum nach der Newtonschen Theorie passiv ist, nur eine starre Bühne für das Geschehen abgibt, nimmt er nach der Einsteinschen Theorie aktiv am Geschehen teil: die Materie wirkt auf ihn, und er wirkt auf die Materie, kurz, er wechselwirkt mit der Materie.

Die Raumkrümmung durch die Masse von Materie können wir nur indirekt wahrnehmen:

als Krümmung der Lichtstrahlen eines Sterns, dessen Licht bei einer Sonnenfinsternis dicht an der Sonne vorbeizieht;

oder als Ablenkung der Radiostrahlung des Quasars 3C 279, wenn er am 8. Oktober eines jeden Jahres von der Sonne verdeckt wird, genauer gesagt, kurz bevor und nachdem er verdeckt wird;

oder wenn das Licht eines Quasars auf dem Wege zu uns dicht an einer massereichen Galaxie vorbeizieht: dann kann das Licht auf zwei oder mehr verschiedenen Wegen zu uns gelangen, so daß wir zwei Quasare sehen, wo nur einer ist, oder auch vier Quasare, oder Ringbögen aus Quasarlicht ...

All das ließ sich mehrfach beobachten!

Wir wissen nicht genau, wie groß Neutronensterne sind. Wäre ein Neutronenstern gegebener Masse klein genug, so wäre der Raum in seiner Nähe so stark gekrümmt, daß Licht oder Röntgenstrahlung auf Kreisen um den Stern laufen müßte. Und noch stärker muß die Raumkrümmung in der Nähe eines Schwarzen Loches sein. Dort verformt sich der Raum zu einem Wurmloch: einer

Ausstülpung, die an der Grenze zum Schwarzen Loch keine Bewegung zuläßt, die von ihm wegführt.

Diese Raumkrümmung können wir uns nur schwer vorstellen, denn sie ist ihrer Natur nach eine innere Krümmung, eine Krümmung innerhalb des dreidimensionalen Anschauungsraumes. Wollen wir sie als äußere Krümmung beschreiben, anschaulich machen, können wir uns vorstellen, daß unser dreidimensionale Raum in einen vierdimensionalen Hilfsraum eingebettet ist – wie eine Ebene im dreidimensionalen Raum eingebettet ist, oder eine Gerade in einer Ebene.

Für Science-Fiction-Fans ist dieser vierdimensionale Raum real, sie nennen ihn Hyperraum. Einige Experten benutzen das Wort inzwischen auch schon, so Kip Thorne, der zusammen mit Michael Morris im Mai 1988 eine Diskussion in der Fachwelt auslöste, eine Diskussion über durchquerbare Wurmlöcher und Zeitreisen, die immer noch anhält (diese durchquerbaren Wurmlöcher sind etwas anderes als die von Schwarzen Löchern bewirkten Wurmlöcher).

Wir versuchen uns vorzustellen, daß die von einer Masse ausgehende Gravitation bewirkt, daß alle geraden Linien, alle ebenen Flächen unseres Anschauungsraums in diesem Hyperraum in eine und dieselbe Richtung ausgebeult werden, und zwar in eine Richtung, die senkrecht zu allen Geraden unseres Raumes verläuft – und das können wir uns nicht vorstellen. Wir können aber eine neue, eine vierte Koordinatenachse einführen, die in diese Richtung zeigt: senkrecht zu allen Geraden unseres Anschauungsraums. Wir nennen sie die w -Koordinatenachse, die also im Hyperraum senkrecht auf der x -Achse, der y -Achse und der z -Achse steht (egal, wie wie die Achsen unserer vertrauten Koordinaten x , y , z legen).

Leider reicht unsere Vorstellungskraft kaum aus, uns in drei Dimensionen alles vorzustellen, geschweige denn in einem Raum mit vier Dimensionen. Wir behelfen uns, indem wir vorübergehend so tun, als wäre unser Raum zweidimensional. Wir legen ein x - y -Achsenkreuz hinein; aber anstelle der z -Achse der uns vertrauten dritten Dimension denken wir uns senkrecht zum x - y -Achsenkreuz die w -Achse aus dem Hyperraum. Durch die drei Koordinaten w , x , y können wir jeden Punkt eines dreidimensionalen Unterraums des Hyperraums kennzeichnen (einer Hyperebene: dieses Wort benutzen Mathematiker und Physiker unabhängig von den Science-Fiction-Fans – und die Science-Fiction-Fans benutzen es nur, wenn sie es von der Mathematik her kennen).

Fragt sich nur noch, wie von Punkt zu Punkt die x - y -Ebene durch die Gravitation eines Schwarzen Lochs ausgebeult wird. Wir beschränken unsere Überlegungen auf das allereinfachste Schwarze Loch: eine punktförmige Masse im Zentrum einer sonst leeren Kugel. Wie dieses Schwarze Loch die Abstände in der Raumzeit abändert, das hatte 1916 Karl Schwarzschild als erster ausgerechnet – ohne von einem Schwarzen Loch zu ahnen. Er hatte einfach die Feldgleichungen gelöst, die Einstein 1915 vorgelegt hatte: für einen Massenpunkt im sonst leeren Raum.

Darum heißt das Ergebnis heute Schwarzschild-Metrik (die Metrik eines Raumes legt fest, welchen Abstand zwei beliebige Punkte dieses Raumes haben). Die Metrik des ungekrümmten Raumes, wie ihn Euklid schon vor 2 300 Jahren beschrieben hatte, ist durch den Satz von Pythagoras bestimmt: Wie Sie wissen,

kann aus den Koordinaten zweier Punkte in einer Ebene oder im Euklidischen Raum ihr Abstand berechnet werden. Die Metrik von Schwarzschild ist also eine Korrektur des Satzes von Pythagoras für einen gekrümmten Raum: den Raum, der bis auf das Schwarze Loch leer ist und durch das Schwarze Loch gekrümmt wird. (Eigentlich ist die Schwarzschild-Metrik noch mehr: sie gibt auch die Pseudo-Entfernung zwischen Ereignissen an, also zwischen Punkten der vierdimensionalen Raumzeit.)

Wir betrachten also die Punkte einer Ebene, die mitten durch ein Schwarzschild-sches Schwarzes Loch geht. Interessierte der Oberstufe können mit Hilfe der Formel von Schwarzschild in ein paar Minuten ausrechnen, welche Fläche die gleiche Krümmung hat wie diese Ebene mit Schwarzem Loch: eine Fläche, der wir ihre Krümmung ansehen, weil es eine äußere Krümmung ist. An dem einfachen Ergebnis freuen wir uns alle, auch wer die Rechnung nicht in jedem Schritt verfolgen konnte:

Die gefundene krumme Fläche schneiden wir mit der x-w-Ebene und erhalten so eine der einfachsten krummen Linien überhaupt, eine Parabel. Danach können wir uns die Fläche selbst durch Rotation der Parabel entstanden denken. So haben wir uns ein Bild von der Krümmung einer Ebene mit einem Schwarzen Loch gemacht: es ist ein Rotationsparaboloid (Flamm 1916).

Das Bild läßt sich so deuten, daß die mitten durch das Schwarze Loch gehende Ebene des Anschauungsraums doppelt vorkommt, in "zwei kongruenten Teilen oder *Blättern*", die durch den Rand des Schwarzen Lochs verbunden werden. Einstein und Rosen diskutierten 1935 die Schwarzschild-Metrik in einem anderen Koordinatensystem - nicht nur für die x-y-Ebene wie wir in unserem Bild, sondern für die vierdimensionale Raumzeit, für die es kein Bild gibt. Lesen Sie selbst, wie Einstein und Rosen ihre Formel "interpretierten": "The four-dimensional space [gemeint ist hier die vierdimensionale Raumzeit mit Schwarzschild'schem Schwarzem Loch] is described mathematically by two congruent parts or *sheets* " ... "We call such a connection between the two *sheets* a *bridge*" [Physical Review, Volume 48, July 1, 1935, mit der zitierten Textstelle auf Seite 75]. Und wir nennen zu Ehren Einsteins und Rosens diese "Verbindung zwischen den zwei *Blättern*" eine *Einstein-Rosen-Brücke*.