

Reiner Guse Januar 2010	Schwarze Löcher	Astro- Stammtisch
----------------------------	------------------------	----------------------

1. Was sind Schwarze Löcher?

Dazu betrachten wir zunächst die Fluchtgeschwindigkeit eines Objektes wie z. B. der Erde, der Sonne oder eines Planeten. Sie ist die Geschwindigkeit, die ein Körper mindestens benötigt, um sich von diesem Objekt dauerhaft zu entfernen. Die kinetische Energie dieses Körpers muss mindestens so groß sein wie die potentielle Energie durch die Gravitation. Setzt man diese Energien gleich, erhält man die Formel zur Berechnung der Fluchtgeschwindigkeit:

$$v_{\text{Flucht}} = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R}} \quad \text{wobei } G = 6,674 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2 \text{kg}} \text{ die Gravitationskonstante ist, } M \text{ die Masse des}$$

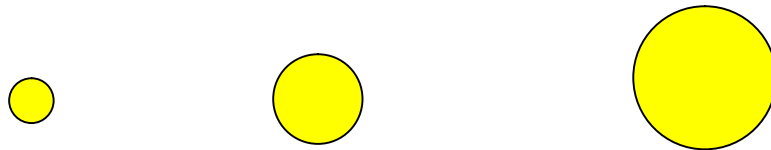
Objekts und R der Abstand zum Mittelpunkt des Objektes ist. Für die Erde beträgt $v_{\text{Flucht}} = 11,2 \text{ km/s}$, für die Sonne 617 km/s .

1916 stellte Karl Schwarzschild eine Theorie für Objekte auf, bei denen die Fluchtgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ist. Damit kann diesen Objekten kein Licht entweichen. Aus der Formel für die Fluchtgeschwindigkeit erhält man dann für den Radius dieser Objekte (den sogenannten Schwarzschildradius R_S):

$$R_S = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2} \quad \text{mit } c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ für die Lichtgeschwindigkeit. Damals glaubte keiner an das Vorhandensein solcher Objekte. John A. Wheeler gab ihnen 1967 den Namen „Schwarze Löcher (black holes)“.$$

Ein Schwarzes Loch ist ein Objekt dessen Gravitation so groß ist, dass kein Licht entweichen kann.

Inzwischen wissen wir, dass Sterne mit großen Massen als Schwarze Löcher enden. Folgende Übersicht zeigt Richtwerte zur Entwicklung von Sternen mit unterschiedlichen Massen.

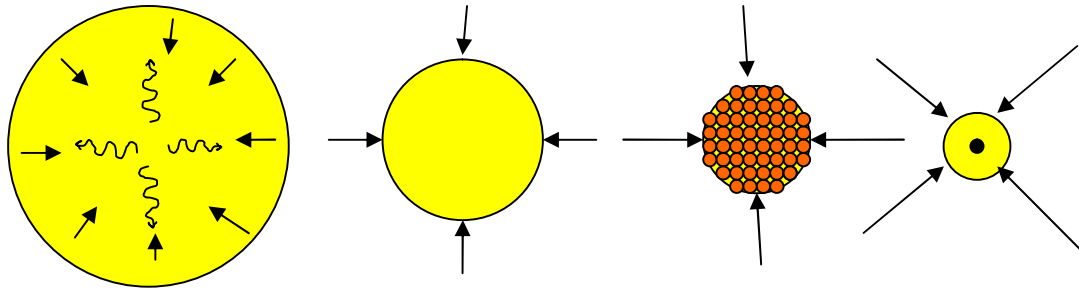


Masse	0,26 ... 1,5- M_S	1,5 ... 5- M_S	> 5- M_S (typ. 10, max 100)
Durchmesser	1 x D_S	5 x	10 x D_S (auch 100 x)
Dichte	1,4 kg/dm ³	0,1 ..0,01 kg/dm ³	0,01 kg/dm ³
Ende	Weißer Zwerg	Neutronenstern	Schwarzes Loch
Durchmesser	11.000 km (1/100 D_S)	20 km	D_{Ereignis} 30 km
Dichte	$10^6 \dots 10^9 \text{ kg/dm}^3$	$10^{13} \dots 10^{15} \text{ kg/dm}^3$	∞ (ART)

Man erkennt, dass die Dichte entscheidend dafür ist, ob ein Stern als Weißer Zwerg, Neutronenstern oder Schwarzes Loch endet. Sie steigt mit den Gravitationskräften und diese sind wiederum von der Masse der Sterne abhängig. Um sich die Eigenschaften von Schwarzen Löchern besser vorstellen zu können, machen wir ein Gedankenexperiment. Wir nehmen einen Stern, in diesem Fall unsere Sonne, und beginnen sie durch äußere Kräfte zusammen zu drücken. Der Druck wird dabei jeweils als kurzer Impuls mit enormen Kräften ähnlich einer Implosion ausgeübt. Mit steigendem Druck entsteht

- zunächst ein Weißer Zwerg,
- dann ein Neutronenstern und
- schließlich ein Schwarzes Loch.

Der Durchmesser verringert sich dabei von 1,4 Millionen km auf 6 km. Beim Neutronenstern entspricht die Dichte bereits der Dichte der Atomkerne, d. h. die Kerne befinden sich in etwa dicht nebeneinander. Bei der weiteren Druckerhöhung passiert etwas Erstaunliches: Sobald der Ereignishorizont erreicht ist, verschwindet die Materie wie das Wasser in einem Abfluss, die Masse bleibt jedoch erhalten.



Stern (Sonne)	Weißer Zwerg	Neutronenstern	Schwarzes Loch
1.400.000 km	10.000 km	20 km	6 km
Gasdruck durch Temperatur von innen = Gravitationsdruck von außen	Temperaturbewegung wird unterdrückt, entartetes Gas	Elektronen werden in die Protonen hineingepresst = Neutronen	Materie verschwindet hinter dem Ereignishorizont

Schwarze Löcher haben folglich folgende Eigenschaften:

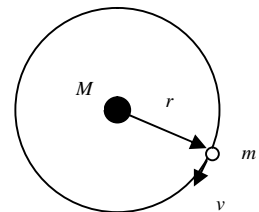
- Bei der Entstehung verliert das Objekt alle Eigenschaften bis auf seine Masse (meistens ist noch ein Drehimpuls vorhanden)
- Die Dichte wird unendlich, die Zeit bleibt stehen (entsprechend der Allgemeinen Relativitätstheorie). Dieses ist nach momentanem Wissen nicht erklärbar und daher eine Singularität.
- Aus der Ferne verhält sich ein Schwarzes Loch gravitativ genau so wie ein Stern mit gleicher Masse.
- Der Ereignishorizont ist nicht die Oberfläche des Schwarzen Loches.
- Ein Schwarzes Loch kann sich nicht teilen.

2. Wo sind schwarze Löcher?

Da sie verhältnismäßig klein und schwarz sind, ist es so, als wollte man eine schwarze Katze im Kohlenkeller suchen. Die Folge ist, dass sie nur indirekt z. B. durch Beobachtung von Objekten, die Schwarze Löcher umkreisen, nachgewiesen werden können. Dabei werden die Massen von Schwarzen Löchern bis heute mithilfe der Keplerschen Gesetze bzw. der klassischen Mechanik nach Newton berechnet.

Zum Beispiel kann die Masse bestimmt werden, wenn die Geschwindigkeit und der Abstand eines umlaufenden Körpers bekannt sind, entsprechend

$$M = \frac{r \cdot v^2}{G} \quad (M \gg m)$$



Erleichternd wirkt sich bei der Suche aus, dass Schwarze Löcher, wenn sie von Materie umgeben sind, mit dieser Materie eine starke Strahlung auslösen.

Dadurch wurde man 1972 auf einen Riesenstern im Schwan aufmerksam, der mit 75 km/s ein unsichtbares Objekt umkreist, wobei eine starke Röntgenstrahlung ausgesandt wird. Diese Quelle wurde daher Cygnus X-1 genannt.

Es handelt sich dabei um ein Doppelsternsystem mit dem Riesenstern HD 226868 mit ca. 22 Sonnenmassen (13 mag), dessen Partner 10 Sonnenmassen hat. Dieser Partner ist ein Schwarzes Loch, welches mit Materie vom Riesenstern gefüttert wird, wobei durch die hohen Geschwindigkeiten der zum SL stürzende Massen u. a.

Röntgenstrahlung ausgesandt wird (s. auch nebenstehendes Bild von der ESA).

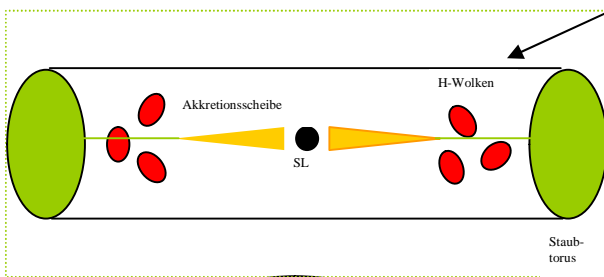
Schwarze Löcher dieser Art, die aus einem Stern mit großer Masse entstanden sind, bezeichnet man als stellare Schwarze Löcher. Sie haben mindestens 3 Sonnenmassen und maximal ca. 100 Sonnenmassen. Neben den stellaren Schwarzen Löchern gibt es noch mittelschwere, schwere und supermassereiche Schwarze Löcher. Sie sind in den Zentren von Galaxien und auch Kugelsternhaufen zu finden.



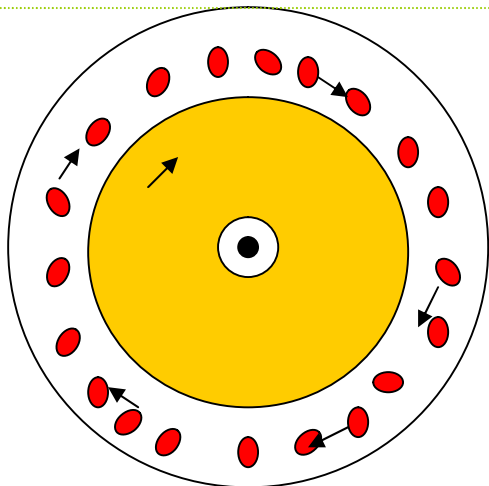
Quelle: ESA

3. Schwarze Löcher als Motore für extrem starke Strahlungsenergie

Mitte bis Ende des 20. Jahrhunderts stellte man fest, dass es Objekte gibt, die in allen Wellenlängenbereichen strahlen, also von der Radiostrahlung bis hin zur Röntgen- und Gammastrahlung. Bei einigen Galaxien kommen diese Strahlen aus dem Zentrum und man bezeichnete diese Zentren als „Aktive Galaktische Kerne“ (AGN). Die Galaxien selbst nannte man bei starker Radiostrahlung Radiogalaxien und sonst nach ihrem Entdecker Seyfertgalaxien. Außerdem wurde diese Strahlung noch bei sog. Quasaren entdeckt, wobei man heute weiß, dass das auch Galaxien mit AGNs sind. Die Stärke dieser Strahlung konnte man sich auch mit Kernverschmelzungsprozessen wie bei den Sternen nicht erklären. Inzwischen wissen wir, dass diese Energien frei werden, wenn massereiche Schwarze Löcher (Millionen bis Milliarden Sonnenmassen) mit Materie „gefüttert“ werden. Die Materie bildet eine sogenannte Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch, diese rotiert mit unterschiedlichen und in der Nähe des Schwarzen Loches extrem hohen Geschwindigkeiten, wodurch durch Reibungseffekte sehr hohe Temperaturen entstehen. Elektronen und Ionen werden voneinander getrennt und es entsteht aufgrund von elektrischen Strömen auch nichtthermische Strahlung wie z. B. Synchrotronstrahlung. Ein Teil der Materie verschwindet im Schwarzen Loch, ein Teil wird direkt entsprechend $E = m \cdot c^2$ in Strahlungsenergie umgewandelt.



Dieses ist der effizienteste Prozess, um Gravitationsenergie in Strahlungsenergie umzuwandeln (10% bis 40% gegenüber 0,7% bei der Kernfusion). Die nebenstehenden Zeichnungen zeigen schematisch einen AGN. Das Schwarze Loch wird von der Akkretionsscheibe umkreist, diese erhält weitere Materie vom Staubtorus. Dazwischen befinden sich Gaswolken vorwiegend aus H, die das Schwarze Loch mit Geschwindigkeiten von ca.



1000 km/s umkreisen. Der Staubtorus ist in der Draufsicht nicht dargestellt. Die Intensität der Strahlung ist nicht konstant, es gibt unregelmäßige Ausbrüche.

Schwarze Löcher verursachen nur dann diese Strahlungsenergie, wenn genug Materie um sie herum vorhanden ist.

Man geht davon aus, dass alle Galaxien als Kern ein Schwarzes Loch haben, aber nur die oben beschriebenen haben diese Aktivität.

Schließlich soll ein Verfahren beschrieben werden, wie man heute aus weit entfernten Seyfertgalaxien nur durch Aufnahmen des Spektrums die Masse des Schwarzen Loches mit der Formel auf der vorherigen Seite berechnen kann.

Voraussetzung ist, dass der Blickwinkel in die Galaxie dem Pfeil in der obigen Zeichnung entspricht. Als Spektrum der gesamten Galaxie erhält man die starke Intensität der Strahlung des AGNs über den gesamten Wellenlängenbereich. Außerdem strahlen die H – Wolken, es sind die H_{α} und H_{β} als verbreiterte Linien sichtbar. Die Linien sind durch die hohe Geschwindigkeit breiter (Dopplereffekt) und daraus kann die Geschwindigkeit der Wolken bestimmt werden. Z. B. 1300 km/s. Nun benötigt man nur noch den Abstand R vom Zentrum bis zu den Gaswolken. Den erhält man nach dem Echoverfahren. Man nimmt die Spektren mehrmals für einen längeren Zeitraum (einige Wochen) auf. Die Strahlung ist nicht konstant und daher wird sie sich zu einem bestimmten Zeitpunkt verändern, wir gehen von einer Erhöhung der Intensität aus. Die Strahlung der H – Wolken steigt erst später an, da die Wolken ja durch die Strahlung aus dem Zentrum angeregt werden und dieser Weg erst zurückgelegt werden muss. Über die Zeitdifferenz erhält man mit $R = c \cdot \Delta t$ den Abstand, z. B. bei 32 Tagen $R = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 32 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s} = 8,3 \cdot 10^{14} \text{ m}$. Das ergibt für die Masse

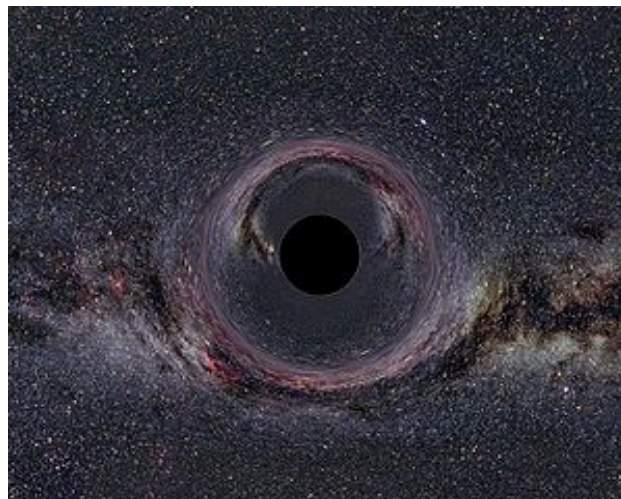
$$M = \frac{r \cdot v^2}{G} = \frac{8,3 \cdot 10^{14} \text{ m} \cdot (1,3 \cdot 10^6)^2 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}}{6,674 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}} = 2,1 \cdot 10^{37} \text{ kg} = \underline{\underline{10,5 \text{ _Millionen_ Sonnenmassen}}}$$

4. Näher an ein Schwarzes Loch

Sind wir weit genug von einem Schwarzen Loch entfernt, dann hat das gravitativ keine Auswirkungen. Wäre die Sonne ein Schwarzes Loch mit einer Sonnenmasse, dann würde sich an der Erdbewegung um sie nichts ändern.

Damit wir die Reise zum Schwarzen Loch möglichst unbeschadet überstehen, wählen wir ein Stellares Loch mit 10 Sonnenmassen ohne besonders starke Strahlung aufgrund einer umströmenden Masse. Aus 150 Millionen km, also im Abstand zu unserer Sonne, ist von dem Schwarzen Loch noch nichts zu sehen, da es ja nur einen Durchmesser von 60 km hat. Allerdings würden wir die 10x größere Anziehungskraft gegenüber der Sonne schon deutlich spüren.

In 3000 km Entfernung sehen wir eine deutliche Verzerrung. Um nicht in das Schwarze Loch hineingezogen zu werden, benötigen wir eine Beschleunigung in entgegengesetzter Richtung von ca 15 millionenfacher Erdbeschleunigung. Das Bild rechts oben zeigt das SL im Abstand von 600 km. Es ist jetzt eine 400 millionenfache Erdbeschleunigung erforderlich. Die Verzerrungen kommen durch Lichtablenkungen des Schwarzen Loches zustande. Bei weiterer Annäherung wird die Dunkelheit immer größer, die Sterne sind nicht mehr zu sehen. Wir werden mit enormer Geschwindigkeit in das Loch hineingezogen, aber leider wird unser Körper durch die Gezeitenkräfte vorher gedehnt und auseinandergerissen.



Quelle: Wikipedia

5. Erzeugung kleiner Schwarzer Löcher

Die erforderlichen hohen Drücke zur Erzeugung eines Schwarzen Loches kann man auch dadurch erzeugen, dass man Objekte mit hohen Geschwindigkeiten aufeinander prallen lässt. Im großen Hadronen-Beschleuniger beim Forschungszentrum Cern in Genf sind demnächst Zusammenstöße stark beschleunigter Teilchen geplant, dabei könnten auch kleine Schwarze Löcher entstehen. Könnten diese für uns gefährlich werden?

Nach einer noch nicht bestätigten Theorie von S. Hawking hätten diese nur eine kurze Lebenserwartung, da sie zerstrahlen. Gemäß dieser Theorie zerstrahlen auch die großen Schwarzen Löcher durch die sogenannte Hawking-Strahlung, jedoch sehr langsam. Die Löcher verdampfen, obwohl sie offensichtlich keine Teilchen abgeben. Wie funktioniert das?

Nach der Quantentheorie entstehen auch im Vakuum ständig Teilchen- Antiteilchen-Paare, die sich im nächsten Augenblick wieder vereinigen und damit verschwinden. Nach der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation ist dieses möglich. Jedes Teilchenpaar besteht aus einem Materieteilchen, z. B. einem Proton oder Elektron, und seinem Antiteilchen, also einem Antiproton oder Antielektron. Materie und Antimaterie vernichtet sich gegenseitig. Entsteht nun so ein Teilchenpaar dicht am Ereignishorizont dann kann es nach Hawking passieren, dass ein Teilchen von beiden in das Schwarze Loch fällt und das andere Teilchen nicht. Dieses wird abgestrahlt. Dabei wird dem Schwarzen Loch Energie entzogen und seine Masse wird kleiner. Da diese Strahlung sehr schwach ist (schwächer als die Hintergrundstrahlung), wurde sie noch nicht nachgewiesen. So hat man den Eindruck, als wenn das Schwarze Loch verdampft. Bei großen Schwarzen Löchern ist diese Verdampfungszeit in der Größenordnung des Alters des Weltalls, bei kleinen Schwarzen Löchern wie sie vielleicht im Beschleuniger erzeugt werden können, ist sie sehr kurz, sodass für uns keine Gefahr besteht.. Nun wissen wir ja nicht, ob diese Theorie stimmt; trotzdem werden wir versuchen Schwarze Löcher zu erzeugen. Auch wenn die Theorie nicht stimmt, besteht keine Gefahr, da wir davon ausgehen können, dass in unserer näheren Umgebung der Erde schon durch zufällige Zusammenstöße schneller Teilchen Schwarze Löcher entstanden sind. Hätten diese auffällige Auswirkungen, dann hätten wir das schon bemerkt. Abschließend sei gesagt, dass es vielleicht schon bald neuere Erkenntnisse zu Schwarzen Löchern gibt und vielleicht auch eine Theorie, die die Zustände hinter dem Ereignishorizont erklären kann.