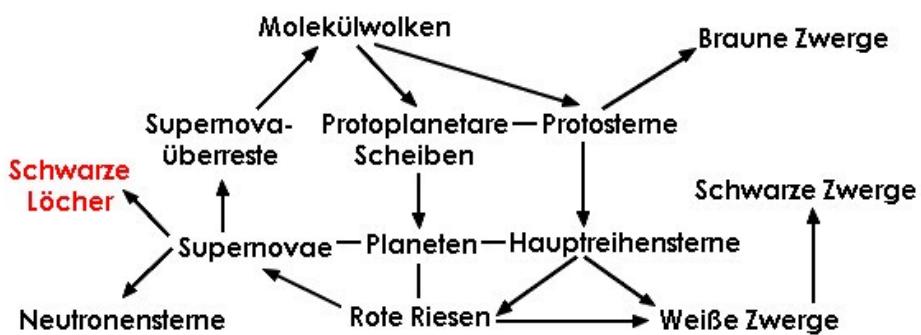


# Materiekreislauf

## Schwarze Löcher

**Grundlagen aus dem ersten Semester:**  
08-Sternarten und Sternentwicklung (Seite 17 - 18)



Schwarze Löcher sind Objekte, die so dicht sind, dass die zweite kosmische Geschwindigkeit höher als die Lichtgeschwindigkeit ist, Material also nicht durch Geschwindigkeitszunahme entkommen kann. Auch Licht kann auf diese Weise nicht entweichen und das Objekt erscheint uns vollkommen schwarz.

Die dafür notwendige Dichte ist dann erreicht, wenn sich die gesamte Masse innerhalb des Schwarzschildradius befindet. Die Formel für den Schwarzschildradius wurde bereits im Skriptum über die Relativitätstheorie hergeleitet:

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \quad (0.1)$$

Das ist extrem dicht: Die Erde würde dabei mit dieser Dichte nur 1cm groß sein, die Sonne 3km. Eine derart hohe Dichte kann erreicht werden, wenn ein roter Riese mehr als 3 Sonnenmassen hat und sein gesamtes Material zu Eisen fusioniert hat. Dann ist die Gravitation stark genug, um die Materie so dicht zusammen zu pressen.

## 1 Entdeckung

Jetzt kann man sich natürlich fragen, wie man ein schwarzes Loch überhaupt entdecken kann, wenn uns von dort kein Licht erreicht.

Schwarze Löcher erzeugen zwar durch ihre Gravitation Wellen in der Raumzeit, so genannte Gravitationswellen. Diese sind jedoch nur sehr schwach und daher nur bei

sehr massereichen schwarzen Löchern mit sehr großem Aufwand messbar.

Die viel gebräuchlichere Variante ist, dass man sich die Auswirkungen der Gravitation eines schwarzen Lochs auf die Objekte seiner Umgebung anschaut. Bei besonders massereichen schwarzen Löchern kann man beobachten, dass die Bahnen naher Sterne vom schwarzen Loch abgelenkt werden oder das dahinterliegende Objekte vom Gravitationslinseneffekt des schwarzen Lochs verzerrt wird.

Weniger massereiche schwarze Löcher kann man an Teilchenjets erkennen, die von der Massenakkretion eines schwarzen Lochs ausgelöst werden. Die Akkretion auf ein schwarzes Loch funktioniert, ähnlich wie bei Protosternen, Weißen Zwergen und Neutronensternen, ist jedoch aufgrund der großen Masse des schwarzen Lochs besonders stark: Die Reibung in der Akkretionsscheibe ist so stark, dass Temperaturen von  $10^7$  K entstehen, die durch die Akkretion ausgelösten Jets erreichen fast Lichtgeschwindigkeit.

Durch relativistische Effekte wird der genaue Vorgang physikalisch sehr komplex. Er wird „Blandford-Znajek-Prozess“ bezeichnet.

Wenn man so einen Jet sieht, stellt sich die Frage, ob er wirklich von einem schwarzen Loch und nicht etwa von einem Neutronenstern ausgelöst wird.

Am deutlichsten erkennt man ein schwarzes Loch an den Eigenschaften der Strahlung der akkretierten Materie. Um diese zu sehen, benötigt man jedoch ein hohes Auflösungsvermögen im Röntgen- und Gammabereich.

Bei von Neutronensternen akkretierter Masse endet die Strahlung mit der Verschmelzung der Materie mit dem Neutronenstern. Wenn die Masse hingegen von einem schwarzen Loch akkretiert wird, endet die Strahlung bereits am Ereignishorizont. Zuvor divergiert die Rotverschiebung gegen unendlich, weil die Fluchtgeschwindigkeit so hoch ist, dass nur die röthlichsten Lichtstrahlen entkommen können.

Die Strahlung der Jets kann man leichter beobachten, dabei kann man Alter und Masse jedoch nur abschätzen und deshalb nie mit völliger Sicherheit von einem schwarzen Loch ausgehen. Um überhaupt davon ausgehen zu können, muss es alt (damit die Kernfusion schon vorbei ist) und massereich (damit die Gravitation stark genug ist) sein.

Das Alter kann man aus dem Linienspektrum der Strahlung abschätzen. Wenn sich in diesem Spektrum hauptsächlich Eisenlinien befinden, deutet das darauf hin, dass die Kernfusion schon weit fortgeschritten ist und es sich um ein altes Objekt handelt. Die Masse kann man aus der Stärke des Jets abschätzen.

## 2 Beispiele

Das wohl bekannteste schwarze Loch ist Sagittarius A, ein supermassereiches schwarzes Loch, dass sich im Zentrum unserer Milchstraße befindet und deren Gravitation die gesamte Galaxie zusammenhält. Es hat 4,3 Millionen Sonnenmassen und ist damit millionenfach schwerer, als ein durchschnittliches schwarzes Loch.

Neben Sagittarius A wurden noch zahlreiche andere schwarze Löcher in der Milchstraße durch Beobachtungen im optischen, Röntgen- und Gammabereich entdeckt.

### Entdeckungen im optischen Bereich

Ein Beispiel für ein schwarzes Loch, das im optischen Bereich entdeckt worden ist, ist MACHO-96-BLG5. Es befindet sich in einer Entfernung von 2kpc und hat mindestens  $6M_{\odot}$ . Man konnte es deshalb entdecken, weil es einen Gravitationslinseneffekt ausgelöst hat.

### Entdeckungen im Röntgenbereich

Die meisten schwarzen Löcher wurden im Röntgenbereich entdeckt, weil in diesem Bereich die Teilchenjets strahlen. Da in Mehrfachsternsystemen mehr Masse akkretiert wird und daher mehr Teilchenjets auftreten, befinden sich die meisten schwarzen Löcher, die im Röntgenbereich entdeckt werden in einem solchen Mehrfachsternsystem.

XTE J1118+480 ist ein schwarzes Loch mit 6,5 Sonnenmassen. Es befindet sich in einem Doppelsternsystem mit einem K7-Stern. Das besondere an diesem schwarzen Loch ist, dass es sich relativ zum galaktischen Potential bewegt, es muss also zusätzlich von der Gravitation der Galaxie von einer weiteren Kraft bewegt worden sein.

Auch Cyg X-1 ist ein schwarzes Loch in einem Doppelsternsystem. Das besondere daran ist, dass das schwarze Loch leichter als sein Begleitstern ist (Es wiegt  $10M_{\odot}$ , sein Begleitstern  $20M_{\odot}$ ). Trotzdem ist das nur  $10M_{\odot}$  schwere schwarze Loch schon mit der Kernfusion fertig, der  $20M_{\odot}$  schwere Begleiter noch nicht. Sie umkreisen sich gegenseitig mit einer Periodendauer von 5,6 Tagen.

### Entdeckungen im Gammabereich

GRS 1915+105 (auch V1487 Aquillae genannt) ist mehr als  $10M_{\odot}$  schwer und damit nach Sagittarius A das schwerste in der Milchstraße entdeckte schwarze Loch. Dementsprechend schnell ist auch der Jet: Seine Geschwindigkeit beträgt mehr als 90% der Lichtgeschwindigkeit, sodass seine Strahlung in den Gammabereich verschoben wird.