Die bunte Welt der Schwarzen Löcher

Obwohl noch niemals ein Mensch ein Schwarzes Loch direkt beobachten konnte, sind es die besterforschten Objekte des Universums.

Seit Veröffentlichung Albert Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, die erstmals die tatsächliche Existenz solch exotischer Gebilde postulierte, widmeten und widmen ungezählte Wissenschaftler ihr ganzes Leben der Erkundung dieser “Weltraummonster”.

Einigen der berühmten Namen werden Sie auf den nächsten Seiten begegnen und vielleicht nachempfinden können, welche Faszination diese Menschen in ihren Bann zog. Damit viel Spaß auf der Reise in die ***bunte Welt der Schwarzen Löcher***!

Inhalt:

Kapitel	*Seite*
1. Krumme Sachen	1
2. Wie aus viel Masse ein Loch wird	7
3. Horizonte	10
4. Seltsame Eigenschaften	15
5. Karussell der Raumzeit	20
6. Raubtierfütterung	25
7. Die Masse macht's	32
8. Schwarze Löcher light	39
9. Informatives	45

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Andreas Müller sowie Sönke Derlin, die mich mit vielen wertvollen Ratschlägen bei dieser Ausarbeitung unterstützt haben.

Anmerkung: Es erscheinen im Text öfter Hyperlinks, die natürlich nur online funktionieren.
Das gilt ebenso für Javascripts und Animationen.

©Werner Kasper, Juni 2006

www.abenteuer-universum.de

Krumme Sachen

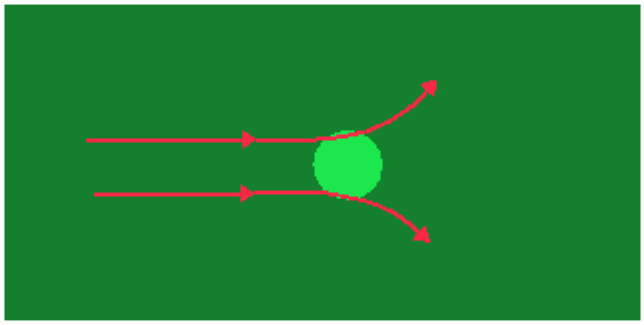
Zu Beginn unserer Reise zu den wohl skurrilsten Objekten im Universum sollten wir uns ein wenig mit Krümmungen vertraut machen. Sie werden nämlich noch eine bedeutende Rolle spielen.

Die **Allgemeine Relativitätstheorie** (*ART*) ist eine Theorie der Gravitation. Seit Isaac Newton der berühmte Apfel auf den Kopf fiel, wissen wir alle was Gravitation ist: Die Anziehungskraft, die zwischen zwei Massen herrscht. Die Kraft also, die uns auf dem Erdboden festhält und verhindert, dass wir in den Weltraum entschweben. Solange die Massen und damit die Anziehungskräfte nicht sehr groß sind, können wir beruhigt mit dem Newtonschen Gravitationsgesetz weiterrechnen wie bisher. Wenn allerdings die Massen und damit die Gravitation sehr groß werden, müssen wir die ART zu Rate ziehen, denn hier versagt Newtons Gesetz. Einsteins Theorie besagt nun, dass die Gravitation nicht wie bei Newton eine Kraft ist, mit der sich zwei Körper anziehen, sondern dass Materie die Raumzeit krümmt. Alles sich bewegende im Weltraum muss diesen Krümmungen folgen, jede Materie und sogar das Licht.

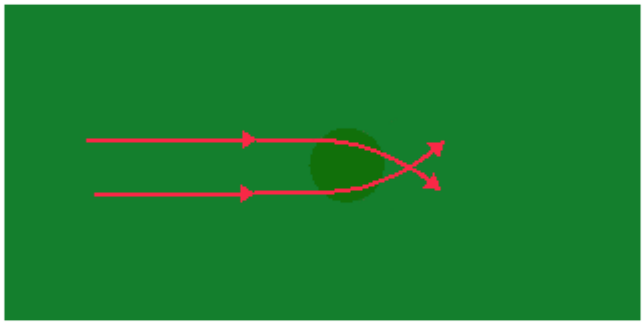
Die Materie sagt der Raumzeit, wie sie sich zu krümmen hat, und die Raumzeit sagt der Materie, wie sie sich bewegen muss

Sehen wir uns nun diese Krümmungen an:

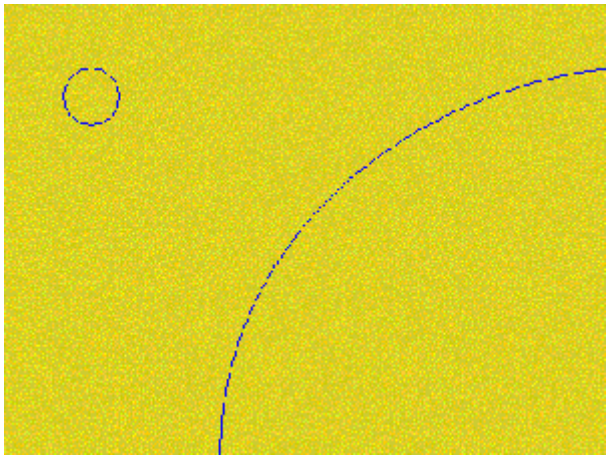
Stellen wir uns einmal einen Billardtisch vor. An einer Schmalseite haben wir zwei schiefe Ebenen aufgestellt, von der wir jetzt gleichzeitig zwei Kugeln starten. Jedem ist sofort klar, dass die beiden Kugeln völlig parallel bis zur gegenüberliegenden Bande laufen werden. Wenn aber eine kleine Erhebung auf dem Tisch ist, so laufen die Kugeln auseinander:



Es könnte auch jemand eine Beule in den Tisch geschlagen haben, dann werden sich die Bahnen der Kugeln überschneiden: Wir sehen also, dass die ehemals parallelen Bahnen der Kugeln gekrümmt werden, und zwar in Abhängigkeit von der Geometrie des Untergrundes. Die Anwesenheit von Masse verändert nun in ähnlicher Weise die Geometrie der Raumzeit, sie wird gekrümmt. Sterne, Planeten oder Monde müssen nun nicht mehr den Newtonschen Kräften der Gravitation folgen. Sie bewegen sich frei entlang den Krümmungen der Raumzeit! Gravitation ist nicht polarisiert, sie wirkt stets anziehend, deshalb entspricht die Krümmung der Raumzeit immer einer Beule bzw. Mulde.



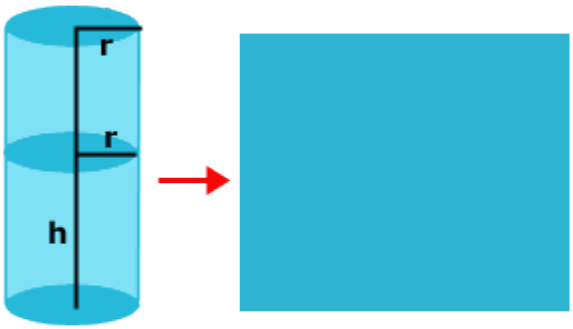
Solange wir uns mit nur wenigen Dimensionen beschäftigen, sind Krümmungen leicht begreiflich. Betrachten wir dazu eine einfache geometrische Figur, den Kreis:



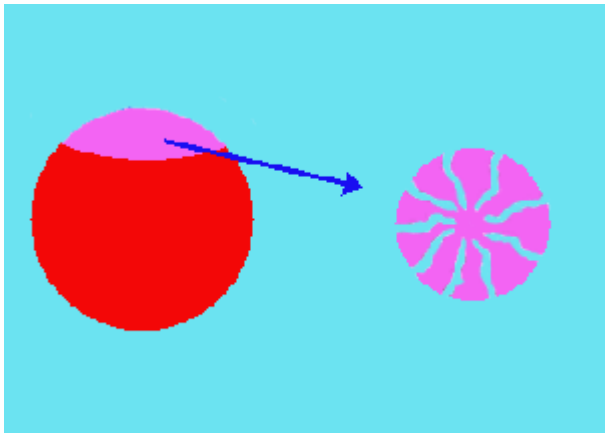
In der Skizze sind zwei Kreise mit völlig unterschiedlichem Durchmesser aufgezeichnet. Es ist leicht einzusehen, dass der kleine Kreis eine viel stärkere Krümmung hat als der große. Wenn wir den Durchmesser eines Kreises nun immer größer wählen, ihn zum Schluss unendlich groß werden lassen, dann wird die Krümmung am Ende verschwinden (sie ist dann gleich Null) und wir erhalten eine Gerade.
Lassen wir dagegen den Kreisradius immer kleiner werden, wird die Krümmung immer stärker. Am Ende ist aus dem Kreis ein Punkt geworden, der unendlich klein ist. Die Krümmung des Kreises ist jetzt unendlich groß! Ähnliches geschieht mit der Raumzeit im Innern eines Schwarzen Lochs, hier ist alle Materie zu einem punktförmigen Gebilde zusammengequetscht und die Raumzeit wird unendlich gekrümmt!

Doch zurück zum Kreis: Das ist ein einfaches, eindimensionales geometrisches Gebilde. Der Kreis hat einen Umfang bzw. eine "Länge", aber keine Breite und Höhe. Daher ist seine Krümmung leicht vorstellbar. Die Beschreibung von Krümmungen wird aber schnell kompliziert, wenn mehr Dimensionen im Spiel sind.

Gehen wir zunächst einen Schritt weiter und fügen dem Kreis eine zweite Dimension hinzu, die Höhe, womit wir einen Zylinder erhalten:

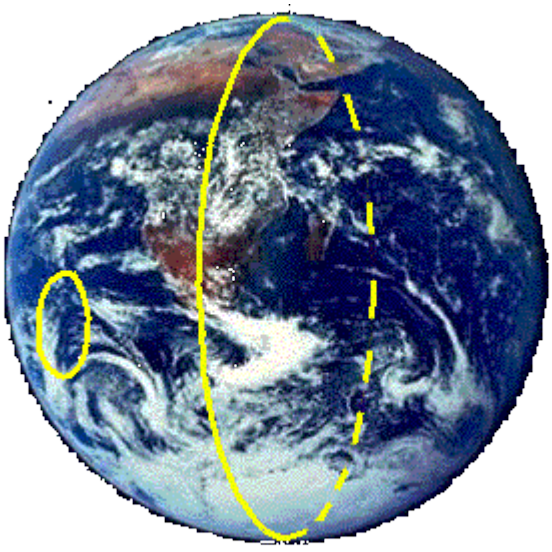


Wenn wir nun die Oberfläche des Zylinders betrachten, so benötigen wir zwei Angaben zur Beschreibung der Krümmung. Die Zylinderachse, wie man sieht, weist allerdings eine Krümmung von Null auf. Senkrecht dazu haben wir wieder die Krümmung des Kreises vor uns. Die Gesamtkrümmung ist der Kehrwert der Krümmungsprodukte, im Falle des Zylinders also praktisch Null. Zum Beweis können wir den Zylinder aufschneiden und völlig plan auf einer Fläche ausbreiten. Das erhaltene Rechteck entspricht voll und ganz der euklidischen Geometrie und versinnbildlicht eine flache Raumzeit.



Wir bewegen uns noch immer im zweidimensionalen Raum, betrachten jetzt aber eine Kugeloberfläche. Selbst wenn wir nur ein kleines Stück herausschneiden und versuchen es plan hinzulegen, wird das nicht mehr gelingen! Die Fläche reißt ein, weil der Flächeninhalt kleiner ist als der eines Kreises mit demselben Durchmesser.

Die Geometrie des Euklid verlassen wir nun und betreten das Reich der gekrümmten Räume, diese Mathematik wurde von **Bernhard Riemann** bereits im 19. Jahrhundert entwickelt. Die Kugeloberfläche als einfachstes Beispiel zeigt, dass die Gesetze der euklidischen Geometrie nicht mehr anwendbar sind.

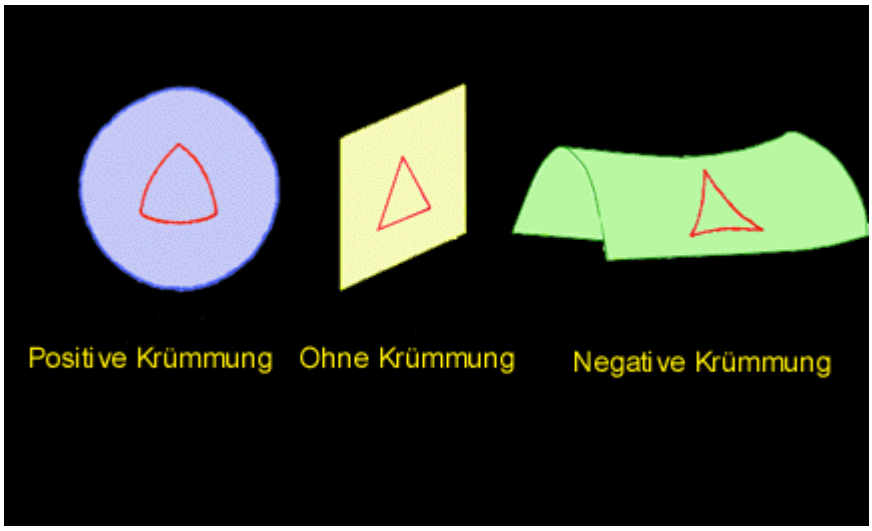


Wenn wir versuchen, eine gerade Linie von einem Punkt auf der Erde zu einem anderen zu ziehen, so ist diese Linie **immer** Teil eines Großkreises. Diese, auf der **positiven Krümmung** einer Kugeloberfläche verlaufenden Linien nennt man **Geodäten**. Allen möglichen Geodäten gemeinsam ist das Kugelzentrum als Mittelpunkt, Parallele sind nicht mehr möglich. Zeichnen wir einen Kreis auf die Oberfläche, so ist das Verhältnis Umfang : Radius nicht mehr 2π, sondern kleiner als bei einem euklidischen Kreis! Bei einem auf die Kugel gezeichneten Dreieck ergeben sich mehr als 180° für die Winkelsumme.

Krümmungen verändern sich in der Natur von Millimeter zu Millimeter, verlaufen recht wild umher. Die Unebenheiten der Erdoberfläche (z.B. Gebirge) sind ein anschauliches Beispiel für dreidimensional verlaufende Krümmungen. Nun wird es allerdings schon recht kompliziert, diese Krümmungen zu beschreiben!

Wild verlaufende Krümmungen der Erdoberfläche

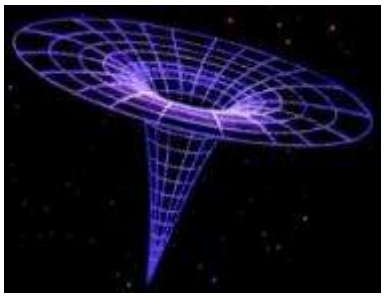
Krümmungen können durchaus auch negativ verlaufen. Während die grundlegende Form positiver Krümmungen die Kugeloberfläche ist, steht eine sattelförmige Oberfläche für negative Krümmungen:



Im euklidischen Raum (Mitte) beträgt im Dreieck die Summe der Winkel 180 °. Bei negativ gekrümmtem Raum beträgt die Winkelsumme eines Dreiecks weniger als 180 ° und der Umfang eines Kreises mit dem Radius r ist größer als 2πr. Auf der Kugel ist es umgekehrt.

Wenden wir uns nun der vierdimensionalen Raumzeit zu. Wir sehen Raum und Zeit in unserem Alltag gewohnheitsmäßig getrennt voneinander, aber das entspricht nicht der Realität. Stellen Sie sich einmal ein Universum ohne Zeit vor. Es wäre völlig unsinnig, denn es könnten darin keine Ereignisse stattfinden. Damit aber ein Ereignis stattfinden kann, benötigt man einen *Ort* (3 Raumdimensionen), an dem es ablaufen kann und man muss wissen, *wann* das erfolgte (1 Zeitdimension). Ohne Zeit gäbe es nicht die kleinste Bewegung, kein Planet würde einen Stern umlaufen, nicht mal ein Elektron einen Atomkern "umkreisen". Materie könnte also gar nicht existieren (höchstens Strahlung), es gäbe praktisch nichts als Raum. Hermann Minkowski erkannte schon 1908, dass Raum und Zeit unzertrennlich zu einer Einheit verbunden sind.

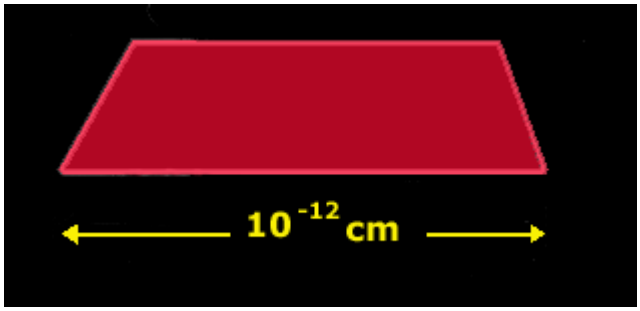
Wir haben es in der Tat mit einem eigenständigen, vierdimensionalen Gebilde zu tun, dem Raumzeit- Kontinuum. Minkowskis Raumzeit ist flach, quasi euklidisch. Wenn die Geschwindigkeiten klein sind, können wir auch beruhigt Minkowskis Raumzeit anwenden, ebenso wie die Newtonschen Gesetze oder die Spezielle Relativitätstheorie. Das gilt aber nicht mehr, wenn die Geschwindigkeiten hoch werden (*relativistisch*), oder wenn große Massen ins Spiel kommen!



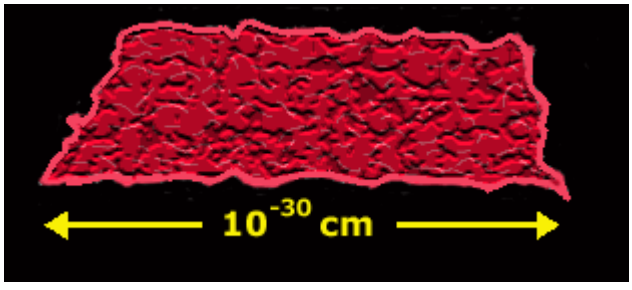
Stellen wir uns die vier Dimensionen auf ein zweidimensionales, gespanntes Tuch reduziert vor. Legt man einen Gegenstand auf das Tuch, so wird es sich nach unten "ausbeulen", es wird gekrümmt. Je größer die Masse ist, umso stärker ist diese Krümmung. Legen wir ein Schwarzes Loch auf das Raumzeit- Tuch, so wird die Krümmung sogar unendlich! Alle Körper im Kosmos krümmen nun die Raumzeit in dieser Weise, mehr oder weniger, je nach ihrer Masse. Die Krümmung von Masse ist immer positiv. Die umgebende Raumzeit reagiert darauf mit einer negativen Krümmung, sie wird sattelförmig verzerrt. Es entsteht quasi eine "Beule" in der Raumzeit und alles, Materie oder Licht, muss diesen Krümmungen folgen. Nach und nach heben sich die Krümmungen gegenseitig auf, je weiter man sich von der Masse entfernt.

Bei kleinen Körpern wie der Erde wirken sich die Raumzeitkrümmungen kaum bemerkbar aus, sie werden erst bei großen Massen spürbar. So wird z.B. das Licht eines Sterns beim Vorübergang nahe der Sonnenscheibe um einen kleinen, aber messbaren Winkelbetrag abgelenkt. Die Position des Sterns verschiebt sich dabei etwas am Himmel, weil die Sonne die Raumzeit krümmt und das Licht dieser Krümmung folgen muss. Große Massen wie Galaxien oder Galaxienhaufen wirken durch ihre starken Krümmungen sogar als Gravitationslinsen.

Betrachten wir das Universum auf großen Skalen, stellen wir fest, dass es überwiegend aus leerem Raum besteht. In dieser großräumigen Sichtweise sind deshalb auch keine nennenswerten Krümmungen festzustellen, so dass man von einer euklidischen oder "glatten" Raumzeit sprechen kann, einer Raumzeit also ohne Krümmungen. Nur an Orten großer Massekonzentrationen (Sterne, Galaxien) wird man Krümmungen finden.



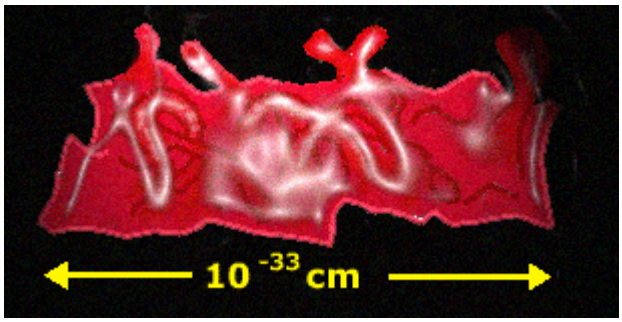
Stellen wir uns nun noch vor, wir könnten mit einem Mikroskop, welches beliebige Vergrößerungen erlaubt, die Raumzeit betrachten. Hier sehen wir einen Ausschnitt der Raumzeit, der eine Ausdehnung von nur einem Billionstel [cm] hat. Wir sehen - nichts! Die Raumzeit ist so glatt wie wir sie bereits kennen. Man kann das gut mit einer Flüssigkeit vergleichen: Betrachten Sie ein Glas Wasser, so erscheint die Oberfläche völlig glatt.



Unser Supermikroskop kann aber noch mehr, und so nutzen wir unsere Chance und schauen uns einen Abschnitt an, der nur noch 10^{-30} [cm] misst. In diesem unvorstellbar kleinen Segment sehen wir, dass Bewegung in die Raumzeit kommt. Wir erkennen leichte Kräuselungen, so, als wenn ein sanfter Wind auf der Oberfläche eines Sees kleine Wellen

entstehen lässt.

In unserem Wasserglas- Beispiel könnten wir nun erste Strukturen erkennen, die sich durch die räumliche Anordnung der Wassermoleküle ergeben.



Jetzt haben wir die Vergrößerung noch einmal um den Faktor 1000 herauf gefahren und befinden uns im Bereich der **Planck-Wheeler- Länge**, einer Strecke von nur noch 10^{-33} [cm]. Erstaunt stellen wir fest, dass aus den leichten Kräuselungen eine wilde Meeresbrandung geworden ist. Keine Regelmäßigkeit mehr kann unser Auge erkennen, die Raumzeit ist zu einem chaotischen Auf und Ab geworden. Das sind die Fluktuationen der Raumzeit, von deren tatsächlicher Existenz wir aber bis heute noch nicht sicher wissen. Die Oberfläche des Wassers würde uns ähnlich erscheinen. Wassermoleküle verlassen den Flüssigkeitsverbund und steigen chaotisch auf (das Wasser *verdunstet*), während gleichzeitig feinste Tröpfchen kondensierter Moleküle zurück fallen. Die Flüssigkeitsoberfläche ist in ständiger chaotischer Bewegung, als würde das Wasser kochen.

Wir haben nun die Raumzeit von den größten kosmischen Skalen bis herab zur kleinsten denkbaren Ausdehnung kennen gelernt und wie sie von Materie beeinflusst wird. Damit können wir uns jetzt in das Abenteuer Schwarze Löcher wagen.

Weiterführende Informationen:
http://www.kornelius.de/arth/

Wie aus viel Masse ein Loch wird

Wenn es auch schwer fällt, kann man sich doch noch in etwa vorstellen, wie ein Stern an seinem Entwicklungsende zu einem Weißen Zwerg oder gar Neutronenstern umgewandelt wird. Wie es zu diesen Endstadien kommt, sahen wir in den vorausgehenden Kapiteln. Sicher ist es keine leichte Aufgabe, sich von den ungeheuren Materiedichten dieser Objekte ein "Bild" zu machen. Oder können Sie sich etwa vergegenwärtigen, einen Teelöffel voll Materie in der Hand zu halten, der ein Gewicht von einer Milliarde Tonnen hat?

Ungleich schwerer ist es sich auszumalen, was beim Kollaps eines viele Sonnenmassen schweren Sterns passiert. Unsere Sonne ist mit ihrer Masse von rund 2×10^{30} [kg] ein wirkliches Leichtgewicht, wenn auch

2 000 000 000 000 000 000 000 000 000 Tonnen

eine beeindruckende Größe darstellen. Sie ist mit einem Durchmesser von 1,5 Millionen [km] auch nur ein Zwerg unter den Sternen und kann aufgrund dieser Zahlen nie zu einem Schwarzen Loch kollabieren. Hierzu bedarf es einer viel größeren Materiemenge, sagen wir ein Stern von mindestens rund 40 Sonnenmassen (eine exakte Grenze, die darüber entscheidet, ob aus dem Stern ein Schwarzes Loch oder ein Neutronenstern entsteht, kann nicht angegeben werden). Sterne können durchaus auch eine 100fache Sonnenmasse erreichen und so leicht auf Durchmesser von deutlich über 1 Milliarde [km] verweisen.

Und nun dürfen Sie sich einmal vorstellen, wie eine derart gewaltige Gaskugel in sich selbst zusammen bricht und am Ende einen Durchmesser von - *Null* - hat!

Wie aber kann nun überhaupt aus einem Stern ein Schwarzes Loch entstehen? Im Zentrum eines Sterns (später auch in Schalen um den Kern) werden chemische Elemente durch Kernfusionsprozesse zu höheren Elementen verschmolzen, wobei Energie (Strahlung) freigesetzt wird. Der Strahlungsdruck und vor allem der Druck des extrem heißen Gases setzt der nach innen gerichteten Gravitation eine gleichstarke Kraft entgegen. Solange Fusionen ablaufen können, befindet sich der Stern in einem *hydrostatischen* Gleichgewichtszustand. Hydrostatisch deshalb, weil sich Gase, die wie in einem Stern unter hohem Druck stehen, ähnlich wie Flüssigkeiten verhalten. Irgendwann aber ist alles an Kernbrennmaterial verbraucht und es wird keine Energie mehr freigesetzt. Dieser Fall tritt spätestens dann ein, wenn das Zentrum aus einer riesigen Eisenkugel (das Eisen ist unter diesen Bedingungen gasförmig!) besteht, denn Eisen kann nicht weiter zu höheren Elementen fusioniert werden. Das Innere des Glutballs kühlt ab und damit lässt der Gegendruck nach. Die Folge davon ist, dass sich der Stern unter seiner eigenen Last zusammenzieht.

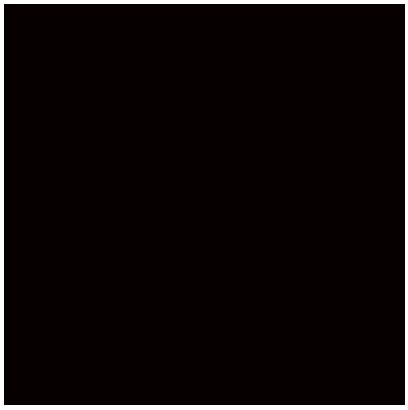
Ist der Stern bis zu 1,4 Sonnenmassen schwer, stoppen die Fusionen bereits, wenn aus dem Wasserstoff im Zentrum Kohlenstoff und Sauerstoff entstanden sind. Unter seinem eigenen Gewicht kontrahiert der Stern immer weiter. Die Temperatur im Innern steigt dadurch zwar weiter an, sie genügt jedoch nicht, um weitere Fusionen zu zünden. Bei Erreichen von etwa Erdgröße entarten die Elektronen, der so gebildete neue Druck stabilisiert den jetzt entstandenen Weißen Zwerg.

Zwischen 1,4 und etwa 2 Sonnenmassen schweren Restkernen, die nun bis hin zum Eisen fusioniert sind, führt die Energiekrise des Sterns zu noch kompakteren Körpern.

Die Gravitation wird übermächtig und presst die Materie derart zusammen, dass sogar die Elektronen mit den Protonen zu Neutronen verschmelzen.

Der Stern besteht jetzt fast nur noch aus diesen Neutronen. Bei einem Durchmesser von rund 20 [km] ist die Dichte so unvorstellbar groß, dass die Neutronen entarten und der Gravitation doch noch einmal Einhalt gebieten. Der nun gebildete Neutronenstern wird schlagartig inkompressibel und ist so dicht, dass ein Kubikzentimeter Materie 1 Milliarde Tonnen wiegt! Die restliche Hülle des Sterns stürzt mit 40 000 [km/s] auf die ultraharte Kugel und wird in Form einer Schockwelle zurückgeworfen. Eine Supernova explodiert und setzt ungeheure Energiemengen frei.

Ihren wahren Triumph feiert die Gravitation allerdings erst jetzt, wenn nämlich die Masse der Eisengaskugel im Sternzentrum mindestens zwischen etwa 2 und 3 Sonnenmassen beträgt und die Fusionen beendet sind. Es gibt nun keine Kraft mehr in der Natur, die der Gravitation entgegen wirken könnte. Innerhalb von Sekundenbruchteilen fällt das Zentrum in sich zusammen. Es gibt kein Halten mehr bei Erreichen der Erdgröße wie beim Weißen Zwerg, der Kollaps des Sterns stoppt auch nicht bei der Abmessung eines Neutronensterns. Der Zusammenbruch geht immer weiter, bis alle Materie in einem unendlich kleinen Punkt verschwunden ist, der so genannten Singularität.



Wir befinden uns in sicherer Entfernung von einem Stern, der gerade den Gravitationskollaps zu einem Schwarzen Loch erfährt. Haben wir zunächst noch die riesige Scheibe vor Augen, sehen wir die recht schnelle Schrumpfung - der Stern fällt in sich selbst zusammen. Doch etwas stimmt hier nicht! Der Durchmesser verjüngt sich nicht, wie oben gesagt, auf Null. Scheinbar stoppt die Schrumpfung bei einem bestimmten Durchmesser und die restliche Scheibe wird nur noch dunkler und verschwindet dann völlig. Wo liegt der Fehler?

Zunächst muss hier gesagt werden, dass wir bis heute nicht wissen, was genau beim Gravitationskollaps eines sehr massereichen Sterns geschieht. Es ist möglich, dass die Sternhülle in einer Supernovaexplosion fort geblasen wird. Dann stimmt der obige kleine Film nicht, wir würden stattdessen nur einen extrem hellen Lichtblitz sehen können.

Wenn sich jedoch ein Schwarzes Loch bildet, so muss man wissen, dass solche Objekte keine *feste* Oberfläche aufweisen. Die herabstürzenden Gasmassen der Hülle würden nicht wie beim Neutronenstern abprallen, sondern einfach in das sich bildende "Loch" einströmen und unseren Blicken entschwinden. In diesem Fall zeigt das Filmchen (stark vereinfacht) die tatsächlichen Vorgänge.

Doch ist immer noch nicht klar, wieso wir nicht sehen können, dass der Stern tatsächlich immer weiterschrumpft bis zu einem verschwindend kleinen Punkt!
Hierzu muss man sich vergegenwärtigen, dass bei zunehmender Schrumpfung des Sterns die Massendichte der Materiekugel immer höher wird. Dabei steigt auch die Anziehungskraft an der Sternoberfläche immer weiter an, so dass jetzt sogar die Teilchen des Lichts, die Photonen, beträchtliche Arbeit aufwenden müssen, um dieser Anziehungskraft zu entkommen. Das bedeutet, dass Licht rotverschobener, wird. Das sichtbare Licht wird in Richtung des energiearmen Rot verschoben, wird dann Infrarot, zur Mikrowelle, zur Radiowelle usw., je größer die Gravitation wird.

Der Stern wird also für uns immer unsichtbarer und weil das Licht auch gleichzeitig energieärmer wird, erscheint er immer dunkler.

Stellen Sie sich nun die Materiemenge von z.B. 40 Sonnenmassen, dem Rest des ehemaligen Gasballs von über 1 Milliarde [km] Ausdehnung (massereiche Sterne stoßen während ihres Lebens viel Materie in den Raum ab), auf eine Kugel von 120 [km] Durchmesser zusammengepresst vor. Die Gravitationskraft an der "Oberfläche" dieser Kugel ist jetzt so groß geworden, dass die Photonen nicht mehr entweichen können. Anders gesagt, wird die Rotverschiebung jetzt unendlich groß, die Fluchtgeschwindigkeit entspricht genau der Lichtgeschwindigkeit! Exakt bei Erreichen des **kritischen Radius** erlischt daher der Stern, wir können nicht mehr sehen, ob er noch weiter schrumpft oder überhaupt noch existiert. Scheinbar "friert" die Schrumpfung bei Erreichen dieser magischen Grenze ein, weshalb die Astronomen früher diese **Kollapsare** auch **Gefrorene Sterne** nannten.

Der kollabierte Stern entzieht sich nicht nur im sichtbaren Licht unseren Blicken. Informationen jeglicher Art können im materiefreien Raum, wie man (grob gesehen) den Raum zwischen den Sternen vorfindet, nur durch elektromagnetische Wellen übertragen werden. Die kleinste Energieeinheit jeder Welle aber ist stets das Photon, so dass weder Radio-, Wärme-, Röntgen- oder Gammastrahlung oder irgendeine andere den implodierten Stern verlassen können. Er ist somit im wahrsten Sinne des Wortes eingefroren: Seine Ausdehnung erstarrt, alle Informationen aus seinem Innern "gefrieren" und es wird tatsächlich nicht einmal mehr Wärme von dem gerade noch superheißen Stern ausgehen. Der amerikanische Wissenschaftler **John Wheeler** bedachte 1969 die gefrorenen Sterne mit dem sehr zutreffenden Ausdruck **Schwarzes Loch**. Alles was sich innerhalb der kritischen Grenze befindet oder ereignet, bleibt für immer darin gefangen. Nichts kann daraus entkommen, deshalb sind Schwarze Löcher auch wirklich schwarz!

Im nächsten Abschnitt werden wir sehen, was der kritische Radius genau ist, was unterhalb geschieht und was verschiedene Beobachter sehen können - oder auch nicht.

Weitere Informationen: http://www.mpe.mpg.de/~amueller/astro_sl.html

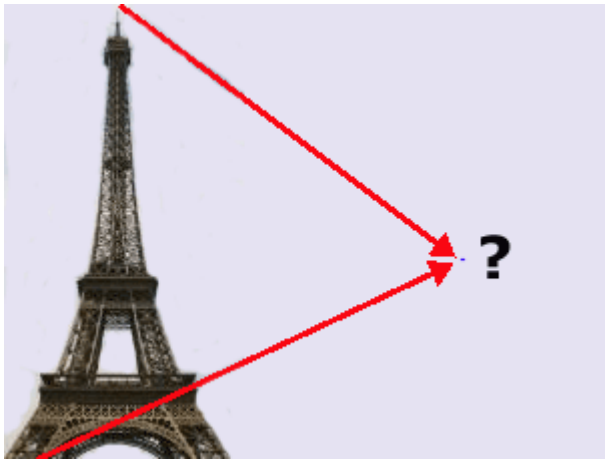
Horizonte

Schwarzschild- Radius

Wie wir gesehen haben, verschwindet der kollabierte Stern bei Erreichen einer bestimmten Grenze, dem kritischen Radius, nicht nur von unserer "Bildfläche", er schneidet sich völlig vom übrigen Universum ab. Der deutsche Astronom **Karl Schwarzschild** (1873-1916) hatte bereits 1916 aus der Einsteinschen Formulierung der Gravitationsgesetze, erschienen 1915 als **Allgemeine Relativitätstheorie**, die Krümmung der Raumzeit in der Umgebung eines nicht rotierenden Sterns abgeleitet. Wenig später berechnete er aus Einsteins Feldgleichungen auch die Raumzeitkrümmung innerhalb des Sterns. Beide Arbeiten legte er Einstein vor, der sie sofort begeistert veröffentlichte. Kurz darauf verstarb Schwarzschild an den Folgen einer Erkrankung, die er sich an der russischen Front zugezogen hatte.

Aus seinen Ableitungen folgte, dass es für jede Masse einen kritischen Radius gibt. Wird dieser unterschritten, existiert keine Kraft mehr in der Natur, die der Gravitation noch etwas entgegen setzen könnte. Unweigerlich setzt bei Erreichen dieser Ausdehnung der Kollaps zum Schwarzen Loch ein!

Dieser **Schwarzschild- Radius** beträgt beispielsweise für die Sonne lediglich 2,95 [km], für die Erde weniger als 1 [cm] und für einen Menschen gerade noch 10^{-23} [cm].



Wenn wir also Sonne, Erde oder Mensch derart zusammen pressen würden, entstünde jeweils ein Schwarzes Loch! Allerdings können wir vorerst beruhigt sein, denn es ist keiner noch so großen Kraft möglich, aus unsereins Schwarze Löcher zu zaubern. Von derart großen Kräften kann man sich kaum eine Vorstellung machen. Oder können Sie sich einen Apparat denken, der den gesamten Eiffelturm zu einer Kugel von 1 [cm] Durchmesser zusammenstaucht? Das wäre nur ein Kinderspiel im Vergleich zu dem, was die Gravitation aus einem Stern machen kann (weiter unten können Sie leicht selbst berechnen, was die Gravitation mit dem Eiffelturm anstellen könnte)!

Man bezeichnet eine solche Grenze auch als **Ereignishorizont**, weil jedes hinter diesem Horizont stattfindende Ereignis einem außenstehenden Beobachter für ewig verborgen bleibt. Wir rekapitulieren: Photonen innerhalb dieser Grenze sind unendlich rotverschoben bzw. können sie nicht überwinden, weil sie nicht schneller als Lichtgeschwindigkeit fliegen, die Fluchtgeschwindigkeit im Innern aber darüber liegt.

Sterne mit einem inneren Kern von mehr als etwa 3 Sonnenmassen werden bei ihrem Schrumpfungsprozess den kritischen Radius unterschreiten. Die Eigengravitation dieser Masse ist so stark, dass es für die weitere Verdichtung des Sterns kein Halten mehr gibt. Der Zusammenbruch zum Schwarzen Loch ist nun endgültig und unausweichlich.

Schwarzschild- Radius

Die kritische Grenzgröße r_s, der Schwarzschild- Radius, wird berechnet nach:

$$r_s = 2 \times G \times M/c^2$$

wobei **G** die Gravitationskonstante (**G = 6,67259·10^{-11}[m^{3}kg^{-1}s^{-2}]**), **M** die Masse des Sterns und **c** die Lichtgeschwindigkeit ist.

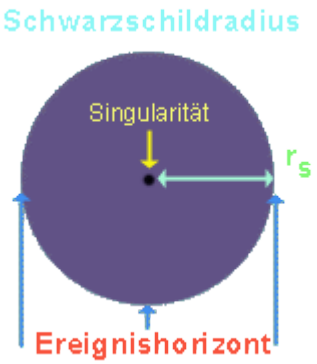
Wie kommt man ausgerechnet auf diese Formel?
Wenn ein Körper ein Gravitationsfeld verlassen will, muss seine kinetische Energie größer als die potentielle Energie sein. Um nun die Entweichgeschwindigkeit aus einem Gravitationsfeld zu berechnen, das von einem Körper mit der Masse **M** und dem Radius **r** ausgeht, kann man die potentielle Energie **GM/r** der kinetischen Energie **v^2/2** eines Teilchens mit einer angenommenen Masse von 1 gleichsetzen. Wenn die kinetische Energie des Teilchens größer ist, kann es entweichen. Löst man die Gleichung auf, erhält man als Entweichgeschwindigkeit **(2GM/r)$^{1/2}$** .

Bei einem Schwarzen Loch ist die Entweichgeschwindigkeit am Ereignishorizont gleich der Lichtgeschwindigkeit, also können wir **v = c** setzen.
Das Ganze sieht dann so aus:

$$c^2/2 = GM/R$$
$$c^2 = 2GM/R$$
$$Rc^2 = 2GM$$
$$R = 2GM/c^2$$

Der Schwarzschildradius stellt also eine Grenze dar, mit der sich das Schwarze Loch vom Rest des Universums abschneidet. Unterhalb dieser Grenze kann kein Signal das Loch verlassen, ein außenstehender Beobachter kann deshalb kein Ereignis mehr erkennen. Sobald sich der Ereignishorizont ausgebildet hat, wird die Raumzeit in zwei Zonen unterteilt: Außerhalb des Horizonts können wir beliebig mit elektromagnetischen Wellen (Licht-, Radiowellen etc.) kommunizieren, Ereignisse beobachten usw. Innerhalb des Horizonts gelten jedoch andere Regeln. Signale können nicht mehr beliebig zwischen Ereignissen ausgetauscht werden, sondern müssen unausweichlich zum Zentrum eilen.

Nebenstehend ist ein Schwarzes Loch skizziert um zu verdeutlichen, dass der Ereignishorizont bzw. Schwarzschildradius dessen Ausdehnung bestimmt. Diese Größe ist ausschließlich von der Masse im Zentrum abhängig. Alles was sich innerhalb dieser Grenzen abspielt, bleibt uns für immer verborgen.

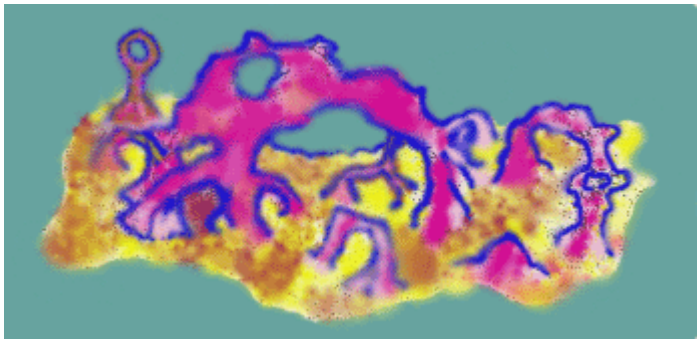


Damit befinden wir uns auch schon mitten im Schwarzen Loch. Zunächst stellt sich uns die Frage, was ist eigentlich aus dem Rest des Sterns geworden? Wir konnten ja nicht mehr sehen, ob er überhaupt noch weiter schrumpft. Stellen wir uns dazu vor, wir würden als "unzerstörbare" Beobachter den Kollaps des Sterns auf seiner Oberfläche miterleben. Zunächst werden wir nur bemerken, dass der Stern beginnt zu schrumpfen.

Die Geschwindigkeit der Kontraktion wird aber zunehmend schneller und schon bald erreichen wir den Ereignishorizont. Hiervon "spüren" wir jedoch rein gar nichts! Der Ereignishorizont ist ja keine materielle Grenze, die uns irgendwie behindern würde. Lediglich Informationen und leider auch wir können nicht mehr nach außen gelangen. Inzwischen haben wir tüchtig "Fahrt" aufgenommen, den Horizont haben wir nämlich bereits mit Lichtgeschwindigkeit überschritten. Und es wird immer schneller, der Stern zu unseren Füßen schrumpft unaufhörlich weiter, bis er schließlich einen Durchmesser von - Null erreicht hat! Das allerdings bekommen wir nur noch am Rande mit, denn kurz vor Erreichen dieses Punktes fallen wir mit Überlichtgeschwindigkeit. Das ist hier möglich, weil die Raumzeit völlig verzerrt ist und nichts mehr mit unserem gewohnten Universum gemein hat. In unserem "normalen" Dasein waren wir noch zeitartige Wesen, weil unser Leben uns durch die Zeit führte. Bei Überschreitung des Horizonts wurden wir lichtartig, da wir uns mit Lichtgeschwindigkeit bewegten und Zeit daher für uns keine Rolle mehr spielte. Auf unserem Weg zur Singularität sind wir nun raumartig geworden, wir haben tachyonische Eigenschaften angenommen, weil wir uns jetzt mit Überlichtgeschwindigkeit ins Abenteuer stürzen. Unsere Unzerstörbarkeit nutzt nun leider auch nicht mehr viel. Durch immer stärker werdende Gezeitenkräfte wird unser geschundener Körper zum Schluss unendlich in die Länge gezogen, wobei er auch noch unendlich dünn zusammen gequetscht wird. Wenn man mit den Füßen voran nach unten fliegt, so wirkt auf sie eine viel größere Anziehungskraft aus als auf den Kopf. Diese Gezeitenkräfte machen sich jetzt extrem bemerkbar. Am Ende sind selbst all unsere Atome bis zur Unendlichkeit verzerrt, wenn sie mit dem zentralen Punkt verschmelzen.

Der einstige Stern riesiger Ausdehnung ist zu einem (fast) unendlich kleinen Punkt geschrumpft. Diesen Punkt im Zentrum des Schwarzen Loches nennt man **Singularität**. Der Stern implodiert nach der Allgemeinen Relativitätstheorie zu einem Punkt unendlich kleiner Ausdehnung und unendlich hoher Dichte. Die Gravitation ist hier unendlich hoch, die Krümmung der Raumzeit ebenfalls, so dass sie aufhört zu existieren. Auch die Gezeitenkräfte werden in der Singularität unendlich: Gegenstände werden in der einen Richtung unendlich gedehnt und gleichzeitig in einer anderen Richtung unendlich zusammengepresst.

Die Unendlichkeiten der Singularität erhält man irrtümlich, wenn sie nur mit Hilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben wird. Unendlichkeiten kommen in der Natur höchst selten vor (oder gar nicht), daher braucht man andere Hilfsmittel. Sicher ist, dass wir uns bei einer Singularität im Bereich der Quantenebene bewegen. Doch sie lässt sich nicht einfach mit der klassischen Quantenphysik beschreiben, weil die Gravitation hier alles dominiert. Im Innern Schwarzer Löcher haben alle unserer physikalischen Gesetze keine Gültigkeit mehr.



So ist man immer noch auf der Suche nach der **Quantengravitation**, einer Theorie, welche die Allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik vereinigt. Mit ihrer Hilfe lässt sich die Singularität vermutlich als **Quantenschaum** beschreiben mit einer Ausdehnung von 10^{-33} [cm], der so genannten Planck- Wheeler- Länge. Man stellt sich vor, dass der Raum der Singularität auf diesen winzigen Skalen nicht mehr *glatt* ist, so wie wir ihn normalerweise kennen, sondern eher *rauh* und eine zufällige, schaumartige Struktur aufweist. Genauso ist es möglich, dass wir es hier neben den vier gewohnten mit weiteren, zusätzlichen Dimensionen zu tun haben. Die Topologie des Quantenschaums ist nicht mehr fixiert, sondern wird nur noch durch Wahrscheinlichkeiten beschrieben.

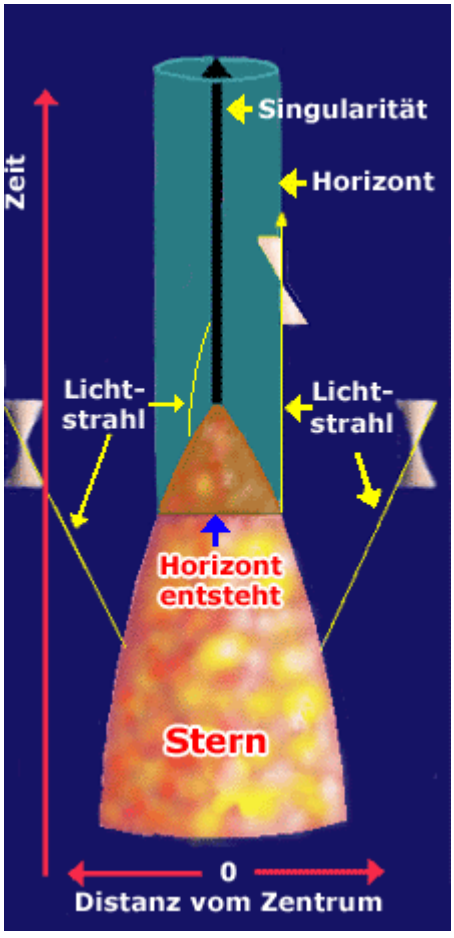
Bevor wir uns weiter mit dem Innern Schwarzer Löcher beschäftigen, müssen wir nochmals zurück zum Ausgangspunkt, zu dem Moment also, an dem der Stern beginnt zu kollabieren. Zum Glück brauchen wir nun aber den Höllenritt auf dem Stern nicht selbst durchzustehen, sondern wir überlassen das einem abgehärteten Astronauten. Dieser hat eine Uhr mitgenommen, die völlig synchron mit unserer Borduhr geht. Während wir in sicherem Abstand den Stern umkreisen, beginnt nun dessen Kollaps. Zusätzlich sendet die Uhr des Astronauten jede Sekunde ein Funksignal aus, so dass uns seine Zeit stets bekannt ist.

Zu Beginn der Kontraktion winkt uns der Astronaut noch schnell fröhlich zu und wir sehen, dass beide Uhren exakt dieselbe Zeit anzeigen. Wir beobachten die Schrumpfung, die nun immer schneller erfolgt. Nach unserer Berechnung erreicht der Stern exakt um 8:30 Uhr den kritischen Radius. Bis 8:29 Uhr können wir nichts Besonderes bemerken, die Uhren laufen synchron und der Astronaut schrumpft weiter mit dem Stern. Das bleibt auch so bis 8:29 Uhr und 59 Sekunden. Nun ändert sich aber alles dramatisch: Das 8:30 Uhr Signal trifft nicht mehr bei uns ein! Die Lichtwellen des Sterns (und die vom Astronauten) kommen in immer größeren Abständen an, je mehr sich der Stern dem Ereignishorizont nähert. Das bedeutet, dass die Lichtsignale immer röter werden (Rotverschiebung). Jetzt haben wir sehr viel Geduld aufzubringen, denn es wird unendlich lange dauern, bis der arme Astronaut im sich bildenden Schwarzen Loch verschwindet! Sehen könnten wir das leider nie, denn aufgrund des immer röter und gleichzeitig auch dunkler (weil energieärmer) werdenden Lichts würden wir den Astronauten gar nicht mehr sehen. Wir könnten lediglich ein Anwachsen des Horizonts feststellen, weil das Schwarze Loch ja um eine "Astronautenmasse" größer geworden ist.

Der Astronaut bekommt davon natürlich nichts mit. Er "erlebt" denselben Vorgang, wie wir ihn zuvor auf unserer Reise beobachteten. Seine Uhr geht völlig normal, und um Punkt 8:30 Uhr passiert er den Ereignishorizont, um Sekundenbruchteile später lang gezogen wie eine Spaghetti in der Singularität zu verschwinden.

Wieso diese Unterschiede aus den beiden Blickwinkeln?

Die *gravitative* oder *relativistische* Rotverschiebung des Lichts (und aller anderen elektromagnetischen Wellen) haben wir schon kennen gelernt. Bis jetzt wurde aber die Zeit noch nicht berücksichtigt! Gravitation, wenn sie genügend stark ist, kann merklich die Zeit beeinflussen, und zwar verlangsamen. Es handelt sich dabei um die gleiche Zeitdehnung, wie sie spürbar wird, wenn man sich der Lichtgeschwindigkeit nähert. Wenn sich nun der Ereignishorizont um den Stern schließt, so tritt derselbe Effekt ein, als wenn man sich mit exakt Lichtgeschwindigkeit bewegen würde: Für einen außenstehenden Beobachter bleibt die Zeit im betrachteten System stehen! Auch deshalb dauert es für uns unendlich lang, bis der arme Astronaut im Loch verschwindet. Er ist nun lichtartig geworden und ist damit wie ein Photon ohne Zeit.

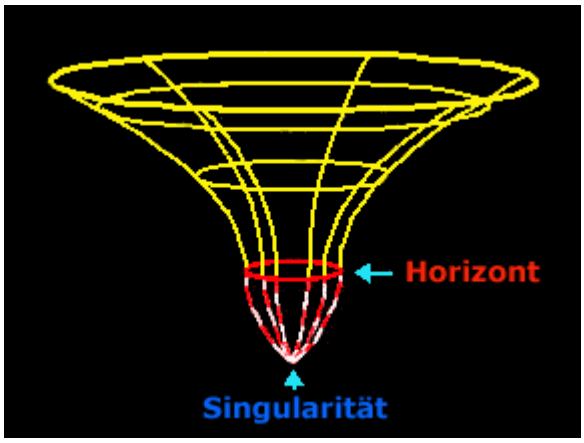


Hier ist als Raumzeitdiagramm der Kollaps eines Sterns dargestellt. Wir sehen, wie der Radius von unten beginnend, im Laufe der Zeit ständig kleiner wird. Lichtstrahlen können den Stern noch problemlos verlassen (eingezeichnet sind auch Lichtkegel, die sich vorerst noch in unserem Universum entfalten können). Wenn der kritische Radius erreicht ist, wird die Krümmung der Lichtkegel nach innen so groß, dass Licht nicht mehr entkommen kann. Wir sehen einen Lichtstrahl, der in diesem Moment emittiert wurde (rechts) und einen, der nach Schließen des Horizonts entstand (links). Letzterer kann nun nicht mehr entweichen, sondern wird zur Singularität hin gezwungen. Die Fluchtgeschwindigkeit ist gleich oder größer als die Lichtgeschwindigkeit. Geodäten von massebehafteten Teilchen, die sich noch außerhalb des Horizonts befinden, sind zeitartig. Das heißt, ihre Weltlinien liegen innerhalb eines Lichtkegels. Exakt auf dem Horizont sind sie lichtartig, da sie sich hier bereits mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Im Schwarzen Loch selbst werden die Weltlinien raumartig, Zeit verliert hier ihre Gültigkeit und das Teilchen rast mit Überlichtgeschwindigkeit auf die Singularität zu. Innerhalb des Lochs ist das möglich, weil die uns bekannte Raumzeit nicht mehr existiert.
Anzumerken ist an dieser Stelle, dass der Kollaps eines Sterns nur modellhaft beschrieben wurde. In der Realität kontrahiert ja zuerst das im Vergleich zum übrigen Stern kleine Zentrum zu einem Schwarzen Loch, und das innerhalb von Sekundenbruchteilen. Es hat sich also längst gebildet, wenn wir von außen immer noch auf die glühende Hülle sehen und vielleicht noch nicht einmal erahnen können, welche Katastrophe sich im Innern abspielte.

Weitere Informationen: http://www.mpe.mpg.de/~amueller/astro_sl.html#eig

Seltsame Eigenschaften

Schwarze Löcher haben wirklich seltsame Eigenschaften. Uns ist nun klar, dass die Gravitation dieser Gebilde ungeheure, besser gesagt unvorstellbare Größen annimmt. Nicht nur jede ins Loch einfallende Materie wird bis zur Unkenntlichkeit zerstört und verzerrt, ja selbst die Raumzeit wird arg gebeutelt. Das geht so weit, dass ihre Krümmung nach der Allgemeinen Relativitätstheorie in der Singularität unendlich wird. Raum und Zeit hören auf zu existieren!

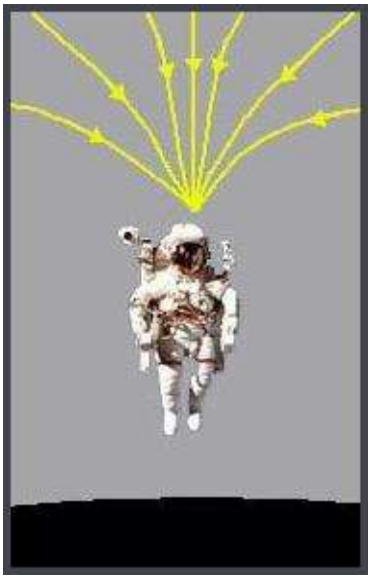


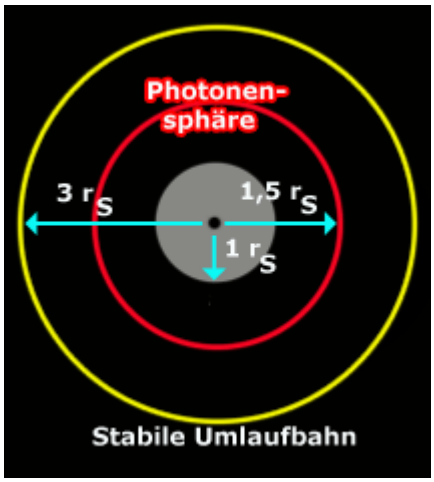
Stellen wir uns die Raumzeit nochmals als ein gespanntes Tuch vor. Ist keine Materie zugegen, ist es flach und glatt. Legt man aber einen Gegenstand darauf, so wird das Tuch je nach Gewicht des Gegenstandes mehr oder weniger stark ausgebeult - es wird gekrümmt. Ein Schwarzes Loch beeinflusst die Raumzeit so stark, dass die Krümmung in dessen Zentrum unendliche Werte annimmt. Im nebenstehenden Diagramm sind der Horizont und die Singularität angedeutet, letztere befindet sich am untersten Punkt. In Wirklichkeit kann man das Geschehen nicht zeichnerisch darstellen, weil der Trichter unendlich lang und dünn werden müsste.

Wir wissen jetzt, was beim Kollaps eines Sterns zum Schwarzen Loch geschieht und was Beobachter an verschiedenen Orten ("Bezugssystemen") sehen würden. Aber bemühen wir doch noch einmal unseren armen Astronauten und lassen ihn eine Reise in das "fertige" Schwarze Loch unternehmen! Dazu muss er ungewöhnliche, übermenschliche Eigenschaften aufweisen, die es in der Realität natürlich nicht gibt. Doch er ist ja schon recht gut abgehärtet...

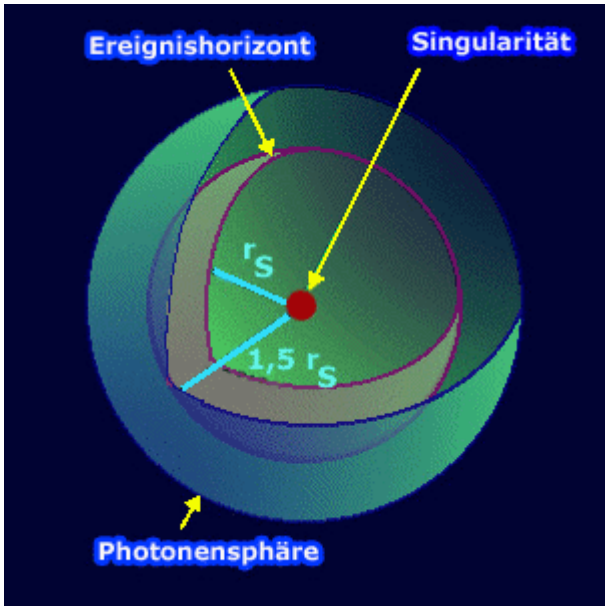
Wie oben gezeigt, ist die Krümmung der Raumzeit bereits in der Umgebung des Ereignishorizonts recht groß. Der Astronaut beginnt also seinen Abstieg zum Loch, indem er es vorsichtig umkreist. Er beginnt mit einer Umlaufbahn von z.B. 100 000 [km] Länge. Bereits jetzt spürt er deutlich, dass seine Füße stärker angezogen werden als sein Kopf, doch diese mörderischen Kräfte, die ihn am Ende zerreißen werden, ist er ja bereits gewohnt.
Während er jetzt weiter sinkt, beobachtet er, wie unter ihm das Schwarze Loch immer mehr an Größe zunimmt. Seltsamerweise nimmt nun der sichtbare Himmelsausschnitt im selben Maße ab, wie das dunkle Loch unter dem Astronauten anwächst. Das geht sogar so weit, dass sich das Schwarze Loch scheinbar auch seitlich um den Astronauten schließt, obwohl er noch weit vom Horizont entfernt ist. Wie ist das möglich?

Der Astronaut sieht den Himmel in einem immer kleiner werdenden Durchmesser, je tiefer er zum Loch absinkt. Durch die ungeheure Gravitation in der Nähe des Horizonts werden die Lichtstrahlen immer mehr abgelenkt. Selbst das Licht von Sternen, die sich querab in horizontaler Position (90° vom Zenit) befinden, sieht der Astronaut nun direkt von vorn kommen. Anders ausgedrückt: Die Lichtstrahlen werden gezwungen, den immer stärkeren Krümmungen der Raumzeit zu folgen!

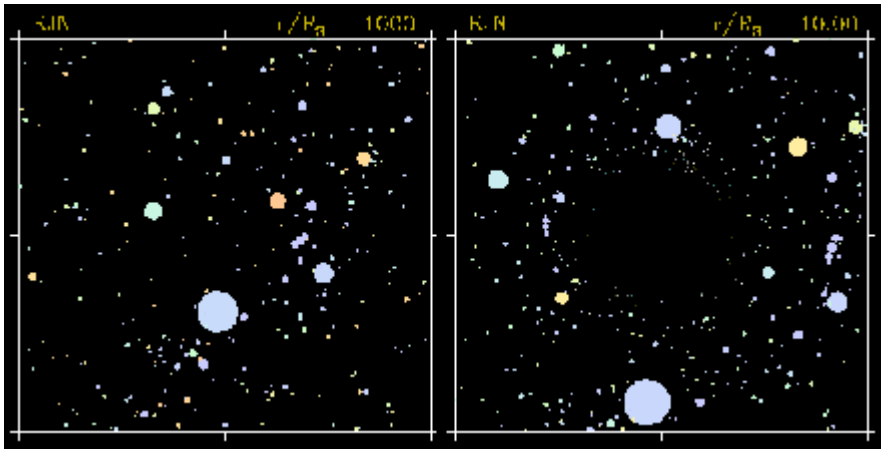




Hier eine Skizze, in die wir verschiedene Abstände von der Singularität eingezeichnet haben. Der Ereignishorizont befindet sich im Abstand von einem Schwarzschildradius, also 1 r_S. Im Abstand von 1,5 r_S finden wir eine Bahn, auf der ein unter günstigstem Winkel eingebrachtes Photon sich gerade noch aufhalten kann. Man nennt diese Bahn daher auch **Photonensphäre**. Das Photon würde hier unendlich lang das Loch umkreisen. Bei geringster Unterschreitung dieses Abstandes wäre sein Absturz ins Loch allerdings besiegelt. Für den Astronauten gilt etwas anderes: will er das Loch nur umkreisen und sich eine Chance zur Rückkehr offen halten, so darf er sich in einer Distanz von höchstens 3 r_S aufhalten, ansonsten ist er für immer verloren!



Nun können wir ein plastisches "Bild" eines Schwarzen Lochs zeichnen. Dass die Singularität eigentlich nicht dargestellt werden kann ist uns klar: Sie ist (fast) unendlich klein. Der Schwarzschildhorizont ist die absolute Grenze zwischen dem uns bekannten Weltraum und einem *"irgendwas dahinter"*. Es ist ein *"point of no return"*, wer ihn überschreitet, kann nie mehr zurück. Umschlossen wird das Loch im Abstand von 1,5 Schwarzschildradien von einer weiteren Grenze, der schon genannten Photonensphäre. Sobald diese Distanz minimal unterschritten wird, gibt es auch für das Licht kein Entrinnen mehr.



In dieser Computersimulation ist ein künstlicher Himmelsausschnitt dargestellt, wie der Astronaut das Schwarze Loch bei seiner Annäherung erblicken würde. Im linken Bild erkennt man die drei Gürtelsterne des Sternbilds Orion. In die rechte Bildhälfte wurde ein Schwarzes Loch "eingerechnet". Das Loch selbst ist natürlich nicht sichtbar, man sieht aber deutlich die Verzerrungen, die von seinem Gravitationsfeld hervorgerufen werden. Es wirkt aus dieser Distanz bereits als Gravitationslinse und erzeugt Doppelbilder der hinter ihm liegenden Sterne. Würde man sich dem Loch noch weiter nähern, so könnte man aus einem Blickwinkel das gesamte Weltall überschauen.

Mit freundlicher Genehmigung von Robert Nemiroff (MTU)

Unser tapferer Astronaut ist dem Ereignishorizont nun schon ziemlich nah gekommen. Die Raumzeitkrümmungen wirken sich immer stärker aus und das Licht des ganzen Universums wird in einen kleinen hellen Abschnitt seines Sichtfelds gebündelt. Selbst das Licht der hinter dem Beobachter liegenden Quellen kommt nun von vorn auf ihn zu (das wäre nicht der Fall, könnte er anhalten). Je tiefer er sinkt, umso kleiner wird die Sichtöffnung, dafür schließt sich immer mehr der schwarze Ereignishorizont des Lochs um den Astronauten.

Raum und Zeit werden mit dem Licht und unserem Astronauten ins Schwarze Loch gezogen. Genau in dem Moment, als er den Ereignishorizont überquert, wirft er einen Blick in die Unendlichkeit! Die Beeinflussung der Zeit durch die Gravitation erfährt er nun in voller Pracht. Obwohl seine Uhr für ihn völlig "normal" weiterläuft, sieht er jetzt die Vorgänge im Universum wie in einem wahnsinnigen Zeitraffer ablaufen. Doch schon ist dieser Anblick vorüber, denn nun ist der tapfere Astronaut im Innern des Schwarzen Lochs.

Jetzt wird es noch exotischer! Immer noch kann er Licht aus unserem Universum sehen, vielleicht als verschwommenes Halo. Wenn er genau hinsieht, kann er denselben Film wie zuvor anschauen, nur läuft dieser jetzt rückwärts. Nach einer Weile kann er sogar sehen, wie er aus dem Schwarzen Loch steigt und erlebt rückwärts noch einmal alle Ereignisse bis zu seinem Start. Erst wenn unser Held in die Mitte des Lochs gelangt, wird er nichts mehr von unserem Universum sehen, denn nun gelangt er in die fürchterliche Singularität, in der die physikalischen Gesetze ihre Gültigkeit verlieren.

Eine solche Reise in ein Schwarzes Loch ist natürlich nur fiktiv. Wie wir noch sehen werden, sind die meisten Schwarzen Löcher von einer Scheibe glühend heißen Plasmas umgeben. Hinzu kommen Gezeitenkräfte, die jeden noch so stabilen Körper bis zur Unkenntlichkeit zerfetzen. Selbst bei superschweren Ausgaben dieser Objekte, bei denen die Gezeitenkräfte am Horizont noch erträglich wären, stürzt jede Materie ab dem Horizont unweigerlich mit Lichtgeschwindigkeit zur Singularität. Falls man überhaupt bis zum Horizont gelangen würde, denn die meisten Löcher rotieren, sehr schnell, und die mitrotierende umgebende Raumzeit zwingt allem diese Bewegung mit bis zur halben Lichtgeschwindigkeit auf...

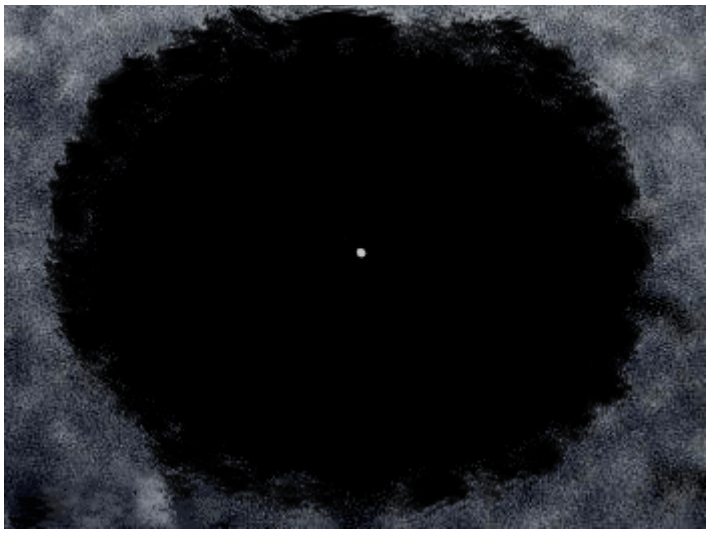
Die Folgerungen der Allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins lassen noch weitere, interessante Aspekte zu: Es gibt Symmetrien der Zeit. Das bedeutet, dass Zeit vorwärts und rückwärts laufen könnte (siehe hierzu auch Hawkings Universum). Daraus lässt sich folgern, dass die Zeit, wenn sie am Ereignishorizont eines Schwarzen Loches bereits stehen bleibt, sich in der Singularität umkehrt und dann rückwärts laufen könnte. Wenn man diesen Gedanken weiter verfolgt, kommt man zum Schluss, dass es auch "umgekehrte" Schwarze Löcher geben könnte.

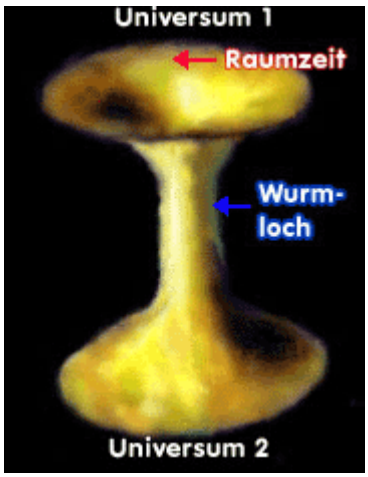
Ein Schwarzes Loch ist ein Objekt, aus dem nichts mehr entweichen kann. So wäre es denkbar, dass irgendwo im Universum ein Ort existiert, an dem die umgekehrte Version zu Tage tritt und in welche nichts hineingeraten, nichts eindringen kann. Im Gegenteil: es müsste Materie und Energie emittieren. Das könnte man als **Weißes Loch** bezeichnen. Das größte Weiße Loch war sicherlich unser Kosmos zum Zeitpunkt des Urknalls, ein winziger Ort, aus dem Energie nur so "sprudelte". Manche Astrophysiker glauben, dass die Materie und die Energien, die ein Schwarzes Loch aufsaugt, an einem ganz anderem Ort des Kosmos, vielleicht sogar in einem anderen (Parallel-) Universum oder in einer unbekannten Dimension wieder "ausgespuckt" werden.
Dies ist jedoch ein rein theoretisches, mathematisches Modell, ob Weiße Löcher tatsächlich existieren, ist niemandem bekannt.

Das stört unseren Astronauten jetzt aber auch nicht mehr. Er stürzt weiter zur Singularität. Wenn er in ihre Richtung sieht, erkennt er einen winzigen Lichtpunkt in der Mitte.

Dieses Licht in der Mitte kommt aus einem anderen Universum. Umgeben ist es von tiefer Schwärze, doch sieht er immer noch einen Halo, Licht aus unserem Universum. Je tiefer der Astronaut sinkt, umso schmaler wird der dunkle Rand. Kurz bevor er endgültig in der Singularität verschwindet, sieht er vor allem Licht und er kann erkennen, was sich im anderen Universum abspielt.

Nur - die Zeit dort verläuft der unseren genau entgegengesetzt.





Schon 1935 erkannten Einstein und **Nathan Rosen**, dass die Allgemeine Relativitätstheorie "Brücken" in der Raumzeit zulässt (*Einstein-Rosen-Brücke*). Heute bezeichnen wir diese als **Wurmlöcher**. Sie stellen quasi einen Verbindungstunnel dar zwischen einem Schwarzen und einem Weißen Loch, möglicherweise könnten Wurmlöcher sogar zwei Universen miteinander verbinden. Durch diesen Tunnel könnte das Licht gelangen, das unser Astronaut sah, kurz bevor er auf Nimmerwiedersehen in der Singularität verschwand. Bitte planen Sie nun aber keine Reise durch ein Wurmloch in ein anderes Universum! Solche Wurmlöcher schnüren sich in der Mitte fast unendlich dünn ein, und bei der geringsten Störung reißt die Brücke sofort ab. Zudem: Nicht einmal unser äußerst robuster Astronaut hat den Sturz in die Singularität überlebt...

Vieles von dem, was der tapfere Held auf seiner Reise sah, ist Spekulation. Niemand weiß, ob es andere Universen gibt, ob Weiße Löcher oder Wurmlöcher existieren oder wie es im Innern Schwarzer Löcher aussieht. Aber wir erkennen, welche Faszination von diesen simplen Gebilden ausgeht. Sehen wir nun, was geschieht wenn Schwarze Löcher auch noch rotieren!

Karussell der Raumzeit

Bis jetzt haben wir Schwarze Löcher als einfache, simple Gebilde kennen gelernt, was sie im Grunde auch sind. Man kann sie recht kurz beschreiben durch ihre Masse und dem daraus folgenden Radius. Eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichung ("*Reissner-Nordström-Lösung*") weist darauf hin, dass Schwarze Löcher eine elektrische Ladung besitzen können, was ein weiterer Aspekt ihrer Beschreibung wäre. Es spricht nichts dagegen, dass aus dem Loch elektrische Feldlinien herausragen. Wären sie positiv geladen, würden z.B. Elektronen angezogen, bei negativer Ladung Protonen. Diese Teilchen würden bei ihrem Sturz ins Loch dessen Ladung recht schnell neutralisieren. Das aus dem Grund, weil Schwarze Löcher im Kosmos stets von Materie umgeben sind. Materie besteht aus Elektronen und Protonen (sowie Neutronen), also positiven und negativen Ladungen. Die elektrostatischen Anziehungskräfte eines geladenen Schwarzen Lochs sind eine Milliarde Milliarden Mal stärker als seine Gravitation, daher wäre seine Ladung in kürzester Zeit durch Anziehung der entgegengesetzt geladenen Teilchen neutralisiert. Eine weitere Betrachtung geladener Löcher erübrigt sich daher, denn in der Natur werden wir sie kaum antreffen.

Etwas sehr Wichtiges wurde bei den bisherigen Betrachtungen allerdings noch nicht beachtet: Alle Sterne, die wir beobachten können, rotieren! Bis jetzt führte unsere Reise lediglich zu "statischen" Schwarzen Löchern, also solchen, die nicht rotieren. Doch wenn ein Stern kollabiert, dann muss nach dem physikalischen Gesetz der Drehimpuls erhalten bleiben, es sei denn, er wird durch eine äußere Kraft gebremst. Weil es keine "Bremse" bei einem solchen Ereignis gibt, werden somit die allermeisten Schwarzen Löcher rotieren!

Damit haben wir alles beisammen, um ein Schwarzes Loch zu beschreiben:

Masse Drehimpuls Ladung

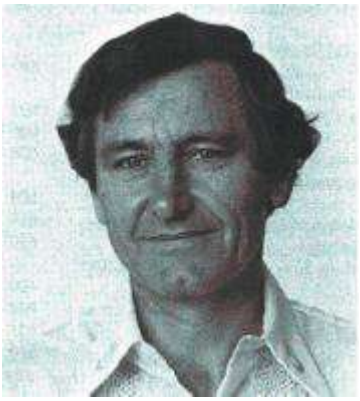
Mehr als das kann man niemals über ein Schwarzes Loch erfahren. Man kann hinfliegen und diese Größen messen, aber man wird nie herausbekommen, ob das Loch z.B. aus einem Stern entstanden ist oder vielleicht sogar aus Antimaterie besteht. Nun wird man sich fragen, was passiert denn mit dem Magnetfeld des Sterns, wenn er kollabiert? Es müsste doch zu ungeheurer Stärke verdichtet werden, noch viel mächtiger als bei den Magnetaren. Doch auch hier siegt die Gravitation. Die magnetischen Feldlinien werden immer mehr nach unten gebogen und wenn der Stern den kritischen Radius erreicht hat, ragt keine einzige mehr aus dem Loch heraus. Die Gravitation lässt es nicht zu, dass wir mehr als die drei oben genannten Größen erfahren! Diese Eigenschaften, die ein Schwarzes Loch zu einem "simplen" Gebilde machen, beschrieb 1971 **John Wheeler** mit dem prägnanten und durchaus zweideutigen Satz

Schwarze Löcher haben keine Haare!

Mit den Haaren ist natürlich all das gemeint, was aus dem Schwarzen Loch, dem Horizont, herausragen könnte. Mit seinem Satz erregte John Wheeler verständlicherweise einige Unruhe unter seinen Wissenschaftskollegen, doch bald legte sich die Aufregung über diese "Obszönität". Heute findet dieser Ausspruch in jeder Abhandlung über Schwarze Löcher seinen selbstverständlichen Platz.

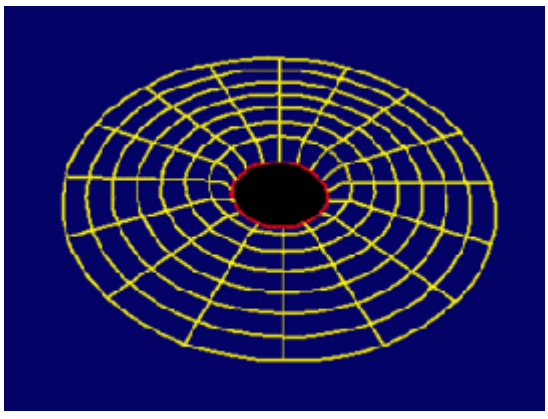
Gegenstände wie Sterne, Hühner oder Autos sind komplizierte Gebilde. Um jedes noch so kleine Detail, bis in den atomaren Aufbau, beschreiben zu können, würde man viele Milliarden von Parametern benötigen. Ein Schwarzes Loch dagegen reduziert alles auf die drei genannten Größen. Es "vergisst" praktisch alles, woraus es entstanden ist und wie der ursprüngliche Aufbau beschaffen war. Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung sind alles, was von Sternen, Hühnern oder Autos übrig bleibt, fallen sie in ein Schwarzes Loch. Schwarze Löcher sind die effektivsten Informationsvernichter im Universum (was der aktuellen Meinung von Stephen Hawking allerdings widerspricht, hierzu später aber mehr)!

Doch zurück zu Schwarzen Löchern, die rotieren.

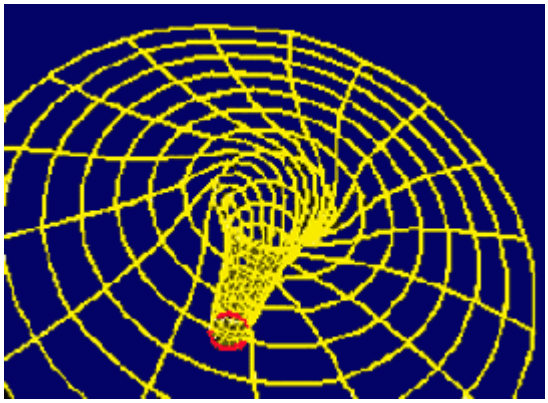


Die Einsteingleichungen für rotierende, nicht geladene Schwarze Löcher sind vom neuseeländischen Mathematiker **Roy Kerr** erst 1963 gelöst worden, und man nennt solche Objekte nach ihm **Kerrsche Löcher**. Zunächst beschrieb seine Lösung die Krümmungen der Raumzeit um einen rotierenden Stern. Doch schon bald konnten **Brandon Carter**, **Roger Penrose** sowie **R.Boyer** und **R. Lindquist** nachweisen, dass Kerrs Lösung alle rotierenden Schwarzen Löcher umfasste. Und was ist an diesen Objekten nun anders als bei den Schwarzschild- Löchern?

Kerrsche Löcher rotieren nicht nur selbst, sondern zwingen allem in ihrer Umgebung diese Rotation auf! Alles, was sich in der Nähe des Horizonts aufhält. Licht oder andere Strahlung, Materie jeder Form und sogar die Raumzeit werden gezwungen, der Rotation des Lochs mit derselben Geschwindigkeit zu folgen. Man kann sich diesen Effekt (genannt **frame- dragging**) wie einen Strudel vorstellen. Das Mitreißen der Raumzeitgeometrie gilt im Prinzip für jeden rotierenden Körper (und wird dann nach ihren Entdeckern **Lense-Thirring-Effekt** genannt), ist aber verschwindend gering, solange der Körper nicht zum Schwarzen Loch kollabiert ist.



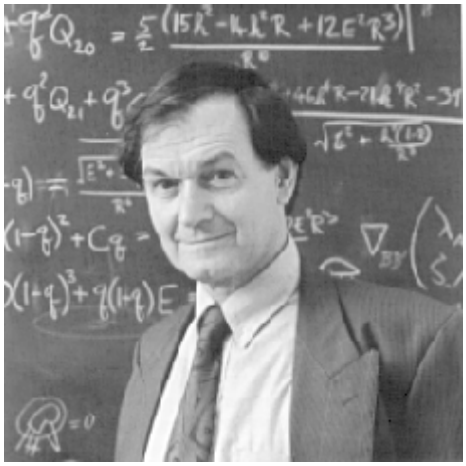
Wenn Sie einmal den Stöpsel aus der Badewanne ziehen, sehen Sie, dass entfernt vom Abfluss die Wasseroberfläche (die "Raumzeit") noch relativ ruhig ist. Je näher man an den Abfluss herangeht, umso schneller und so wirbelnder werden die Bewegungen. Ähnlich auch beim Schwarzen Loch, direkt an der Oberfläche des Horizonts muss alles mit der Geschwindigkeit des Lochs rotieren. Hier zunächst in einem so genannten Einbettungs-Diagramm die umgebende Raumzeit eines nicht rotierenden Schwarzen Lochs, die Rotation entspricht ***a = 0***. ***a*** ist der so genannte *Kerr-Parameter*, mit dem die Rotation Schwarzer Löcher bezeichnet wird. Er kann Werte zwischen 0 und +1 oder -1 annehmen. Der rote Kreis zeigt jeweils den Ereignishorizont.



Bei einem mit maximaler Geschwindigkeit (***a = 1***) rotierenden Loch wird die umgebende Raumzeit in einer strudelartigen Form mitgerissen. Ein anderer anschaulicher Vergleich ist etwa ein Tornado, der einen ähnlichen Wirbel erzeugt. Wieso gibt es eigentlich eine *maximale* Rotationsgeschwindigkeit? Theoretisch könnte man doch einfach mit Drehimpuls behaftete Materie in das Loch werfen, um seine Rotation immer schneller werden zu lassen (der Drehimpuls muss ja erhalten bleiben). Da aber macht uns die Natur einen Strich durch die Rechnung.

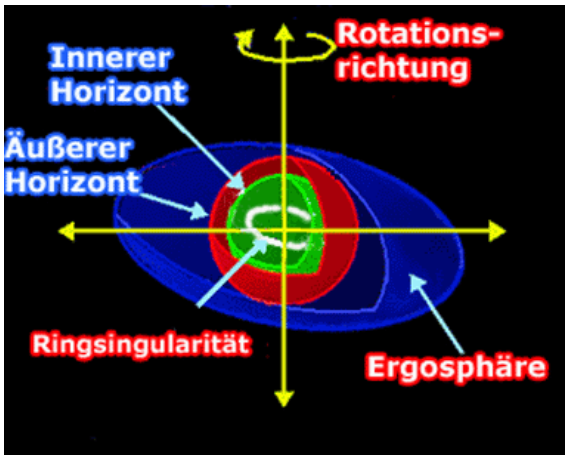
Wenn Sie ihren Kaffee einmal extrem schnell umrühren, so wird ab einer bestimmten Drehzahl durch die Zentrifugalkraft das herrliche Getränk aus der Tasse spritzen, der Zusammenhalt der Flüssigkeit zerreißt. Auch Sterne können nicht mit jeder beliebigen Geschwindigkeit rotieren, denn sonst würden sie durch die Zentrifugalkräfte zerrissen. Das gilt auch für Weiße Zwerge, genauso wie für Neutronensterne, die nicht mehr als etwa 1000 Umdrehungen pro Sekunde durchführen können. Gilt das auch für ein Schwarzes Loch?

Durch die Zentrifugalkraft wird der Horizont (exakt ausgedrückt: die **Ergosphäre**, siehe weiter unten, der eigentliche Ereignishorizont wird nicht verformt) eines Schwarzen Lochs zusammengepresst, abgeplattet wie die Erde durch ihre Rotation. Irgendwann sollte er doch zerreißen, wenn wir immer mehr Materie mit Drehimpuls hineinwerfen? Leider nein. Es gibt für ein rotierendes Schwarzes Loch eine maximale Geschwindigkeit: Wenn es mit *halber Lichtgeschwindigkeit* rotiert (***a = 1*, = "Maximal- Kerr"**), lassen es die Zentrifugalkräfte nicht mehr zu, dass Materie ins Loch fällt. Sie wird vom Horizont fortgeschleudert. Würde allerdings Maximal-Kerr tatsächlich exakt erreicht werden, könnten die Zentrifugalkräfte die Gravitation aufheben. Wir hätten dann ein Schwarzes Loch ohne Horizont geschaffen, denn der würde jetzt zerplatzen und wir könnten direkt auf die Singularität sehen!



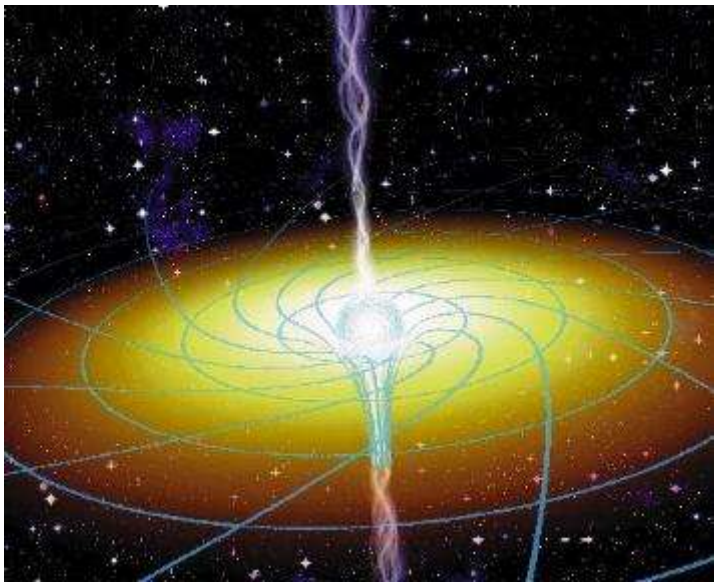
Man kann aber noch so trickreich vorgehen, wir können weder den Horizont zerstören, noch die Rotation beliebig steigern. **Roger Penrose** hat 1969 eine Hypothese aufgestellt, die so genannte **Kosmische Zensur**(*cosmic censorship*). Demnach ist es einem außenstehenden Beobachter zu keiner Zeit und an keinem Ort des Universums möglich, eine **nackte Singularität** zu erblicken, also eine Singularität ohne Ereignishorizont. Die Natur scheint uns das generell verwehren zu wollen. Jede echte ("**intrinsische**", *~aus sich selbst heraus*) Singularität muss sich nach der Kosmischen Zensur hinter einem Ereignishorizont verbergen, vom Rest des Universums isolieren. Ein Beobachter kann eine Singularität nur erblicken, wenn er sich in das Schwarze Loch begibt. In der "Praxis" ist es also nicht möglich, dass ein Loch mit maximaler Geschwindigkeit rotiert, jedoch können viele Schwarze Löcher dem maximalen Drehimpuls sehr nahe kommen.

Beschäftigen wir uns nun ein wenig mit dem Horizont Kerrscher Löcher, besser gesagt *den Horizonten*:



Wie die Skizze schon andeutet, ist der Aufbau stark verändert gegenüber einem nicht rotierenden Loch. Außen umschließt eine so genannte **Ergosphäre** das Gebilde. Sie hat die abgeplattete Form eines Ellipsoids und stellt ein Gebiet um das Loch dar, in dem keine statisch ruhige Lage mehr möglich ist. Allem, was sich hier aufhält, Materie oder Strahlung, wird die Rotation des Schwarzen Lochs aufgezwungen (*frame dragging*). Die äußere Begrenzung der Ergosphäre wird deshalb auch **statische Grenze** genannt. Selbst wenn ein Körper Lichtgeschwindigkeit erreicht, kann er innerhalb der Ergosphäre keine statische Lage mehr einnehmen. Nicht eingezeichnet ist der Übersichtlichkeit halber hier die schon bekannte Photonensphäre, ein Bereich, in dem ein unter günstigem Winkel hinein gelenktes Photon gerade noch auf einer stabilen Bahn umlaufen kann, ohne in das Loch zu fallen.

Weder die Ergosphäre, Photonensphäre noch die statische Grenze stellen einen Ereignishorizont dar. Erst bei weiterem Eintauchen in das Kerr- Loch stoßen wir auf - zwei - Horizonte! Der äußere Horizont befindet sich vollständig innerhalb der statischen Grenze, an den Polen können Ergosphäre und äußerer Horizont sich überschneiden (bei a = 1). Dieser Horizont ist die eigentliche Grenze des Lochs, aus der keine Informationen mehr entweichen können. Darunter befindet sich ein zweiter Horizont, über dessen Bedeutung man sich noch nicht im Klaren ist. Noch weiter innen stoßen wir nun auf eine ringförmig aufgeblasene, jedoch unendlich dünne Singularität in der äquatorialen Ebene. Bei Maximal-Kerr liegt sie, wie dann auch der innere auf dem äußeren Horizont. Wird a = 0, haben wir es wieder mit einem Schwarzschild- Loch zu tun - die Singularität schrumpft zu einer Punktsingularität zusammen.



Hier eine weitere Darstellung, wie ein Kerr- Loch die Raumzeit und alles andere mit sich reißt (*frame- dragging*) und seine Rotation aufzwingt. Vielfach wird gesagt, dass durch die Ringsingularität völlig neue Möglichkeiten eröffnet werden: Man könnte sich oberhalb der Ringebene aufhalten oder sogar durch den Ring hindurch fliegen, zumindest bei supermassiven Löchern, da hier die Gezeitenkräfte noch erträglich wären. Der Ring stelle nicht das Ende der Raumzeit dar, wie es bei einer intrinsischen Punktsingularität der Fall ist. Prinzipiell könnten wir unseren Astronauten also wieder auf die Reise schicken, und nach manchen Vermutungen sollte er durch die Ringsingularität sogar andere Universen erreichen.

Mit freundlicher Genehmigung von J. Bergeron/Sky & Telescope

Allerdings liegen solche Spekulationen jenseits jeder Realität, niemand kann den Sturz in ein Schwarzes Loch überleben! Zunächst einmal dürfte es keine Konstruktion und keinen Organismus geben, die den Belastungen der Rotation mit evtl. relativistischen Geschwindigkeiten schon in Horizontnähe widerstehen könnten. Direkt am Horizont hätte jeder Gegenstand Lichtgeschwindigkeit, um dann überlichtschnell weiter zu stürzen! Materie in der uns bekannten Form kann hier wohl nicht mehr existieren, weil die Geodäten der Teilchen raumartig werden. Das bedeutet, dass die Teilchen tachyonische Eigenschaften annehmen, sich außerhalb aller von uns fassbaren Grenzen bewegen. Deshalb bleibt fortan unser Astronaut von allen Blessuren verschont.

Damit kennen wir jetzt alle Arten von Schwarzen Löchern, die denkbar sind:

- Das **Schwarzschild- Loch**. Es ist statisch, rotiert also nicht und ist kugelsymmetrisch. Für seine Beschreibung genügt die Masse
- Das Schwarze Loch nach **Reissner-Nordström**: Es rotiert auch nicht, ist ebenfalls kugelsymmetrisch, aber elektrisch geladen
- Das **Kerrsche Loch**. Zu seiner Beschreibung braucht man Masse und Drehimpuls
- Die wahrscheinlichste Lösung eines Gravitationskollapses: Ein im Gleichgewicht befindliches, rotierendes Loch mit einer geladenen Masse. Es wird **Kerr-Newman-Loch** genannt.

Für die Masse eines Schwarzen Lochs ist keine Begrenzung bekannt, sie kann beliebige (!) Größen annehmen. Das gilt jedoch nicht für die Ladung und den Drehimpuls, ihnen ist ein oberes Limit gesetzt. Würde es überschritten, z.B. beim Kollaps eines Sterns, so könnte kein Schwarzes Loch entstehen, sondern eine nackte Singularität. Das aber verbietet die Kosmische Zensur!

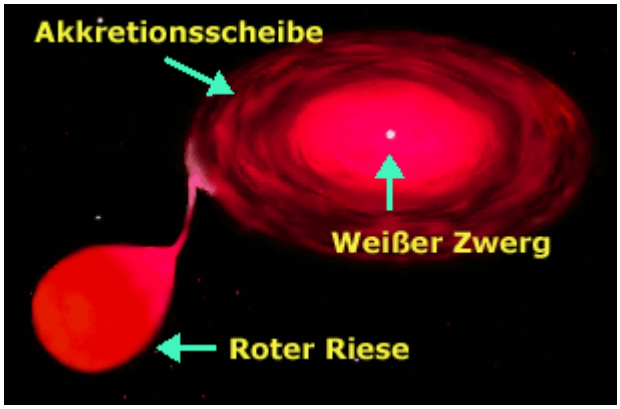
Jetzt wollen wir uns ansehen was passiert, wenn Materie zu engen Kontakt mit Schwarzen Löchern hat.

Weitere Informationen: http://www.mpe.mpg.de/~amueller/astro_sl.html#kerr

Raubtierfütterung

Im letzten Kapitel wurde schon kurz erwähnt, dass Schwarze Löcher in der Realität in den allermeisten Fällen von Materie umgeben sein werden. Wie dicht diese Materie ist hängt davon ab, in welcher Region sich das Loch befindet. Hält es sich im intergalaktischen Raum auf, wird es nur von ein paar Atomen je Kubikmeter umgeben sein. An solchen Orten dürfte man allerdings selten auf Schwarze Löcher stoßen. Sie entstehen ja durch den Kollaps sehr massereicher Sterne, die sich aber durch ihre extrem schnelle Entwicklung nicht weit von ihrer Geburtsstätte entfernen können. Wenn wir also auf die Suche gehen wollen, sollten wir zunächst die Sternentstehungsgebiete in den Spiralarmen der Galaxien durchforsten. Hier können die Schwarzen Löcher von dichten Materiewolken umgeben sein, und das macht sie für uns sichtbar!

Wenn ein Körper von Materie umgeben ist, so übt er eine Anziehungskraft auf diese aus. Anziehungskräfte können enorme Größen annehmen, wenn wir z.B. an eine bestimmte Art von Röntgendoppelsternen denken (siehe hierzu auch "kataklysmische Veränderliche").



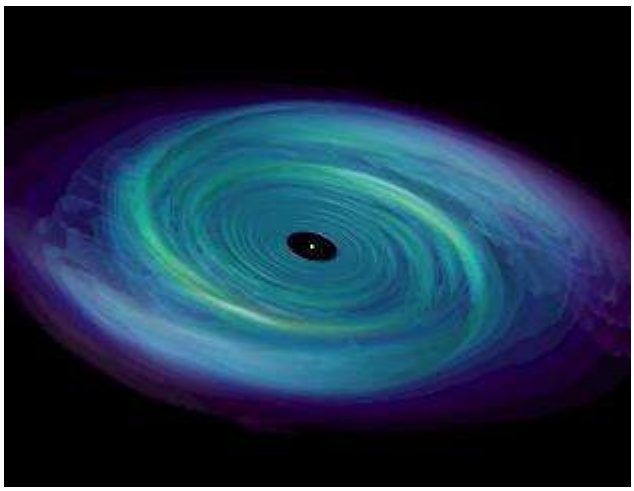
In solchen Systemen ist ein Weißer Zwerg von Erdgröße in der Lage, einen gigantischen Roten Riesen regelrecht aufzusaugen. Diesen Vorgang nennt man **Akkretion** (lat. *accretio*, "Zuwachs"). Wie in dieser Darstellung gezeigt, fließt Materie vom Roten Riesen über zu einem gravitationsstarken Weißen Zwerg. Die vom Roten Riesen stammende Materie fällt nicht einfach auf den Zwergstern herunter, sondern bewegt sich auf spiralförmigen Bahnen zum Zwerg und geht dort vorübergehend in Keplersche Umlaufbahnen über. Durch Scherung und Turbulenzen wird Drehimpuls in der gebildeten Materiescheibe nach außen transportiert, so dass Teilchen bzw. Partikel immer weiter nach innen wandern und schließlich zum Zwerg gelangen. Akkretion spielt nicht nur bei Röntgendoppelsternen eine wichtige Rolle, sondern auch bei gerade erst entstandenen Sternen und in den Zentren aktiver Galaxien (*AGN, Active Galactic Nuclei*).

Akkretion ist also kein seltener Vorgang im Kosmos. Dieses gravitationsbedingte Aufsammeln von Materie kann gehemmt werden durch den Gasdruck und durch Drehimpuls. Der Gasdruck kann aber durch Kühlung (einfache Wärmeabstrahlung) gemindert werden, Drehimpuls lässt sich umverlagern. Das geschieht in einer sich um das Schwarze Loch (oder den Stern) bildenden **Akkretionsscheibe**. Akkretionsscheiben entstehen, wenn die Scheibenmasse gering im Vergleich zu der des Zentralkörpers ist und die Geschwindigkeit der thermischen Teilchenbewegung geringer ist als die Umlaufgeschwindigkeit.

In der elliptischen Galaxie NGC 7052 hat das Hubble- Weltraumteleskop ein Schwarzes Loch entdeckt (links die Aufnahme eines erdgebundenen Teleskops). Was auf dem rechten Bild fast wie eine Radkappe aussieht, ist eine gigantische Akkretionsscheibe von 3700 Lichtjahren Ausdehnung im Zentrum der Galaxie. Diese riesige Staubmenge stammt vermutlich aus der Kollision mit einer anderen Galaxie, das Schwarze Loch benötigte mehrere Millionen Jahre um diese Scheibe auszubilden. Das Loch hat inzwischen eine Größe von 300 Millionen (!) Sonnenmassen erreicht.

Mit freundlicher Genehmigung von Roeland P. van der Marel (STScI), Frank C. van den Bosch (University of Washington), and NASA

Akkretionsscheiben sind normalerweise axialsymmetrisch und sehr dünn.



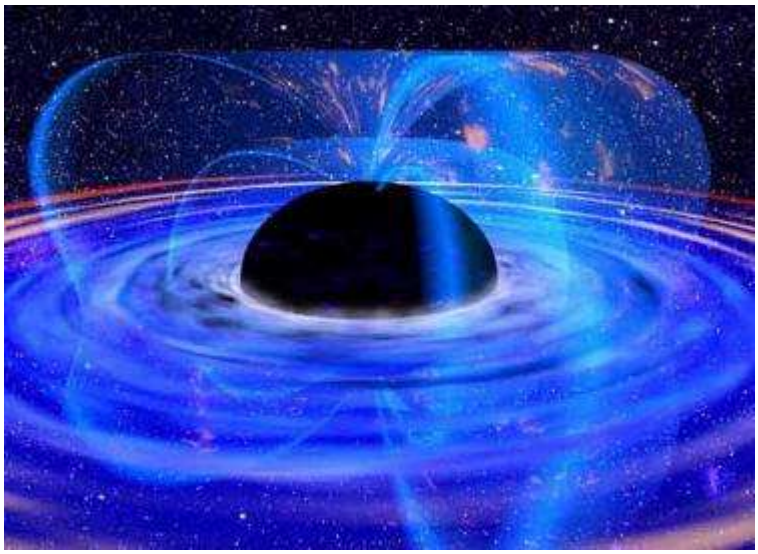
Sie bilden sich aus, wenn relativ kühles und drehimpulsarmes Material aufgesammelt wird. Die Kühlung erfolgt recht leicht durch einfache Abstrahlung der Wärmeenergie. Der Drehimpuls kann dann in der Scheibe abgebaut werden. Zum Verständnis dieses Vorgangs müssen wir uns vor Augen halten, dass in der Akkretionsscheibe differentielle Rotation vorherrscht. Das bedeutet, dass die Umlauf (Winkel) -geschwindigkeit im Scheibenzentrum am größten ist und nach außen hin abnimmt. Hinzu kommt die zum Zentrum hin zunehmende Materiedichte.

Mit freundlicher Genehmigung von Michael Owen, John Blondin (North Carolina State Univ.)

So bleibt es nicht aus, dass zwischen den Teilchen der Materie eine Reibung entsteht, wodurch sich das Material aufheizt. Radial benachbarte Regionen der Scheibe sind durch thermische (und/oder magnetische) Turbulenzen aneinander gekoppelt, innen rotierende Materie versucht benachbarte Regionen mitzureißen. Die Trägheit der weiter außen rotierenden Partikel erzeugt aber einen Bremseffekt. Allerdings sind die Scherkräfte in einer Keplerscheibe rotierenden Gases längst nicht hoch genug, um *hydrodynamische* Turbulenzen zu erzeugen (hydrodynamisch deshalb, weil sich die Materie in der Scheibe ähnlich einer Flüssigkeit verhält). Die genauen Vorgänge in Akkretionsscheiben sind daher noch nicht eindeutig geklärt. Hier könnten aber magnetische Effekte eine wesentliche Rolle spielen. Die Temperaturen in Akkretionsscheiben Schwarzer Löcher können sehr hohe Werte erreichen, bis zu vielen Millionen [K], vor allem in Nähe des Horizontes. Unter diesen Verhältnissen wird jede Form von Materie ionisiert, d.h. die Elektronen lösen sich von den Atomen und wir haben es mit einem Plasma zu tun. Aufgrund dieser enormen Temperatur emittieren Akkretionsscheiben überwiegend Röntgenstrahlung. Allerdings "kühlen" sich die Röntgenphotonen zum Teil auch ab, indem sie absorbiert und wieder emittiert werden. Je nachdem, wie oft dieser Vorgang wiederholt wird, ist die Scheibe am Ende auch im sichtbaren Licht zu beobachten. Umgekehrt können "kalte" Photonen auch wieder an Energie gewinnen, wenn sie an den hochenergetischen Teilchen der Scheibe gestreut werden (*inverse Comptonstreuung*), wodurch erneut Röntgen- oder Gammastrahlung entsteht.

Akkretion kann jedoch selbst dann stattfinden, wenn keine Kühlung durch Wärmeabstrahlung möglich ist. Diesen heißen Materiefluss nennt man ADAF (*advection-dominated accretion flow*). Die Hitze sorgt dafür, dass sich der Materiefluss regelrecht aufbläht und es nicht mehr zur Ausbildung der beschriebenen Akkretionsscheibe kommt. Vielmehr wird jetzt unser Raubtier aus annähernd kugelförmigen Schalen mit Materie gefüttert.
Doch zurück zu den Akkretionsscheiben:

Durch die Ionisation ist die Materie nun elektrisch geladen und die Reibung kann magnetische Polarisationen ausbilden, falls sie nicht schon von vornherein (z.B. durch den akkretierten Stern) vorhanden waren.



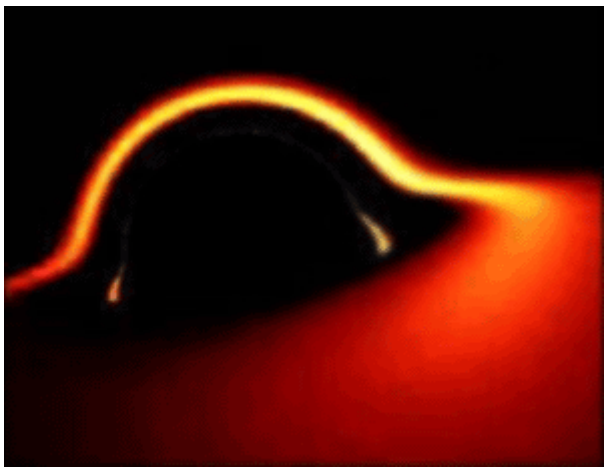
Letzten Endes ist die abgestrahlte Wärmeenergie nichts anderes als umgewandelte und freigesetzte Gravitationsenergie. Durch die Reibung geben die innen umlaufenden Partikel Drehimpuls ab an die weiter außen laufenden. Das bedeutet, dass die innere Materie Drehimpuls verliert und damit zum Zentralkörper stürzen kann. Üblicherweise erfolgt die Abbremsung der inneren Scheibenmaterie recht langsam, weshalb ein Schwarzes Loch durchaus "sparsam" mit seinem "Futter" umgehen kann. Insgesamt aber ist die Umwandlung der Gravitationsenergie sehr effektiv: bis zu 20% der Ruhenergie der Materie wird in Strahlung umgewandelt.

Mit freundlicher Genehmigung von XMM-Newton, ESA, NASA

Bis jetzt haben wir uns Bilder von rotierenden Schwarzen Löchern und ihren Akkretionsscheiben angesehen, wie sie ein Beobachter in der Realität eigentlich nicht wahrnehmen würde. Wir vergaßen nämlich die relativistischen Effekte, die durch die Raumzeitkrümmung hervorgerufen werden!

Was wir hier sehen ist ein verzerrtes Abbild einer äquatorialen Akkretionsscheibe, wenn wir sie unter einem Winkel von 80° zur Symmetrieachse betrachten, wir also fast auf die Kante der Scheibe schauen. Neben der Kepler- Rotation ist in dieser Studie eine radiale Drift berücksichtigt, d.h. ab einem bestimmten Radius bewegt sich Materie im freien Fall auf den Kerr- Geodäten zum Loch. Die Scheibe endet am Rand der inneren Fläche, wobei dieser Rand den Ereignishorizont darstellt (in Wirklichkeit ist die Fläche völlig schwarz, denn durch die Gravitations- Rotverschiebung wird hier jede Strahlung unterdrückt). Die innere Fläche ist dabei das mit ***a = 0,8*** rotierende Kerrsche Loch, welches natürlich nicht zu sehen ist. Was im Bild hell erscheint, ist das auf uns zukommende Licht des rotierenden Plasmas, es wird in unsere Richtung gebündelt. Es handelt sich hierbei um einen relativistischen Effekt ("**Beaming**"), der von sehr schnell bewegten (*"relativistischen"*) Teilchen ausgeht: In Bewegungsrichtung wird die Strahlung immer mehr gebündelt, je schneller sich das Teilchen bewegt (*Forward beaming*). Hierdurch erscheint die Strahlungsquelle heller. Auf der anderen Seite wird dagegen die sich von uns wegbewegende Strahlung unterdrückt (*Back beaming)*. Je näher wir zum Ereignishorizont hinüber sehen, umso schwächer wird das Licht, bis es direkt am Rand unendlich rotverschoben ist. Durch die starke Krümmung der Raumzeit sehen wir als Bogen oberhalb des Lochs die Unterseite der vorderen Scheibe. Das eigentlich von uns weggerichtete Licht wird um das Loch herumgelenkt, es wirkt als Gravitationslinse.

Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Andreas Müller, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching.

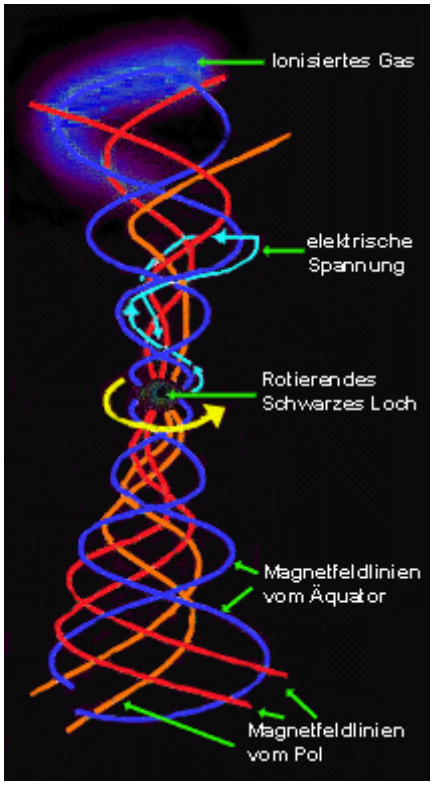


Bei schnellerer Rotation und veränderten Blickwinkeln wird das ungewöhnliche Bild der Akkretionsscheiben noch asymmetrischer und verzerrter, wie diese Simulation zeigt. Nahe dem Horizont erkennt man sogar Sekundärbilder des Scheibeninnenrandes. In diesem Fall handelt es sich um eine **Scheibentrunkation**, d.h. die Scheibe umgibt das Schwarze Loch torusförmig, weshalb eine Lücke zwischen Scheibe und Loch besteht.

Quelle: J.- P. Luminet

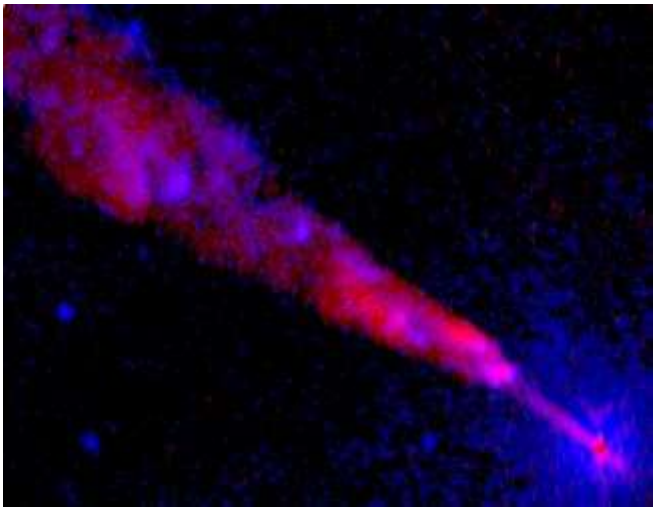
Die Ausbildung magnetischer Strukturen in den Akkretionsscheiben führt uns zu einem weiteren erstaunlichen Effekt, nämlich der Entstehung so genannter **Jets**. Nicht alle zum Schwarzen Loch hinabstürzende Materie wird durch den Horizont zur Singularität gezwungen, ein Teil kann auch durch das Magnetfeld abgelenkt werden.

Entlang der magnetischen Feldlinien wird die Materie extrem beschleunigt und gelangt zu den Polen des Schwarzen Lochs, von wo sie mit teilweise fast Lichtgeschwindigkeit in den Raum gestoßen wird.



Kerrsche Löcher versetzen alles um sich herum in Rotation. Selbst die umgebende Raumzeit wird unweigerlich von dieser Bewegung zur Rotation gezwungen. Diese Rotation des Lochs kann aber gebremst werden, wenn es von ionisiertem Gas umgeben ist, welches ein Magnetfeld aufweist. Das Loch verhält sich wie ein rotierender elektrischer Leiter, und es bildet sich eine Spannungsdifferenz aus zwischen den Polen und dem Äquator, ganz ähnlich einer Autobatterie. Nur dass hier die Spannungsdifferenz nicht 12 Volt, sondern 10^{15} [V] beträgt! Irgendwo weit außerhalb des Lochs schließt sich der Stromkreis. Hier werden geladene Teilchen beschleunigt und bringen letztendlich die Jets hervor, die wir bei vielen Quasaren und ähnlichen Objekten ("AGN") beobachten. Es ist sogar möglich, dass durch die enorme Spannung Teilchen quasi aus dem "Nichts", aus dem (Quanten-) Vakuum erzeugt werden, vor allem Elektronen und Positronen, die beobachtete Synchrotronstrahlung lässt darauf schließen. Die entnommene Energie übt einen Zug auf das rotierende Loch aus, wodurch im Endeffekt die Drehbewegung gebremst wird. Die Rotation kann allerdings auch weiter beschleunigt werden, wenn nämlich das Loch Materie akkretiert und deren Drehimpuls übernimmt.

Jets sind also Ströme extrem beschleunigter Materie, besser gesagt aus Plasma, da wir es mit extrem heißem, hochionisiertem Gas zu tun haben. Sie treten nicht nur bei Schwarzen Löchern auf, sondern auch beispielsweise bei recht jungen Sternen. Die imposantesten Erscheinungen werden jedoch durch Schwarze Löcher initiiert, sie können Jets erzeugen, die sich Millionen von Lichtjahren in den Raum erstrecken.

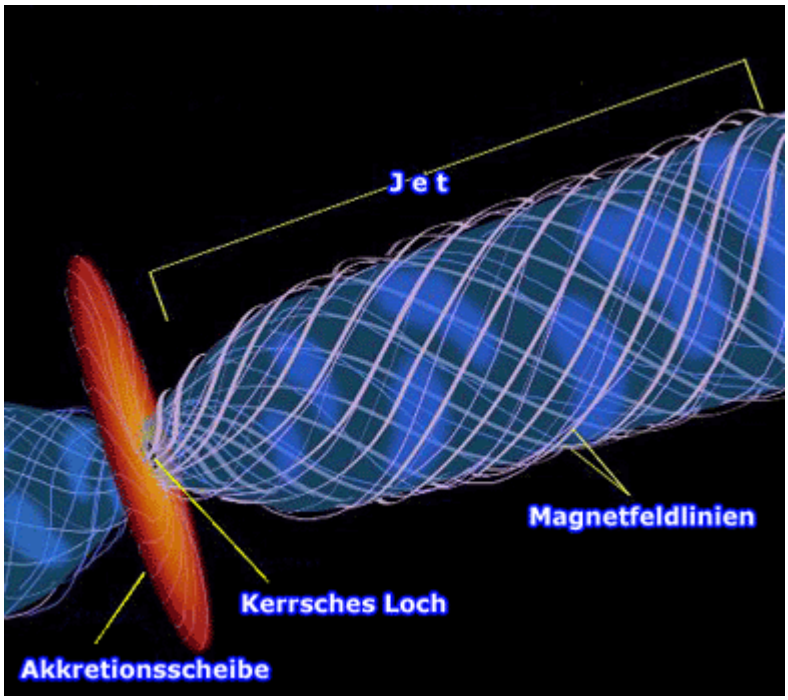


Einer der bemerkenswertesten Jets stammt aus der Galaxie **Centaurus A**, fotografiert vom Röntgenobservatorium Chandra . In einer Falschfarben- Komposition sehen wir den Jet im Radiobereich (rot) kombiniert mit dem blauen Röntgenanteil. Produziert wird der Jet von hochenergetischen Teilchen, die vom Zentrum der Galaxie (rechts unten), einem superschweren Schwarzen Loch, ausgestoßen werden. Der Jet schleppt ein Magnetfeld mit, um dessen Feldlinien spiralende relativistische Elektronen Synchrotronstrahlung emittieren. Die Synchrotronstrahlung selbst streut nun wieder am heißen Jetplasma, so dass aus der Radioemission nichtthermische Röntgenphotonen werden.

Mit freundlicher Genehmigung von Chandra Observatory, NASA/ Radio: NRAO, VLA

Wenn sich ein Plasmastrom geradlinig Millionen Lichtjahre in den Raum erstreckt, muss zwangsläufig die ihn speisende Quelle über lange Zeit sehr konstant den Materiestrahl erzeugen. Wenn auch das Plasma sich mit fast Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, so benötigt es doch Millionen von Jahren, um die beobachtete Ausdehnung des Jets zu erreichen. Ein schnell rotierender Kreisel ist ein stabiles System, man kann ihn kaum aus seiner Rotationslage ablenken. Wenn doch, stabilisiert er sich nach kurzer Zeit wieder. Schwarze Löcher sind nichts anderes als gigantische kosmische Kreisel! Ihre unvorstellbar große Rotationsenergie ist die Quelle der Jets.

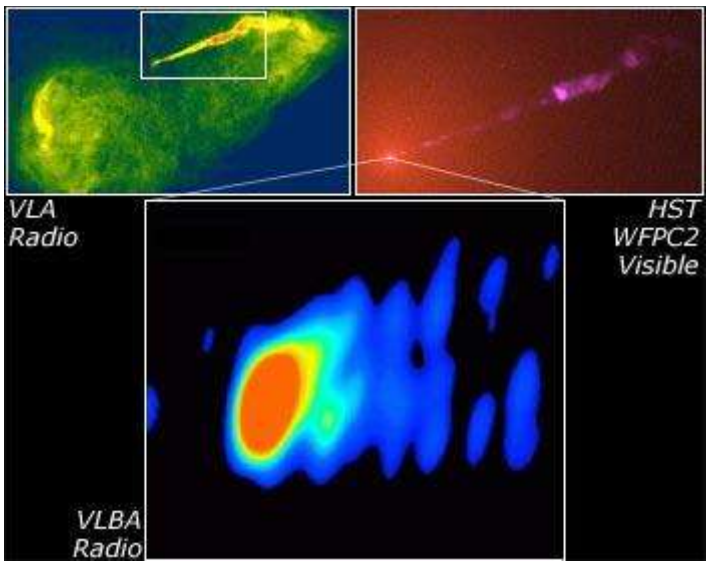
Die wahrscheinlichste Erklärung zur Entstehung der Jets liefert der so genannte **Blandford- Znajek- Prozess** (nach Roger Blandford und Roman Znajek, 1977).



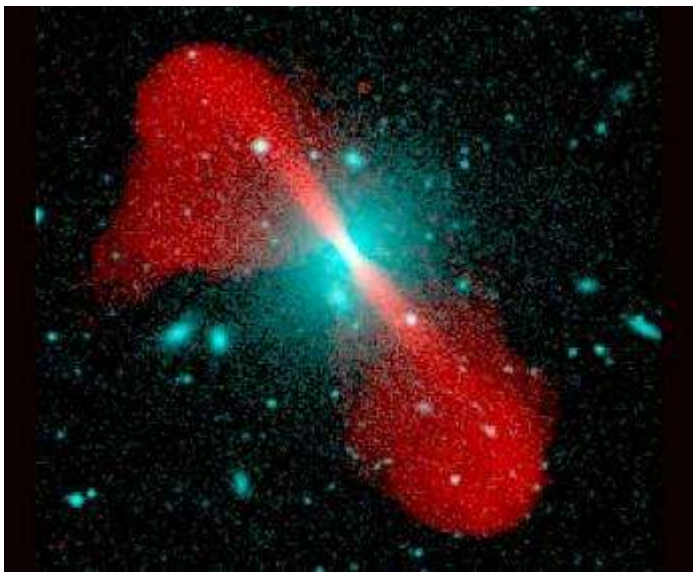
Die Rotation eines Schwarzen Lochs versetzt die umgebende Raumzeit in einen wirbelnden Strudel. Davon wird auch das umgebende Magnetfeld betroffen, welches entweder vom akkretierten Gas mitgeführt wurde (fast jedes Gas im Kosmos ist magnetisch), oder durch das Plasma der Akkretionsscheibe selbst entsteht. Die Magnetfeldlinien werden nun korkenzieherartig durch die Rotation außen entlang der Rotationsachse miteinander verdrillt. Seitlich aus der Scheibe einfallende Plasmateilchen werden von den Magnetfeldlinien erfasst und an ihnen entlang zu den Rotationspolen beschleunigt. Das Plasma ist jetzt relativistisch beschleunigt, es wird also mit fast Lichtgeschwindigkeit ausgestoßen. Die Wechselwirkungen des Plasmas mit Magnetfeldern wird durch die so genannte Magnetohydrodynamik beschrieben.

Mit freundlicher Genehmigung von NASA und Ann Field (Space Telescope Science Institute)

M 87, eine 50 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxie im Sternbild Jungfrau. Sie ist schon lange als Radiogalaxie (Bild links oben) bekannt, von der ein gewaltiger Jet ausgeht. Auch im optischen Bereich ist er zu sehen (Hubble- Aufnahme, rechts oben). Durch riesige Arrays von Radioteleskopen (*VLBA, Very Long Baseline Array*) konnte das Zentrum des Jets ermittelt werden. Es ist der rote Fleck (Durchmesser: 1/10 Lichtjahr) im unteren Bild, hier verbirgt sich ein Schwarzes Loch von 3 Milliarden Sonnenmassen.



Mit freundlicher Genehmigung von NASA, National Radio Astronomy Observatory/National Science Foundation, and John Biretta (STScI/JHU)



Nahezu eine Million Lichtjahre lang sind die Jets der Radio- Galaxie 3C296, die der elliptischen Galaxie NGC 5532 entstammt. In dieser Aufnahme, in der ein optisches (blau) dem Radiobild (rot) überlagert ist, sieht man deutlich die großen Radioblasen an den Enden der Jets. **Hot spots** (*"heiße Flecken"*) entstehen an einer Stoßfront, wenn die Jets auf das intergalaktische Medium auftreffen und das fast mit Lichtgeschwindigkeit strömende Plasma dort urplötzlich abgebremst wird. Die Jetmaterie zerspritzt hier geradezu, denn sie kann nicht weiterströmen und somit bilden sich die großen Radioblasen. Turbulenzen im Jet können kleinere "interne" Stoßfronten ausbilden, die wir als Knoten im Jet beobachten.

Mit freundlicher Genehmigung von AUI, NRAO

Mehr zur Akkretion: http://www.mpe.mpg.de/~amueller/lexdt_a.html#akk
Mehr zu Jets: http://www.mpe.mpg.de/~amueller/lexdt_j.html#jet

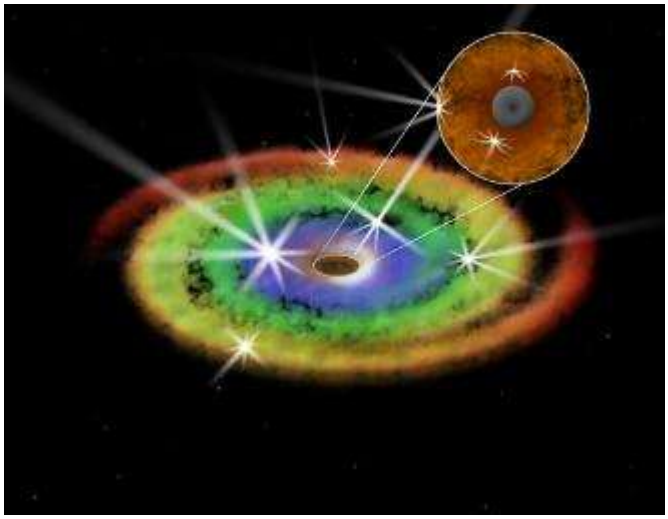
Die Masse macht's

Schwarze Löcher sind recht simple Gebilde. Wir sahen, dass sie mit nur 3 Parametern zu beschreiben sind: Masse, Drehimpuls und Ladung. Wir stellten allerdings auch fest, dass diese exotischen Objekte recht vital agieren können, wenn sie nur irgendwelcher Materie habhaft werden. Drehimpuls und Ladung Schwarzer Löcher sind uns inzwischen ein wenig geläufig, aber wie steht es mit ihrer Masse? Gibt es bestimmte "Mindestmassen" oder Obergrenzen? Es wurde bereits kurz angeschnitten, dass nach oben hin keine Grenze bekannt ist.
Um es uns leichter verständlich zu machen, teilen wir Schwarze Löcher in 4 Kategorien ein:

- Mini- oder Mikrolöcher
- Stellare Kollapsare von etwa 5 bis 100 Sonnenmassen
- "Mittelgewichte" von mehr als 100 bis 10 000 Sonnemassen
- Supermassive Löcher ab ~ 1 Million Sonnenmassen

Man beachte, dass bei dieser Aufzählung die Grenzen willkürlich gezogen wurden, die Übergänge sind fließend. Lediglich stellare Löcher haben eine Obergrenze von etwa 100 Sonnenmassen, weil ein Stern nicht schwerer werden kann (siehe hierzu Riesensterne). Die erste genannte Gruppe wird uns im nächsten Kapitel beschäftigen, beginnen wir deshalb mit den Löchern stellarer Massen.

Wenn ein Stern seinen nuklearen Brennstoff verbraucht hat und die Masse des Kerns im Innern mehr als etwa 3 Sonnenmassen übersteigt, gibt es keine bekannte Kraft mehr im Universum, die den Kollaps zum Schwarzen Loch verhindern könnte. Ist das geschehen, hat sich der Stern vom übrigen Weltall abgeschnitten. Es gibt keine "feste" Oberfläche mehr, sondern nur noch einen Raumbereich als Grenze, unterhalb der man nichts mehr sehen kann, aus der keine Informationen mehr nach außen dringen können - den Ereignishorizont.



Alles, was in den Horizont eindringt, bleibt für immer darin verborgen. Weder Licht noch Röntgenstrahlung, weder Funksignale oder noch so kleine oder superenergiereiche Teilchen können entweichen. Der Radius eines Ereignishorizontes ist recht klein: Für ein Schwarzes Loch von 10 Sonnenmassen beträgt er nur 30 [km].

Mit freundlicher Genehmigung von CXC/M.Weiss

Wie schon angedeutet, liegt die "Mindestmasse" eines stellaren Schwarzen Lochs bei etwa 3 Sonnenmassen. Zwischen 1,4 und 3 Sonnenmassen wird der Kollaps des Sterns bei einem Neutronenstern enden, weil hier das entartete Neutronengas der Gravitation einen noch ausreichenden Druck gegenüber stellen kann.

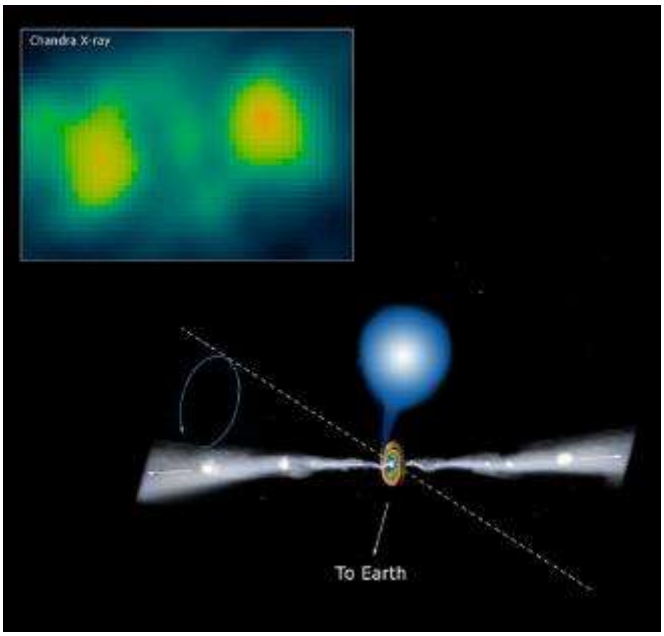
Ähnliches trifft auch für Sterne noch kleinerer Massen zu: Bis herab zu etwa 0,4 Sonnenmassen bilden sich Weiße Zwerge, in denen ein entartetes Elektronengas den notwendigen Gegendruck liefert. Aus Sternen unterhalb der Mindestmasse können heute also keine Schwarzen Löcher gebildet werden.

Massereiche Sterne entstehen in Gebieten hoher Gas- und Staubkonzentration. Die kollabierende Wolke ist von so viel Materie umgeben, dass der sich bildende Protostern immer weiter wachsen kann. Die Natur hat diesem Treiben aber eine Grenze gesetzt. Auch wenn noch so viel an Materienachschub vorhanden ist, befreit sich der Stern von selbst aus dem Dunkel. Durch den inzwischen enormen Druck und die hohen Temperaturen im Innern sind Kernfusionen angesprungen, die jetzt gewaltige Energiemengen freisetzen und nach außen abtransportieren. Es entsteht ein Sternwind aus geladenen Teilchen, die mit hohen Geschwindigkeiten ins All geschleudert werden. Je massereicher der Stern ist, umso schneller laufen die Kernprozesse ab und umso stärker ist der Sternwind. Bei etwa 120 Sonnenmassen kann man fast von einem "Sturm" sprechen, der Wind ist so kräftig, dass er jede umgebende Materie fort bläst und er damit nicht mehr weiter wachsen kann.

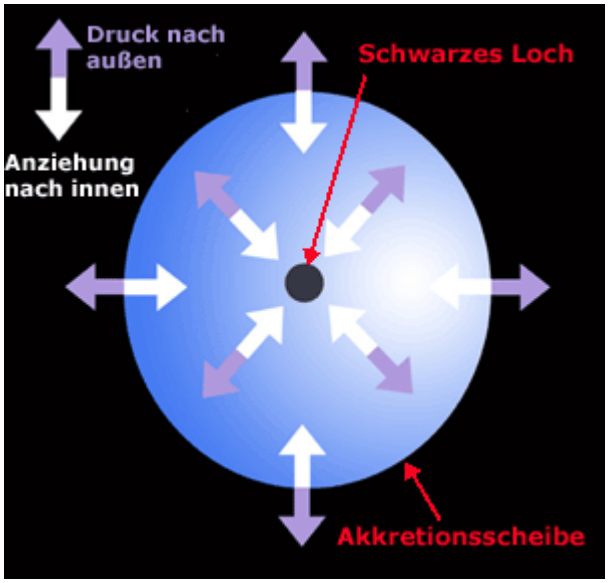
Nun hat ein solcher Sternkoloss an seinem Lebensende keine 100 oder 120 Sonnenmassen mehr! Durch seinen starken Sternwind sowie immer wiederkehrende Instabilitäten (siehe hierzu auch Eta Carinae) stößt er im Laufe der Zeit große Mengen an Materie ab. Übrig bleiben dann für das Schwarze Loch vielleicht noch 50, 80 Sonnenmassen (genaue Werte sind nicht bekannt). Weil massereiche Sterne nicht sehr alt werden (sie verbrauchen ihren Brennstoff extrem schnell), können sie sich nicht weit von ihrem Entstehungsort entfernen. Sie entstehen auch selten allein, sondern meist gleich in Gruppen und sind damit häufig von viel Materie umgeben bzw. sogar in Doppel- oder Mehrfachsysteme eingebunden. Durch diesen Umstand kann das entstandene Schwarze Loch nun munter weiter wachsen!

Diese Aufnahme des Chandra-Röntgenobservatoriums zeigt uns das Binärsystem SS 433 im Sternbild Adler in 16 000 Lichtjahren Entfernung. Zu sehen ist, wie die Illustration andeutet, ein Schwarzes Loch, umgeben von einer Akkretionsscheibe, welches Materie von einem Begleitstern absaugt. Die beiden großen "Ohrläppchen" rechts und links stellen dabei die beiden ultraschnellen, 50 Millionen [K] heißen Plasmajets dar. Das in der Bildmitte angedeutete Loch ist also längst noch nicht am Ende seines Wachstums angelangt.

Mit freundlicher Genehmigung von NASA/CXC/U.Amsterdam/S.Migliari et al.



Lange Zeit war völlig unklar, ob "Zwischengrößen" bei Schwarzen Löchern überhaupt existieren, neben den supermassiven (siehe weiter unten) waren nur diejenigen stellaren Ausmaßes bekannt. Erst seit dem Jahr 2000 weiß man von den "Mittelgewichten", die mehrere 100 bis zu etwa 10 000 Sonnenmassen erreichen. Wie kann man überhaupt ein derartiges Gebilde erkennen und nachweisen?



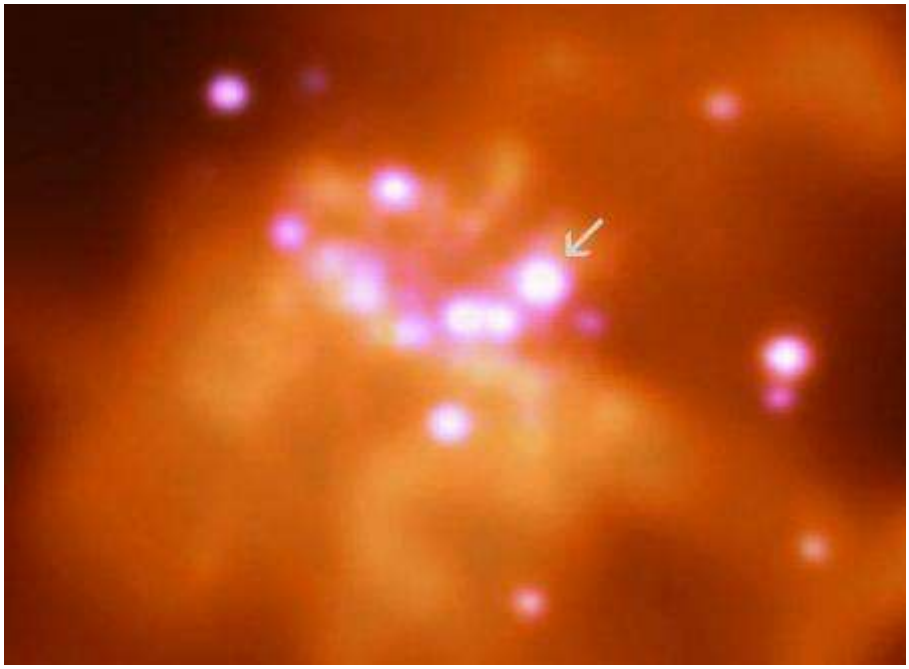
Je mehr Materie von einem Schwarzen Loch angezogen wird, umso mehr erhöht sich die Reibung in der Akkretionsscheibe und die Temperatur steigt. So hoch, dass sogar Röntgen- und Gammastrahlung emittiert wird. Die gesamte Strahlung erzeugt einen nach außen gerichteten Druck, der bei Erreichen eines bestimmten Grenzwertes so groß wird, dass keine weitere Materie ins Schwarze Loch fallen kann. Bei Überschreitung des Limits wird sogar Materie abgestoßen. Diese Grenze nennt man **Eddington- Limit**. Das Eddington- Limit ist damit eine physikalische Grenze für den "Appetit" eines Schwarzen Lochs. Für eine vorgegebene Masse gibt es somit eine maximale Leuchtkraft, und aus dieser Beziehung kann man die Masse des Schwarzen Lochs ableiten.

Wie können Astronomen überhaupt die Massen Schwarzer Löcher bestimmen? Bei stellaren Löchern gelingt dies z.B. durch Beobachtung von Bahnstörungen eines Sterns durch den unsichtbaren Begleiter (der Stern "wackelt" etwas hin und her, so weist man sogar extraterrestrische Planeten nach, aus dieser Ablenkung kann man auf die Masse schließen). Bei supermassiven Löchern geschieht dies äquivalent durch Observation umlaufender Materiewolken, deren Bahngeschwindigkeit messbar ist (durch spektrale Untersuchungen). Bei Löchern mittlerer Masse kann man die Helligkeit der Röntgenstrahlung in Beziehung zur ins Loch fallenden Materie setzen und daraus deren Größe ableiten. Die Größe weit entfernter, massereicher Schwarzer Löcher muss man anders bestimmen. Sie verraten sich als sehr aktive Objekte in den Galaxienzentren (AGN, siehe auch weiter unten). Ein AGN variiert häufig seine Leuchtkraft, vor allem im Röntgenbereich. Diese Helligkeitsschwankungen liegen im Bereich von Tagen. Man darf sich nun ziemlich sicher sein, dass die Strahlungsquelle nicht größer sein kann als die Strecke, die das Licht in dieser Zeit zurücklegt. Das bedeutet,

$$R < c \times t$$

Innerhalb dieses Radius muss sich also die bestimmte Masse befinden. Aus den so ermittelten Werten, häufig viele Millionen bis mehrere Milliarden Sonnenmassen und Radien bis zu einigen Lichttagen lässt sich nur der Schluss ziehen, dass in diesem Raumgebiet ein Schwarzes Loch vorhanden sein *muss*. Es gibt keine Alternative dazu.

Dem Chandra- Satelliten gelang 2002, ein mittelschweres Schwarzes Loch in der Galaxie M 82 im **Großen Bären** in 11 Millionen Lichtjahren Distanz ausfindig zu machen. Man fand es etwa 600 Lichtjahre vom Galaxienzentrum entfernt in einem Sternhaufen. Hier sind, nach dem Eddington- Limit bestimmt, etwa 500 Sonnenmassen in einem Volumen von der Größe des Mondes vereint! Neueren Messungen zufolge (2006) könnte das Schwarze Loch auch 1000 Sonnenmassen "schwer" sein.



Mit freundlicher Genehmigung von NASA/CXC/SAO

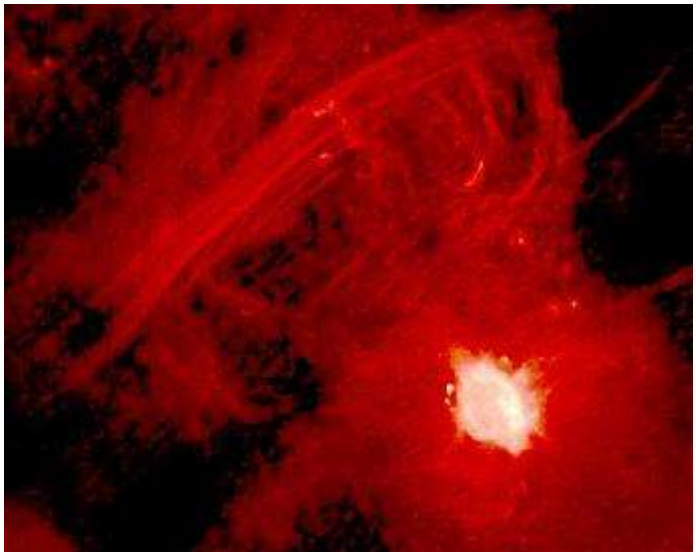
Astrophysiker sind sich noch nicht sicher, wie diese "Mittelschwergewichte" entstehen. Es könnte direkt in den Sternentstehungsgebieten geschehen, weil hier genügend Materie vorhanden ist. Erst recht in den Galaxienzentren. Möglich ist auch, dass wir es mit einem Relikt der ersten Sterngeneration zu tun haben, die ersten Sterne konnten bis zu 1000 Sonnemassen beinhalten. Es ist allerdings genauso möglich, dass man einer Täuschung unterliegt und das beobachtete Röntgenlicht durch den *Beaming- Effekt* verstärkt wird und die ermittelte Masse nicht annähernd so hoch ist wie errechnet.

Weitere Hinweise auf Schwarze Löcher mittlerer Masse fanden sich in Kugelsternhaufen, weil hier Bewegungen der Sterne auf dunkle, massereiche Zentren hinweisen sowie in Zwerggalaxien.

Die "Boliden" unter den Schwarzen Löchern findet man nur in den Zentren vieler Galaxien. Allgemein ist man in der Astrophysik sogar zu der Überzeugung gelangt, dass eigentlich in jedem Galaxienzentrum ein Schwarzes Loch stecken müsste. Selbst im Zentrum unserer Galaxis hat sich ein Schwarzes Loch verborgen, das sich inzwischen jedoch auf vielfältige Weise verraten hat.

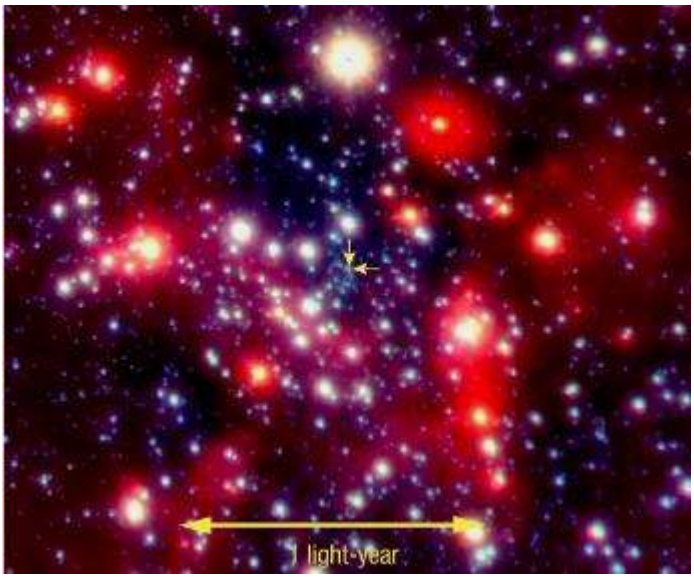
Wenn wir von unserer Position im Außenbereich der Milchstraße zum galaktischen Zentrum sehen, so wird die Sicht durch dicke Gas- und Staubschichten völlig behindert. Für einige Wellenlängen sind diese Bereiche aber durchlässig, so auch für Röntgenstrahlung. Diese Falschfarbenaufnahme des Chandra-Observatoriums zeigt einen Bereich von 400 mal 900 Lichtjahren um das Zentrum. Eingebettet in rund 10 Millionen [K] heißes Gas in dieser Region, sehen wir als weißen Fleck in der Bildmitte den Bereich des supermassiven Schwarzen Lochs. Nach neueren Erkenntnissen ist es 3,6 Millionen Sonnemassen "schwer".

Mit freundlicher Genehmigung von D. Wang (UMass) et al., CXC, NASA



Das Milchstraßenzentrum im Radiolicht, auch diese Wellenlänge lässt uns einen Blick auf das Innerste unserer Galaxis werfen. Der helle Fleck kennzeichnet wiederum die Umgebung des Schwarzen Lochs, bekannt als **Sagittarius A***. Die feinen, filamentartigen Bögen entstehen wohl, weil Ströme heißen Plasmas entlang magnetischer Feldlinien geführt werden. Ein wahrhaft ungemütlicher Ort!

Mit freundlicher Genehmigung von Farhad Yusef-Zadeh et al. (Northwestern), VLA, NRAO



Auch im Infrarotbereich lassen sich Details erspähen. Diese Aufnahme entstand mit der Infrarotkamera NAOS der europäischen Südsternwarte. Die Lage von Sagittarius A* ist mit Pfeilen gekennzeichnet. Imposant ist, dass wir einen Bildausschnitt von nur 2 Lichtjahren Ausdehnung sehen. Man konnte nun auch bestimmen, dass "unser" Schwarzes Loch eines vom Kerr-Typ ist: Es rotiert mit etwa halber Maximalgeschwindigkeit, also einem Viertel der Lichtgeschwindigkeit (man erinnere sich: Maximal-Kerr ist halbe Lichtgeschwindigkeit).

Mit freundlicher Genehmigung von Rainer Schödel (MPE) et al., NAOS-CONICA, ESO

*Aus der elliptischen Riesengalaxie **Centaurus A** schießt ein 30 000 Lichtjahre langer Jet aus dem Zentrum.*

Wir haben es mit einem sehr aktiven Galaxienkern ("AGN", *Active Galactic Nuclei*) zu tun, in welchem ein Schwarzes Loch von mehreren Millionen Sonnenmassen ständig Gas, Staub, ja ganze Sterne verschlingt. Hier, etwa in der Bildmitte, beginnt der Jet und führt nach links oben. Die übrigen Lichtpunkte, die wir hier im Röntgenlicht sehen, werden Neutronensterne oder stellare Schwarze Löcher sein. Centaurus A ist mit 11 Millionen Lichtjahren Distanz die uns nächste aktive Galaxie.

Mit freundlicher Genehmigung von R.Kraft (SAO) et al., CXO, NASA

Der Quasar 3C175 ist eine wahre kosmische Teilchenkanone. Elektronen und Protonen schießen mit fast Lichtgeschwindigkeit als dünner Jet 1 Million Lichtjahre weit ins All bevor sie vom intergalaktischen Medium abrupt gebremst werden und hierdurch eine Blase bilden. Antriebsmotor für diesen Jet ist auch hier ein supermassereiches Schwarzes Loch im Zentrum einer Galaxie, auch hier haben wir es also mit einem AGN zu tun. Die Schwarzen Löcher in diesen galaktischen Zentren können Massen bis in den Bereich zweistelliger milliardenfacher Sonnenmasse aufweisen.

Mit freundlicher Genehmigung von Alan Bridle (NRAO Charlottesville) VLA, NRAO, NSF

Wir wissen nicht genau, wie die ersten supermassiven Schwarzen Löcher entstanden (hier eine künstlerische Darstellung eines frühzeitlichen Quasars). Es ist aber durchaus denkbar, dass die ersten Sterne mit ihren großen Massen bis zum eintausendfachen der Sonnenmasse die Saat legten. Sicherlich sind sie zuhauf in den Galaxienzentren entstanden, weil hier die Massedichte am höchsten ist.

Mit freundlicher Genehmigung von Wolfram Freudling et al. (STECF), ESO, ESA, NASA

Ihr Ende war vermutlich oft durch ein Schwarzes Loch gekennzeichnet, welches nun ständig weiter mit Gas, Staub, Sternen und weiteren Schwarzen Löchern "gefüttert" wurde.

Die hohen Strahlungsleistungen der Quasare sind daher kein Wunder, akkretieren doch die Löcher in ihren Muttergalaxien ungehemmt jede erreichbare Materie, wodurch sie heller leuchten als die gesamte Galaxie. Man muss hierzu wissen, dass Akkretionsscheiben die größten Energieumwandler im Kosmos sind. Bis über 20 % der Materie können hier nach dem Einsteinschen Masse- Energieäquivalent $\mathbf{E = mc^2}$ als Energie freigesetzt werden. Es gibt keinen anderen Prozess, der einen solchen Wirkungsgrad erzielt.

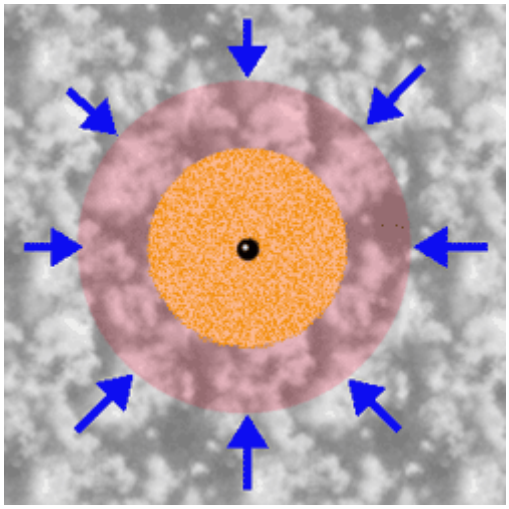
Weitere Informationen: http://www.mpe.mpg.de/~amueller/astro_sl.html#mass

Schwarze Löcher light

Bisher haben wir uns Schwarzen Löchern gewidmet, die aufgrund ihrer Masse von einigen wenigen bis hin zu Milliarden Sonnenmassen ansehnliche Durchmesser ihrer Horizonte ausbilden. Allerdings ist es denkbar, wenn auch bis heute rein spekulativ, dass sehr viel kleinere Löcher in mikroskopischem Maßstab existieren könnten.

Wie wir sahen, bilden sich Schwarze Löcher durch einen Gravitationskollaps, ein Himmelskörper bricht unter seiner eigenen Last zusammen. Sehr kleine **Minilöcher** können so niemals entstehen, weil die beteiligten Massen von beispielsweise Planeten oder Monden viel zu gering wären. Sie könnten nur entstehen, wenn ein entsprechend hoher Druck von außen auf die Materie ausgeübt wird. Prinzipiell sind wir Menschen sogar in der Lage, ein kleines Schwarzes Loch künstlich zu erzeugen! Wenn wir den Weltmeeren alles an *schwerem Wasser* (D_2O, der Wasserstoff ist durch Deuterium ersetzt) entziehen würden, könnte man daraus eine Wasserstoffbombe bauen. Bei ihrer Explosion wäre der Druck hoch genug, um in ihrem Zentrum befindliche Materie zu einem Schwarzen Loch zusammenzupressen. Dies wurde einmal von John Wheeler berechnet, der dabei hoffentlich berücksichtigte, dass es anschließend niemanden mehr gäbe um das Loch zu beobachten.

Es gibt allerdings auch ernsthaftere Überlegungen, mit denen sich insbesondere **Stephen Hawking** beschäftigte. Im frühen Universum nämlich waren Temperatur und Druck sehr hoch, so dass sich eventuell Schwarze Löcher bilden konnten. Solche **primordialen** (urzeitlichen) Löcher könnten allerdings nur dann entstehen, wenn der frühe Kosmos nicht absolut gleichmäßig, sondern von Unregelmäßigkeiten durchzogen war.



Dass dies der Fall gewesen sein muss wissen wir, da sonst weder Sterne noch Galaxien hätten entstehen können. Damit ist in der Tat die Möglichkeit gegeben, dass an Stellen höherer Dichte primordiale Löcher entstanden. Die Masse dieser Minilöcher wäre recht gering, sie müsste im Bereich von etwa mindestens 500 Milliarden Tonnen liegen (dem Gewicht eines Berges), wollten sie heute noch existieren. Kleinere Löcher wären längst verschwunden (warum sehen wir weiter unten). Ein primordiales Loch von rund 10^{18} [g] hätte einen Durchmesser, der kleiner als der eines Atoms wäre!

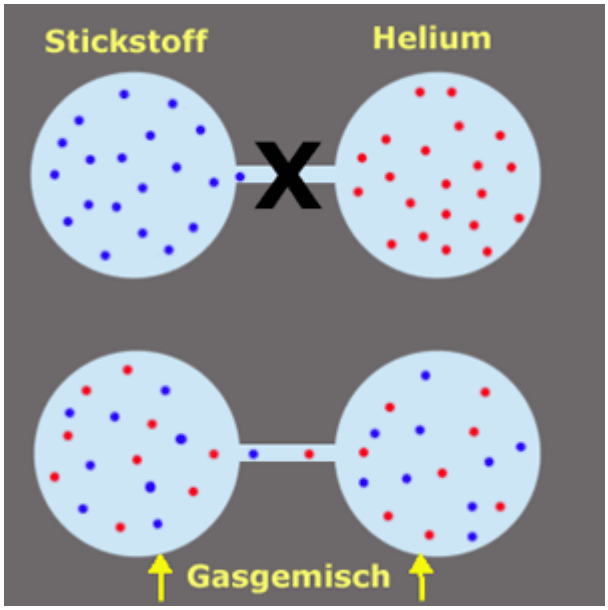
Sind Schwarze Löcher wirklich absolut schwarz? Haben Schwarze Löcher eine Temperatur? Schließlich war der Stern, aus dem das Loch entstand, einmal sehr heiß! Diesen Fragen sind wir bisher ausgewichen, wollen uns ihnen aber nun stellen. 1974 veröffentlichte Stephen Hawking einen Artikel, der die Fachwelt in helle Aufregung versetzte: Schwarze Löcher sollen alle möglichen Arten von Strahlung aussenden! Und das, obwohl wir doch alle wissen, dass nichts aus einem Schwarzen Loch entweichen kann. Darüber hinaus sollte das Strahlungsspektrum einem Schwarzen Strahler entsprechen, womit man letztendlich einem Schwarzen Loch eine Temperatur zuordnen kann.

Um diese Aussagen zu verstehen, müssen wir uns mit einem weiteren Begriff anfreunden, den der **Entropie**.

Die Entropie entstammt dem physikalischen Gebiet der **Thermodynamik**, und zwar derem zweiten Hauptsatz (es gibt insgesamt vier Hauptsätze, siehe auch weiter unten). Während der erste Hauptsatz besagt, dass in einem geschlossenen System die Gesamtenergie stets konstant bleibt, macht der zweite Hauptsatz eine Aussage über die Entropie, die "Unordnung" eines Systems. Damit ist nicht etwa die Unordnung im Zimmer Ihrer Kinder oder Ihres Hobbyraums gemeint, obwohl dies sehr anschauliche Beispiele sind. Unterlassen Sie einmal ein ganzes Jahr lang jede Ordnungsaktion, und Sie werden die Aussage des zweiten Hauptsatzes verstehen:

Die Entropie in einem geschlossenen System bleibt gleich oder nimmt zu.

Im Detail sind die Aussagen recht verzwickt und wir wollen uns daher hier auf ein Minimum beschränken. Hierzu ein Beispiel:



Wir nehmen zwei Gefäße, wovon wir eines mit Stickstoff, das andere mit Helium füllen. Angedeutet sind einige Gasmoleküle bzw. -atome. Da beide Gase voneinander getrennt sind, haben wir es mit einem geordneten Zustand zu tun. Wenn wir nun den Hahn öffnen, verteilen sich die Gase nach und nach vollkommen gleichmäßig im gesamten ihnen zur Verfügung stehenden Raum. Offensichtlich ist jetzt der Grad der Unordnung angewachsen. Es könnte natürlich geschehen, dass sich irgendwann alle Gaspartikel zufällig in einem der beiden Kolben befinden, doch das ist sehr unwahrscheinlich. Dennoch sehen wir hier den Unterschied zu anderen physikalischen Gesetzen: Der zweite Hauptsatz gilt nicht für *jeden* möglichen Fall, sondern trifft nur unter bestimmter, wenn auch sehr großer Wahrscheinlichkeit zu.

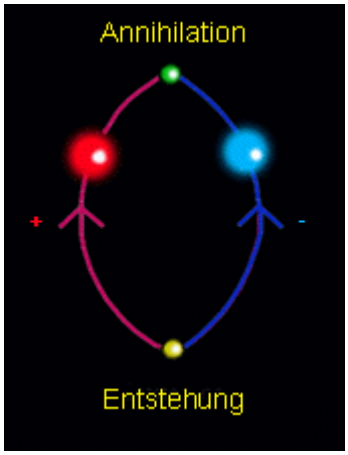
Wenn Sie einmal einen Eiswürfel auf den Tisch legen, dürfen Sie sich mit gutem Gewissen wundern, wenn er plötzlich in die Höhe springt. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass alle Moleküle des Würfels gleichzeitig nach oben schwingen und hierdurch den Sprung verursachen. Aber auszuschließen ist diese Möglichkeit nicht völlig! Vielmehr werden die Eismoleküle in alle Richtungen schwingen wie vorher auch. Es kann auch keine Wärme vom Eiswürfel auf den viel wärmeren Tisch überfließen. Dies ist eine weitere Aussage des zweiten Hauptsatzes, dass nämlich Wärme stets nur vom wärmeren zum kälteren Körper übergehen kann.

Was aber hat nun die Entropie mit unseren Schwarzen Löchern zu schaffen? Wenn wir unsere beiden gasgefüllten Behälter nehmen und in ein Schwarzes Loch werfen, so entziehen wir dem Kosmos Entropie (wir erinnern uns: Ein Schwarzes Loch schottet sich selbst völlig vom übrigen Universum ab, es ist ein eigenes, geschlossenes System). Die Entropie darf aber nach dem zweiten Hauptsatz nicht abnehmen. Stimmt die Physik nicht mehr?

Vielleicht ist es ja so, dass die Entropie des Universums gar nicht abnimmt, sondern zumindest gleich bleibt, wenn wir etwas ins Loch werfen. Man müsste hineinsehen können, um das festzustellen, aber das ist ja nicht möglich. Hawking kam nun der Gedanke, dass man die Entropie vielleicht auch außen "ablesen" könnte. Hierzu schlug **Jacob Bekenstein** vor, die Fläche des Ereignishorizontes als Maß für die Entropie zu verwenden. Zumal Hawking zuvor herausfand, dass die Fläche des Horizontes zunehmen *muss*, wenn Materie ins Loch fällt. Seine Erkenntnis besagt, dass beim Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher die Fläche des neuen Ereignishorizontes größer sein muss, als die Summe der beiden ursprünglichen Flächen.

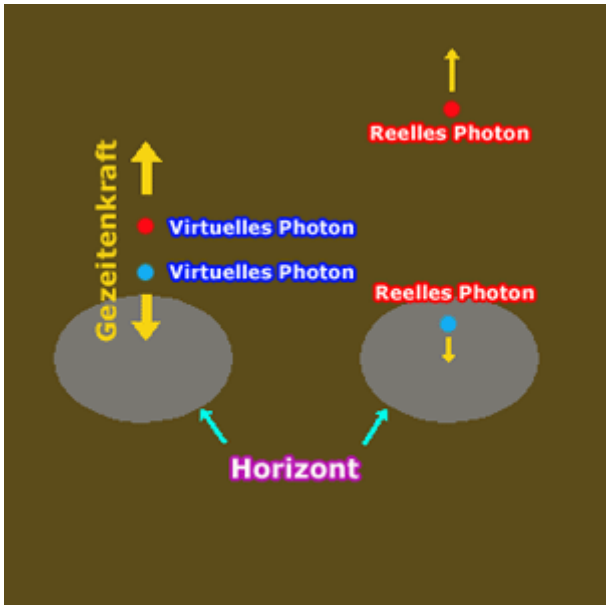
Wenn nun aber irgendetwas im Kosmos Entropie aufweist, dann sollte es auch eine Temperatur haben! Wie ein Schwarzer Strahler, der bei einer definierten Temperatur ein bestimmtes Strahlungsspektrum emittiert, sollte dies nun auch bei einem Schwarzen Loch der Fall sein. Wie aber kann das möglich sein, wo doch nichts, weder Strahlung noch Teilchen, aus dem Loch entweichen können? Die Antwort darauf hat Hawking in der Quantentheorie gefunden.

Die Quantentheorie besagt, dass ein Vakuum, ein "leerer" Raum, in Wirklichkeit nicht völlig leer ist. Immer und überall sind Felder vorhanden, seien es elektromagnetische oder gravitative. Solche Felder unterliegen auch der Heisenbergschen Unschärfe: je genauer wir versuchen, Größe oder Ort zu bestimmen, umso ungenauer wird die Aussage bezüglich der anderen Größe. Ein Feld kann deshalb nie exakt Null sein, weil es ja sonst einen genauen Wert (eben Null) aufwiese. Somit existieren Fluktuationen (ein "Auf" und "Ab") im Vakuum, die man sich als Teilchen vorstellen kann.



Diese Teilchen bezeichnen wir als **virtuell**, weil man sie nicht direkt beobachten kann. Einen indirekten Beweis ihrer Existenz liefern sie aber, indem sie beispielsweise die Elektronen von Wasserstoffatomen etwas hin und her stoßen, was zu einer messbaren, winzigen Verschiebung ihres niedrigsten Energieniveaus führt. Virtuelle Teilchen entstehen immer paarweise, und zwar als Teilchen und Antiteilchen. Das Teilchen weist dabei positive, das Antiteilchen negative Energie auf. Die Energie zu ihrer Entstehung "borgen" sie vom Vakuum und geben sie nach sehr kurzer Zeit wieder zurück, indem sie sich gegenseitig vernichten (**annihilieren**). Virtuelle Teilchenpaare können Materieteilchen wie Elektronen oder Quarks sein, oder wie in unserem Fall Photonen bzw. Gravitonen. Die beiden letzteren sind gleichzeitig ihre Antiteilchen.

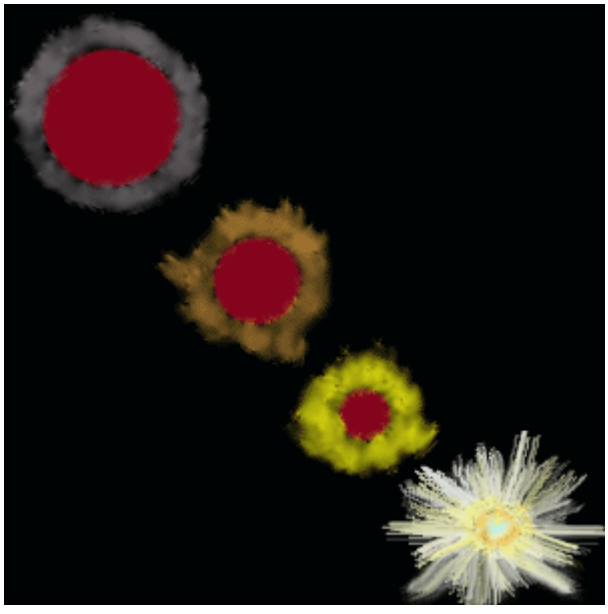
Virtuelle Teilchenpaare können nun auch direkt in der Nähe des Horizontes eines Schwarzen Lochs entstehen. Nun kommt die Gezeitenkraft in der Nähe des Lochs zum Tragen, sie kann das Teilchenpaar auseinander ziehen, so dass zumindest ein Partner des Paares in das Loch fällt. Wenn ein reales Teilchen sich in der Nähe eines Schwarzen Lochs aufhält, muss es Energie gegen die Gravitation aufwenden. Umso mehr, je näher es dem Horizont kommt. Die Gravitation ist so stark, dass die Energie des Teilchens im Loch sogar negativ werden kann. Das trifft auch für die virtuellen Teilchen zu. Fällt jetzt ein solches ins Loch, kann es zu einem reellen Teilchen (oder Antiteilchen) mit negativem Energieinhalt werden. Da nach Einsteins $E = mc^2$ Energie gleich Masse ist, befindet sich nun ein Teilchen mit negativer Masse im Loch. Das bedeutet im Endeffekt, dass dem Schwarzen Loch Masse entzogen wird! Durch diesen Vorgang verkleinert sich sein Horizont und damit auch die Entropie.



Weil die Entropie aber nicht abnehmen kann, muss noch ein anderer Prozess ablaufen. Dafür sorgt das verwaiste Partnerteilchen. Die Gezeitenkraft ist so groß, dass sie den virtuellen Photonen soviel an Energie zuführen kann, dass sie zu realen Teilchen werden. Dabei bleibt mehr als genug Energie übrig, um sie an den umgebenden Raum abzugeben. Dieser hatte ja einen negativen Energieinhalt, da er die Energie zur Bildung des Teilchenpaares lieferte. Der eine Partner mit negativer Energie befindet sich jetzt schon im Loch, das andere Teilchen aber kann nun als reales Teilchen positiver Energie entkommen. Weil man jedes Teilchen auch als Welle auffassen kann (*Welle- Teilchen-Dualismus*), sehen wir also Strahlung, die scheinbar aus dem Schwarzen Loch kommt!
Der Entropieverlust durch die Horizontverkleinerung wird mehr als ausgeglichen durch die Entropiezunahme der emittierten Strahlung, der zweite Hauptsatz behält seine Gültigkeit!

Nun darf man sich nicht vorstellen, dass durch die nach Hawking benannte Strahlung das Loch hell leuchtet. Wenn aus den virtuellen Teilchen reelle werden sollen, muss ihr Abstand kleiner sein als eine Wellenlänge der ihnen äquivalenten Welle. Damit sie andererseits genug Energie aus der Gezeitenkraft abzapfen können, müssen sie auf eine Distanz von rund einem Viertel des Horizontumfangs gebracht werden. Somit erhalten wir eine Aussage über die Wellenlänge der Strahlung, sie liegt bei 1/4 des Horizontumfangs oder darüber. In Zahlen ausgedrückt: ein Loch von 2 Sonnenmassen hat einen Horizontumfang von rund 35 [km], woraus eine Wellenlänge von 8,75 [km] resultiert. Das ist nicht gerade energiereiche Strahlung, sie entspricht einer Temperatur von etwa einem Zehnmillionstel [K] über dem absoluten Nullpunkt. Es ist einleuchtend, dass es unvorstellbar lange dauern wird, bis ein solches Loch völlig zerstrahlt ist, nämlich 10^{66} Jahre! Messen können wir diese Strahlung nicht, weil sie von der viel "wärmeren" und überall vorhandenen kosmischen Hintergrundstrahlung völlig überdeckt wird.

Die Intensität der Hawking- Strahlung hängt direkt von der Masse des Schwarzen Lochs ab.



Je kleiner das Loch ist, umso kürzer ist auch die Strecke, die ein virtuelles Teilchen zurücklegen muss, damit es ein reelles wird. Wenn das Loch nach und nach an Masse verliert, steigt damit im selben Maß seine Temperatur an, die Wellenlänge der Strahlung wird kürzer und energiereicher. Am Ende wird es wohl in einem immensen Gammastrahlungsausbruch vergehen. Jetzt können wir auch verstehen, warum ein primordiales Loch eine bestimmte Mindestmasse (etwa 500 Milliarden Tonnen) aufweisen muss, damit es heute noch existiert.

Kleinere Löcher wären längst verdampft! Wir sind also imstande, die Existenz primordialer Minilöcher nachzuweisen, indem wir den Himmel nach Gammastrahlenausbrüchen durchforsten. Diese GRB's (*Gamma- Ray- Burst*) sind den Astronomen schon länger bekannt, allerdings fand man bisher stets andere Entstehungsursachen, deren Energieausstoß auch viel höher ist. Der Nachweis primordialer Löcher ist bislang noch nicht gelungen.

Kehren wir noch einmal zurück zu den vier Hauptsätzen der Thermodynamik. Die folgende Tabelle gibt eine kurze, allgemeine Übersicht der einzelnen Sätze. Für Schwarze Löcher können wir ebenso vier Hauptsätze aufstellen, mit denen sich ihre Dynamik beschreiben lässt. Die einzelnen Sätze sind sich erstaunlich ähnlich, ihre Bedeutung verdanken wir Stephen Hawking. Die etwas seltsame Bezeichnung *0. Hauptsatz* rührt übrigens daher, dass die anderen 3 Sätze bereits vor seiner Entdeckung existierten.

Thermodynamik	**Schwarzes Loch**
0. Hauptsatz	
Alle Teile eines Systems im thermischen Gleichgewicht haben dieselbe Temperatur (wobei Temperatur eine intensive Größe ist, d.h. sie ändert sich nicht mit der Größe des Systems).	**Alle Punkte auf dem Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs im Gleichgewicht haben dieselbe Gravitation** (das gilt selbst für Kerrsche Löcher, auch hier ist der Horizont kugelförmig).
1. Hauptsatz	
Wärme ist eine Energieform. Der 1. Satz beschreibt, **wie sich verschiedene Energieformen während eines zeitlichen Ablaufs ineinander umwandeln können.** In einem abgeschlossenen System bleibt die Gesamtenergie konstant (Satz der Energieerhaltung).	Der Satz besagt, **wie sich Masse, Rotation und Drehimpuls als Funktion der Fläche und Oberflächengravitation bei einem Prozess ändern** (z.B. Akkretion eines Sterns)
2. Hauptsatz	
In einem abgeschlossenen System kann die Entropie im zeitlichen Verlauf nur zunehmen. Die Entropie im Universum strebt einem Maximum zu. Natürliche Prozesse sind irreversibel (nicht umkehrbar). Die zu Boden gefallene Kaffeetasse kann höchstwahrscheinlich nicht von selbst wieder auf den Tisch springen.	**Die Oberfläche eines Schwarzen Lochs kann im zeitlichen Verlauf nur zunehmen.** Selbst ein isoliertes Loch vergrößert seine Oberfläche durch Strahlungs- und Teilcheneinfang.
3. Hauptsatz	
Der absolute Nullpunkt (0 [K] = -273,15° C) kann niemals durch eine endliche Folge von Prozessen erreicht werden. Die Entropie eines perfekten Kristalls am absoluten Nullpunkt ist Null.	**Die Oberflächengravitation eines Schwarzen Lochs kann niemals durch eine endliche Folge von Prozessen auf Null gebracht werden.** Dieser Zustand entspräche dem Grenzfall des mit Maximal Kerr rotierenden Loches ($a = 1$). Dieser kritische Wert ist in der Natur nicht erreichbar.

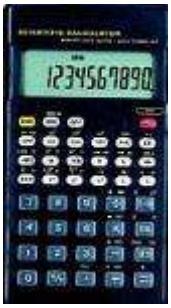
Damit kommen wir zum Schluss zu den allerkleinsten Schwarzen Löchern. Teilchenphysiker in aller Welt erhoffen sich vom neuen LHC (*Large Hadron Collider*) des *CERN* in Genf, einem der größten Teilchenbeschleuniger, neben vielen anderen Forschungen (z.B. Aufspüren von *Higgs- Teilchen*, Erkunden Dunkler Materie und Energie), auch die Möglichkeit, Schwarze **Mikrolöcher** minimaler Masse zu erzeugen. Die Energien, die in diesem Beschleuniger erreicht werden können, sollten dazu jedenfalls ausreichen. Die Lebensdauer solcher Löcher wäre natürlich extrem gering, da sie sofort nach ihrer Entstehung in ultrakurzer Zeit wieder zerstrahlen. Dennoch könnten solche Experimente unser Wissen über Schwarze Löcher um einiges erweitern.

Häufig schon wurde in der Öffentlichkeit die Befürchtung geäußert, dass die künstlich erzeugten Mikrolöcher eine ernsthafte Gefahr für die Erde und die Menschheit darstellen. Schließlich verschlingt ja ein Schwarzes Loch jede Materie, derer es habhaft werden kann! Wir aber wissen es jetzt besser. Bevor das Mikroloch mit der Akkretion beginnen könnte, wäre es längst verdampft...

Informatives

Betrachten wir einmal intensiv einen beliebigen Gegenstand, beispielsweise den Taschenrechner auf dem Schreibtisch. Wie könnten wir ihn möglichst genau, auch aus physikalischer und chemischer Perspektive beschreiben? Das hat jetzt zwar nichts mit Schwarzen Löchern zu tun, aber gemach, das wird schon noch!

Zunächst könnten wir einfach damit beginnen, die Anordnung und Beschriftung der Tastatur zu definieren. Um das exakt durchzuführen, müssten wir neben der Größe, Gewicht, Form und Farbe einer Taste auch deren genaue Materialzusammensetzung untersuchen. Aus wie viel Molekülen des Kunststoffes besteht sie? Aus welchen Atomen ist der Kunststoff aufgebaut? Wir müssten auch die chemische Formel des Beschriftungslacks hinzunehmen und selbstverständlich auch genau beschreiben, welche Form jedes Symbol hat.



Puuh, das ist schon eine schwierige Aufgabe! Nun kommt das Display an die Reihe. Es ist mit einer Plastikabdeckung geschützt. Aus welchen Atomen ist jetzt dieser Kunststoff aufgebaut, wie sind sie angeordnet und wie viele braucht man von jeder Sorte, damit genau diese Abdeckung entsteht? Welche Härte hat der Kunststoff, welche Dichte, welchen Schmelzpunkt, wie ist seine Wärmeleitfähigkeit und wie hoch seine Durchlagspannungsfestigkeit...? Nun wird es fast kriminell, wollten wir die Flüssigkristall- Anzeige absolut exakt beschreiben. Ganz zu schweigen vom Innenleben des Taschenrechners, aufgebaut aus komplexen Chips, SMD- Bausteinen, Platine und einer Nickel-Cadmium- Batterie...

Wenn man das alles höchst genau und bis ins kleinste Detail, also bis auf das letzte Atom genau beschreiben will, kann man garantiert ein sehr dickes Buch füllen: Nämlich mit **Informationen** darüber, was eigentlich ein Taschenrechner ist. In jedem Fall aber könnte man den Taschenrechner vollständig zerlegen, und zwar bis auf die Größe atomarer Einheiten und anhand der vorliegenden Informationen muss es möglich sein, ihn wieder komplett herzustellen. Im Prinzip macht der Taschenrechner- Fabrikant nichts anderes: Anhand einer Arbeitsanleitung baut er solche Geräte aus vielen verschiedenen Komponenten auf. Zwar wird er nicht jedes Einzelteil selbst herstellen, sondern von anderen Lieferanten beziehen. Diese wiederum beziehen aus anderen Quellen Rohstoffe, aus denen sie Vorprodukte herstellen. Würde man jedes einzelne Teil in dieser Weise zurückverfolgen und alles fein säuberlich notieren, käme man wieder zu der oben gemachten Beschreibung.

Solche umfangreichen Zusammenstellungen gibt es tatsächlich. Als ausgereiftes Beispiel hierzu mag die IMDS- Datenbank dienen. In diesem online verfügbaren **Internationalen Material Datenbank System** sind viele namhafte Automobilhersteller vertreten. Jeder Zulieferer auch selbst des allerkleinsten Teils gibt in dieses System die genaue Zusammensetzung seines Produktes ein, so dass am Ende vollständig und exakt erfasst ist, aus welchen Stoffen das komplette Fahrzeug besteht. Das ist wahrlich eine überwältigende Informationsmenge! Sie dient aber dazu, dass spätere Altfahrzeuge möglichst komplett recycled werden können und keine schädlichen Substanzen in Fahrzeugteilen enthalten sind.

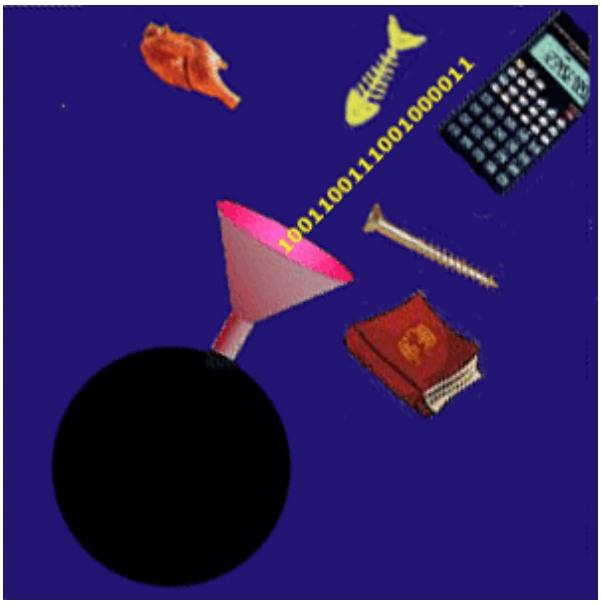
Vielleicht haben wir nun schon einen kleinen Einblick gewonnen, was Informationen alles beinhalten bzw. umfassen können. Informationen (*lat., informatio "Bildung durch Unterricht"*) sind also die Auskunft über eine bestimmte Sache, die räumliche, zeitliche Folge physikalischer Ereignisse und chemischer Kompositionen. Information ist das Wissen über Sachverhalte und/oder Vorgänge, oder anders ausgedrückt die Beseitigung einer Unbestimmtheit oder Unklarheit. Ein Element einer Informationseinheit ist ein Zeichen, wie z.B. ein Buchstabe oder ein mathematischer Ausdruck. Aus unserer Betrachtungsweise stellt ein Photon die kleinstmögliche Informationseinheit dar, es kann ebenfalls als ein Zeichen aufgefasst werden. Das Photon hat ja den Spin 1, dieser kann Werte von +1 oder -1 annehmen und somit als eine Informationseinheit vereinbart werden.

Anhand unseres Taschenrechner- Beispiels sahen wir schon, dass eine riesige Menge an Informationseinheiten notwendig ist, um auch nur eine einfache Sache exakt zu beschreiben. Unglaublich komplex dagegen ist das Leben. Vielfach wird in der SF- Literatur vom "Beamen" gesprochen, bzw. der Teleportation. Hier werden Lebewesen auf irgendeine Weise "abgetastet", in Informationen zerlegt, diese als elektromagnetische Strahlung über einen Sender geschickt und in einem Empfänger wieder originalgetreu reproduziert. Man hat dazu einmal geschätzt, dass allein die Information über einen Menschen einen Stapel von CD's füllen würde, der einige Lichtjahre hoch wäre...und diese Informationsfülle müsste in Sekundenbruchteilen erfasst, gespeichert und übermittelt werden.
Das Beamen ist damit aus unserer heutigen Sicht eine völlig unlösbare Aufgabe.

Nach diesem kleinen Abstecher wollen wir uns wieder den Schwarzen Löchern zuwenden. Oben sahen wir ja, wie viel Information notwendig ist, um nur einen einfachen Taschenrechner zu beschreiben. In einem Anfall von Übermut nehmen wir nun einen solchen und werfen ihn kurzerhand in ein Schwarzes Loch. Die große Frage ist nun: Was geschieht mit all den Informationen, die unseren Taschenrechner ausmachen? Dabei sehen wir einmal großzügig darüber hinweg, dass unser Gerät bereits in der Akkretionsscheibe vollständig pulverisiert wird, noch mehr sogar wird es hier in seine kleinsten Bestandteile, in Atome zerlegt. Und die werden obendrein auch noch ionisiert...

All das lassen wir einfach außen vor, wir möchten nur wissen was aus den Informationen wird. Diese Frage haben sich schon viele Astrophysiker gestellt und dabei haben sich 2 gegenteilige Lager gebildet:

- 1. Die Informationen werden im Schwarzen Loch vollständig vernichtet. Es ist nie wieder möglich, an einmal hineingeratene Informationen zu gelangen. Schwarze Löcher sind die absoluten *Informationsvernichter* im Universum.
- 2. Die Informationen gehen nicht verloren. Ähnlich dem Gesetz zur Energieerhaltung müssen sie erhalten bleiben. Irgendwann kann man wieder Informationen zurück gewinnen, wenn auch vielleicht nicht vollständig oder nur verzerrt.



Unter dem zweiten Punkt wurde schon angedeutet, dass prinzipiell auch noch eine dritte Möglichkeit besteht: Informationen, die wir einem Schwarzen Loch "eintrichtern", werden zwar nicht vollständig vernichtet, jedoch auf eine unbekannte Weise derart verzerrt, dass eine spätere Reproduktion des Originals nicht mehr möglich ist. Nun können wir uns berechtigterweise fragen, welche der Möglichkeiten trifft denn nun zu? Sind die Informationen über den Aufbau unseres Taschenrechners für immer im Schwarzen Loch verschwunden oder gibt es ein wie auch immer geartetes Verfahren, die Informationen zurück zu gewinnen?

Im Jahr 1997, am 6. Februar, wurde eine Wette schriftlich fixiert. Seit 1975 war **Stephen Hawking** fest davon überzeugt, dass Schwarze Löcher vollkommene Informationsvernichter sind. Im genannten Jahr, nach vielen Diskussionen, wettete nun Hawking zusammen mit **Kip Thorne**, einem bekannten Relativisten und führenden "Kenner" Schwarzer Löcher gegen den Astrophysiker **John Preskill**, dass Schwarze Löcher Informationen vernichten:

In dieser Wette glauben also Thorne und Hawking, dass Informationen, die in ein Schwarzes Loch geraten, für immer verloren sind. Preskill hingegen ist überzeugt, dass es einen Mechanismus geben muss, der beim Verdampfen eines Schwarzen Lochs die Informationen wieder zutage bringt.

Auf dem Foto sind die drei wettfreudigen Wissenschaftler bei der Unterzeichnung der Wette zu sehen: John Preskill, Kip Thorne und Stephen Hawking (v.l.n.r.). Aufgrund seiner Krankheit "unterschreibt" Hawking gerade mit seinem Fingerabdruck. Gewettet wurde um eine Enzyklopädie nach Wahl des Gewinners, *aus der man willentlich Informationen entnehmen kann*.

Diese Wette hatte genau bis zum 21. Juli 2004 Bestand...

Whereas Stephen Hawking and Kip Thorne firmly believe that information swallowed by a black hole is forever hidden from the outside universe, and can never be revealed even as the black hole evaporates and completely disappears,

And whereas John Preskill firmly believes that a mechanism for the information to be released by the evaporating black hole must and will be found in the correct theory of quantum gravity,

Therefore Preskill offers, and Hawking/Thorne accept, a wager that:

When an initial pure quantum state undergoes gravitational collapse to form a black hole, the final state at the end of black hole evaporation will always be a pure quantum state.

The loser(s) will reward the winner(s) with an encyclopedia of the winner's choice, from which information can be recovered at will.

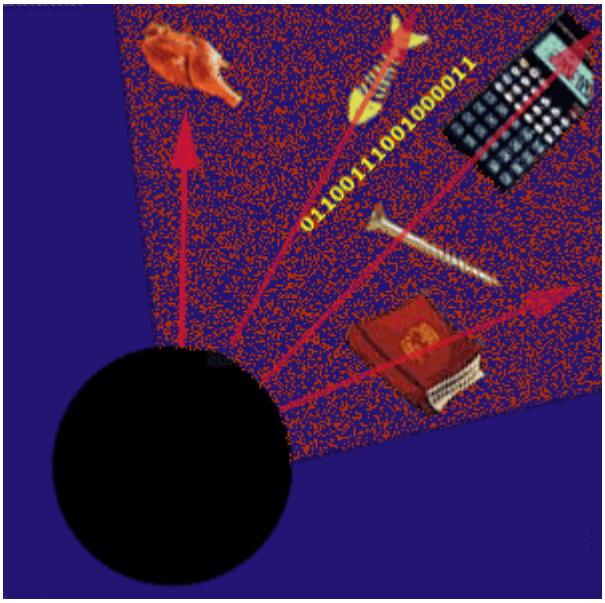
Stephen W. Hawking, Kip S. Thorne, John P. Preskill Pasadena, California, 6 February 1997

An diesem Tag fand in Dublin die 17. Internationale Konferenz über Allgemeine Relativitätstheorie und Gravitation statt. Erst ganz kurz vor Beginn ließ sich Hawking als Sprecher nominieren. Im 19. Jahrhundert wurde man sich über die Erhaltung der Energie sicher, sie kann nicht verloren gehen. Im 20. Jahrhundert wurde dann auch klar, dass Informationen nicht verloren gehen können. Hawking hat sich in genannter Konferenz in seinem aufseheneregenden Vortrag ebenfalls zu dieser Einsicht bekannt.

Professor Hawking hat sich sehr intensiv mit Schwarzen Löchern befasst und war bislang davon ausgegangen, dass der "Glatzensatz" von **John Wheeler** - *Schwarze Löcher haben keine Haare* - zutrifft. Das bedeutet, dass nichts aus einem Schwarzen Loch herausragt und es nur durch seine Masse, seine Rotation und Ladung zu beschreiben ist. Alle anderen Informationen, speziell über den ursprünglichen Stern, aus dem das Loch entstand, sind für immer hinter dem Horizont verborgen. Ein Schwarzes Loch ist eine Folgerung der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Informationsverlust steht im krassen Widerspruch zur Quantenmechanik. Diese besagt, dass egal, was mit einem Teilchen geschieht, man es stets durch eine Zeitumkehr reproduzieren kann. Man kann also wieder an die Informationen gelangen! Würde das nicht zutreffen, so hätte auch der Satz von der Energieerhaltung keine Gültigkeit mehr! Nach Einstein sind ja Energie und Materie äquivalent, so dass man auch Energie "produzieren" oder vernichten könnte, wäre man imstande ein Teilchen irreversibel zu vernichten. Weil man aber Energie nicht "herstellen" oder vernichten kann, können auch gemäß dem Materieäquivalent Informationen nicht verloren gehen. Aufgrund dieses **Informationsparadoxons** stehen sich also Quantenphysik und Allgemeine Relativitätstheorie unvereinbar gegenüber. Und genau dies ist der Grund, warum Preskill gegen Hawking und Thorne gewettet hatte, weil er nämlich meint, dass die noch zu findende **Quantengravitation** einen Weg aufzeigen könnte, wie Informationen erhalten werden können, wenn sie in ein Schwarzes Loch fallen.

"Wenn Sie in ein Schwarzes Loch springen, dann kommt irgendwann Ihr Energie-Masseäquivalent wieder zurück ins Universum. Allerdings in veränderter Form, die zwar die Information darüber enthält, wer und was Sie einmal gewesen sind, doch ist die Information nicht mehr erkennbar," sprach Hawking seine Zuhörer auf der Konferenz an. Das "Verschwinden" von Information in einem Schwarzen Loch führte Hawking 30 Jahre darauf zurück, dass sie in Paralleluniversen abfloss. *"Es gibt jedoch keine Baby-Universen"* sagte Hawking (da er selbst nicht mehr sprechen kann, überlässt er das einem Sprachcomputer). Und er bedaure es sehr, alle SF- Fans enttäuschen zu müssen, aber es gäbe keine Möglichkeit, Schwarze Löcher als "Transportmittel" zu Reisen in andere Universen zu nutzen. In seinem folgenden Vortrag gab Hawking die Begründung seiner Kehrtwende bekannt, doch selbst John Preskill, Professor für theoretische Physik und Mathematik am **Caltech** (*California Institute of Technology*), musste nach der Rede gestehen: "Um ehrlich zu sein, ich habe den Vortrag nicht verstanden." Immerhin hat Preskill von Hawking die gewünschte Baseball- Enzyklopädie erhalten. Zwar hatte Hawking zuvor versucht, ihn zu einer Cricket- Enzyklopädie zu überreden, doch auch das verlor Hawking.

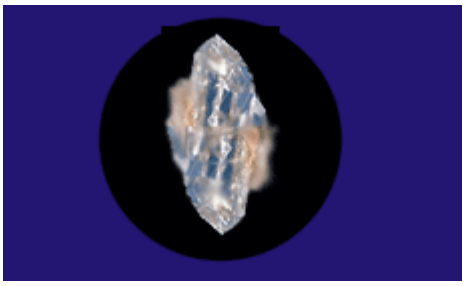
Nun hat dieser Abschnitt schon einige Informationen vermittelt, doch noch immer wissen wir nicht, was mit ihnen im Schwarzen Loch geschieht. Und auch nicht, wie sie wieder herauskommen.



Eine Möglichkeit bietet die Hawking- Strahlung. Dazu dürfte es sich dabei allerdings nicht um eine thermische Strahlung handeln, deren Frequenzen bzw. Wellenlängen einer Zufallsverteilung gehorchen. Wir müssten also eine konkrete Strahlung beobachten, in welcher jede Einzelheit über jemals ins Loch gefallene Materie gespeichert ist. Wenn wir auch die Informationen nicht unbedingt entnehmen können, "vergisst" das Universum aber nichts.

Die Hawkingstrahlung scheint jedoch thermisch zu sein, weshalb die Informationsspeicherung anders funktionieren muss.

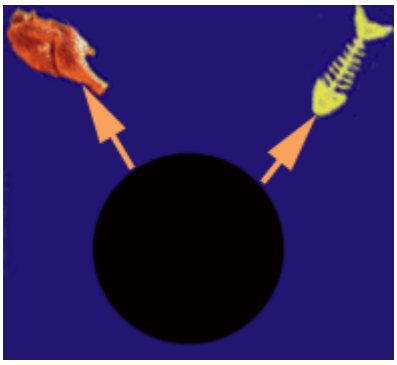
Wenn die Hawking- Strahlung tatsächlich thermisch ist, kann sie vielleicht nur einen verschwindenden Teil der Informationen zurückgeben. Der Rest muss irgendwie im Loch gespeichert bleiben, wenn auch auf eine völlig entstellte Art und Weise. Möglicherweise sind die Informationen zu einer Art Kristall kondensiert, härter als jeder Diamant. Das Verdampfen eines Schwarzen Lochs geschieht nicht rückstandsfrei, sondern es verbleibt ein kleiner Rest, unser nicht einmal atomgroßer Informationskristall.



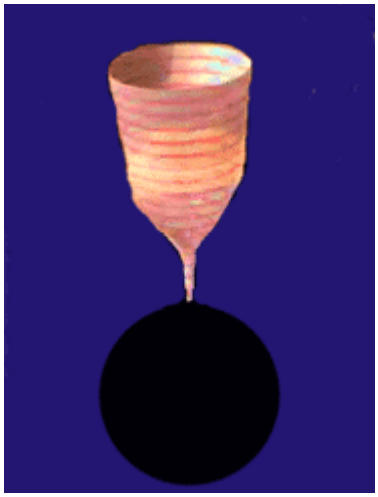
Es ist nach Meinung mancher Astrophysiker denkbar, dass Informationen in irgendeiner Form auf dem Horizont gespeichert werden. Wenn auch nicht vielleicht die kompletten Informationen, so doch eine Art "Kopie" der Originalinformationen, welche möglicherweise im Loch verschwinden und dort vernichtet werden.

Es gibt noch eine ganz einfache Möglichkeit, die Informationsvernichtung nicht stattfinden zu lassen: Es gibt gar keine Schwarzen Löcher! Vielleicht hat die Natur einen uns noch unbekannten Ausweg aus dem Gravitationskollaps eines Sterns gefunden, vielleicht in Form der Gravasterne oder auch in so genannten **Holosternen**, die ähnlich den Gravasternen aufgebaut sind oder der den String- Theorien entstammenden Alternativen Schwarzer Löcher, den **Fuzzballs**. Letztere sind exotische Gebilde, welche nicht wie Schwarze Löcher überwiegend aus Vakuum bestehen, sondern komplett mit Strings und/oder Branen gefüllt sind.

Der niederländische Physiker **Gerard 't Hooft** meint, es könnte durchaus auch sein, dass Informationen erst gar nicht ins Schwarze Loch gelangen, sondern am Ereignishorizont wie an einer Mauer abprallen. So könnten sie auch, einer anderen Überlegung zufolge, einfach irgendwie in der Raumzeit gespeichert bleiben. Beides ist jedoch unwahrscheinlich. Der Ereignishorizont ist keine Mauer sondern lediglich ein leerer Raumbereich, in dem die Fluchtgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ist. Es ist auch kaum vorstellbar, dass eine "Einbettung" in der Raumzeit erfolgt - die Informationen wären sicher nicht mehr zugänglich.



Stephen Hawking war bis zu seiner oben genannten Meinungsumkehr noch der festen Überzeugung, dass Informationen von einem Schwarzen Loch verschluckt werden und durch die Singularität, die mit einem anderen (Parallel-) Universum korrespondiert, dorthin verschwinden. Sie werden damit zwar möglicherweise nicht vernichtet, sind allerdings auch niemals wieder zugänglich. Auch in dieser Version bliebe das Informationsparadoxon von Bestand. Auch sollte unter günstigen Umständen die Möglichkeit gegeben sein, durch die (Ring-) Singularität in ein anderes Universum zu reisen. Realistisch gesehen dürfte die Reise durch ein Schwarzes Loch in jedem Fall unweigerlich zum alsbaldigen Tod führen, zumal niemand weiß, ob es überhaupt andere Universen gibt und Schwarze Löcher mit ihnen tatsächlich "in Verbindung" stehen könnten.



Inzwischen haben wir eine ganze Reihe von Möglichkeiten gesehen, was unseren Informationen alles geschehen *könnte*. Längst nicht alle Vorschläge wurden hier aufgezählt, doch die meisten übrigen liegen abseits jeder Realität, weshalb wir sie nicht weiter beachten wollen. Summa sumarum ergibt sich leider noch immer klein klares Bild, was mit den Informationen geschieht, wenn wir unseren Taschenrechner in das Schwarze Loch werfen. Und was bewog einen brillanten Wissenschaftler wie Hawking nun zu seinem Meinungsumschwung?

In einem Gedankenexperiment zieht er eine Parallele zu den Experimenten der Teilchenphysiker. Diese beschießen ja in den großen Beschleunigern irgendwelche Teilchen mit anderen und beobachten, was dabei geschieht. Entweder werden die Teilchen von ihrer ursprünglichen Flugbahn nur abgelenkt ("gestreut") oder es entstehen völlig neue Teilchen. Solche *Streuexperimente* dachte sich auch Hawking aus, nur dass er die Partikel derart kollidieren ließ, dass sie ein Schwarzes Loch bilden, welches dann wieder verdampft. Hawking selbst stellte sich dabei als entfernten Beobachter vor, der von den extremen Kräften in der Nähe des Schwarzen Lochs nicht mitbekommt.

In seinem Experiment sendet er also aus der "Unendlichkeit" Teilchen und Strahlung (damit auch Informationen), die das Schwarze Loch bilden und er beobachtet, was wieder bei ihm ankommt. Somit umgeht er die extrem starken Felder im Bereich des Lochs, doch kann er nun auch nicht sicher sein, ob sich überhaupt ein Schwarzes Loch gebildet hat. Diese Unsicherheit erlaubt es Hawking nun zu sagen, dass Informationen erhalten bleiben und in die Unendlichkeit zurückkommen können.

Hawkings Begründung ist nicht nur reine Prosa gewesen, sondern handfeste und hochkomplizierte Mathematik. Er bediente sich dabei der so genannten *Pfadintegral-Methode*, eine der Quantenmechanik entstammenden Betrachtungsweise. Wenn man eines der oben genannten quantenphysikalischen Teilchen, z.B. ein Elektron, von einer Quelle zu einem Ziel sendet, so muss es nicht unbedingt einen bestimmten, einen einzig möglichen Weg nehmen. Im Gegenteil, das Elektron kann beliebig viele Wege zum Ziel gehen, und manche sogar gleichzeitig! Diese vielen verschiedenen Pfade werden von den Pfadintegralen in einem Komplex beschrieben, wobei dann allerdings jedem einzelnen Pfad nur eine geringe Wahrscheinlichkeit zukommt (in der Quantenphysik rechnet man nur mit Wahrscheinlichkeiten), nur einige wenige sind sehr wahrscheinlich. Pfadintegrale sind selbst für gestandene Physiker nicht wirklich prickelnd - vielleicht schon allein deshalb verstand kaum einer der Zuhörer seinen Vortrag. Im Endeffekt, und das ist was uns interessiert, kam er jedoch zu dem Ergebnis, dass Informationen in verdampfenden Schwarzen Löchern nicht verloren gehen können.

Viele namhafte Wissenschaftler zweifeln Hawkings Begründung an und wir stehen damit nach wie vor der ungeklärten Frage gegenüber, was nun mit Informationen im Schwarzen Loch geschieht. Der theoretischen Physik stellt sich deshalb diese anspruchsvolle Aufgabe weiterhin, denn es ist keinem Beobachter zumutbar, 10^{100} Jahre darauf zu warten, dass ein (großes) Schwarzes Loch (vielleicht) verdampft und dann entweder Informationen wieder preisgibt oder auch nicht.