

Heiße Scheiben um Schwarze Löcher

Reiner Hennig

Schwarze Löcher können aus großen Sternen oder im Zentrum von Galaxien entstehen. In ihrer unmittelbaren Nachbarschaft ist die Anziehungskraft so stark, dass nichts mehr das Schwarze Loch verlassen kann, auch nicht das Licht. Deshalb ist ein Schwarzes Loch vollkommen dunkel. Staub und Gas, die von einem Schwarzen Loch angezogen werden, umkreisen in einer riesigen flachen Scheibe das Schwarze Loch, bis sie dann von ihm verschluckt werden. Dabei werden sie zum Teil sehr heiß und leuchten hell. Wir wollen uns damit beschäftigen, wie solche Scheiben entstehen und warum sie so stark leuchten.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Astronomie	Diffuses Medium (Gas und Staub), Schwarze Löcher, Sterne, Galaxien	Schwarze Löcher, Akkretionsscheiben, Zentralbewegung
Physik	Mechanik, Wärmelehre	Gravitation, Radialbeschleunigung, Leistung, Drehimpuls, Glühfarben, Gesamtstrahlungsleistung
Verknüpfungen	Astro / Ph / Ma	Oberfläche eines Zylinders

Schwarze Löcher

Wird eine Masse M auf einen winzigen Raum zusammengedrückt, so wirkt in ihrem Umfeld eine besonders starke Anziehungskraft. Im Abstand r von dieser Masse wirkt auf eine kleine Masse m die Kraft $F_{\text{grav}} = G M m / r^2$ ($G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2$). Wenn sich die Masse m mit der Geschwindigkeit v auf eine Kreisbahn um M bewegen soll, ist die Kraft $F_{\text{bahn}} = m v^2 / r$ erforderlich. Sie muss genau so groß sein wie die Anziehungskraft F_{grav} . Daraus lässt sich ausrechnen, wie der Abstand r mit der Geschwindigkeit v zusammenhängt: $r = G M / v^2$. Wird diese Geschwindigkeit geringer, stürzt die Masse m nach innen. In welchem Abstand r_s muss sich ein Körper mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 299\,792 \text{ km / s}$ bewegen, um sich auf einer Kreisbahn halten zu können? Berechne diesen Abstand r_s (den Schwarzschildradius) für die Sonne ($M = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$) und für das Zentrum der Milchstraße ($M = 4 \cdot 10^{36} \text{ kg}$). Alle Körper innerhalb dieses Bereiches und auch das Licht bewegen sich nur noch nach innen. Deshalb kann von dort kein Licht nach außen dringen, und das Schwarze Loch ist völlig dunkel.



Abbildung 1: Heiße Scheibe aus Gas und Staub um ein schwarzes Loch. © By NASA/JPL-Caltech - http://www.nasa.gov/mission_pages/nustar/multimedia/pia16695.html, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24906723>.

Beobachtung: Der Strudel um den Abfluss

Schwarze Löcher ziehen Materie an und verschlucken sie. Dabei geschieht etwas Ähnliches wie beim Ablauf des Wassers einer Badewanne durch den Abfluss. Fülle eine Badewanne bei geschlossenem Stöpsel so, dass über dem Abfluss einige Zentimeter Wasser stehen und ziehe dann den Stöpsel. Meist bewegt sich dabei das abfließende Wasser nicht direkt in den Abfluss, sondern umkreist ihn, möglicherweise mehrmals, bis es abläuft. Es bildet sich ein Wasserstrudel. Diese Bewegung des Wassers kann man sichtbar machen durch Dinge, die auf dem Wasser schwimmen, z.B. durch Seifenschaum oder durch Streichhölzer, die man in kleine Stücke zerbricht. Gas und Staub, die von einem Schwarzen Loch eingefangen werden, umkreisen in ähnlicher Weise das Schwarze Loch. Sie bilden dabei eine große flache Scheibe (Akkretionsscheibe).

Überlegungen zur Bewegung um ein Zentrum

Für einen Planeten mit der Masse m , der die Sonne im Abstand r mit der Geschwindigkeit v umkreist, gilt, wenn man die Reibung vernachlässigen kann: Auf seiner ganzen Bahn bleibt das Produkt $D = m \cdot r \cdot v$ (der Drehimpuls) immer gleich, auch wenn sich der Abstand r zur Sonne ändert. (v ist dabei derjenige Anteil der Geschwindigkeit, der senkrecht zu r steht).

Im Winter ist die Erde der Sonne um 1,7 % näher als im Frühjahr und Herbst, im Sommer 1,7 % weiter entfernt. Was bedeutet dies für die Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Bahn? Kommt die Erde dabei der Sonne auf Dauer näher oder nur vorübergehend?

Kommt die Erde der Sonne näher, verliert sie Lageenergie, wird aber dafür schneller, d. h. die Bewegungsenergie wird größer. Dieser Gewinn an Bewegungsenergie ermöglicht es der Erde, später wieder den alten Abstand zu erreichen. Auch bei jeder anderen Bewegung eines Körpers im Weltraum um ein Zentrum, z. B. bei der Bewegung von Mond und Erdsatelliten um die Erde, gilt der gleiche Zusammenhang zwischen v und r . Skizziere in einem Koordinatensystem mit den Achsen r und v , wie die Geschwindigkeit v dabei mit dem Abstand r zusammenhängt.

Der Einfluss der Reibung

Gas und Staub, die ein schwarzes Loch umkreisen, bewegen sich umso schneller, je näher sie dem Schwarzen Loch sind. Auf benachbarten Bahnen haben sie deshalb unterschiedliche Geschwindigkeiten und es wirkt zwischen ihnen die Reibung. Durch diese Reibung wird ein Teil der Bewegungsenergie umgewandelt in Wärme. So können Gas und Staub wärmer und langsamer werden. Was bedeutet die Abnahme der Geschwindigkeit für den Abstand zum Schwarzen Loch?

Warum leuchtet die Scheibe um das Schwarze Loch?

Jeder warme Körper sendet Strahlung und damit Energie aus. Wenn eine Oberfläche sehr gut strahlen kann, sind dies für jeden Quadratzentimeter 46 mW bei $300 \text{ K} = 26,85 \text{ °C}$. Diese Ausstrahlung erhöht sich sehr stark mit der Kelvin-Temperatur T : Bei Verdopplung von T , also von 300 K auf 600 K, ist die Abstrahlung 16 mal so groß. Wenn der Körper warm genug ist, kann man diese Strahlung sehen, man sagt dann, der Körper glüht. Wieviel Leistung strahlt eine Fläche von 1 cm^2 ab bei einer Temperatur von $T = 10000 \text{ K}$? Mit der Temperatur ändert sich auch die Farbe des ausgestrahlten Lichtes. Erkläre die Farben der Scheibe aus Gas und Staub. Welche Auswirkungen wird es haben, wenn die Materie, die das Schwarze Loch umkreist, schneller zum Schwarzen Loch gelangen kann?

Abschätzung der abgestrahlten Leistung für die Gas- und Staubscheibe um das Zentrum der Galaxie NGC 4258

Lincoln Greenhill und seine Mitarbeiter fanden heraus, dass das Schwarze Loch in der Galaxie NGC 4258 im Sternbild der Jagdhunde eine Gas- und Staubscheibe mit einem Durchmesser von 1,5 Lichtjahren besitzt. Schätze ab, wieviel Energie diese Scheibe pro Sekunde in den Weltraum abstrahlt.

Der Einfluss von Magnetfeldern auf die Gas- und Staubscheibe

Elektrisch geladene Teilchen, die sich bewegen, werden von einem Magnetfeld seitlich abgelenkt. Dies benutzt man z. B. in der Fernschröhre. Dort schreibt ein Strahl aus Elektronen das Bild auf den Bildschirm. Diese Elektronen werden gelenkt durch Magnetfelder, die von Spulen am Hals der Bildröhre erzeugt werden. Wenn das Magnetfeld genügend Raum hat, wie z. B. im Weltraum, werden ankommende geladene Teilchen gezwungen, sich auf einer Kreisbahn oder Spiralbahn um Feldlinien des Magnetfelds herum zu bewegen. Deshalb sind dort Magnetfeld und Materie aneinander gebunden. Drückt man Materie zur Seite, so muss auch das Magnetfeld ausweichen, allerdings benötigt man dazu mehr Kraft als zum Wegdrücken von Materie ohne Magnetfeld. Wie wird sich diese Kopplung von Materie und Magnetfeld auswirken, wenn Materie, die sich in einem größeren Magnetfeld befindet, in die Nähe eines Schwarzen Loches kommt?



Abbildung 2: Radiobeobachtungen der Akkretionsscheibe um das Zentrum von NGC 4258 (© Lincoln J. Greenhill et. al., Harvard CfA)

Die Lösungen werden in 4 Wochen als WiS!-Material abrufbar sein!

Zusatzmaterial

1) Farben

Temperatur T	Farbe eines glühenden Körpers
20 °C	Infrarot (nicht sichtbar)
700 °C	dunkelrot
850 °C	kirschrot
1100 °C	gelb
1300 °C	weiß

(nach: Greulich, Walter: Lexikon der Physik. Heidelberg 1999)

Sterne geben einen anderen Farbeindruck. Dort gilt:

Name des Sterns	Oberflächentemperatur	Farbe
Aldebaran	4300 K	rot
Sonne	5800 K	gelb
Sirius	9500 K	weiß
Spica	18000 K	bläulich

2) Bemerkung zum Schwarzschildradius

In der Nähe des Schwarzschildradius verhalten sich Raum und Zeit anders, als wir dies gewohnt sind; hier gilt die Allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein. Sie zeigt, dass ein Körper, der vom Zentrum einen geringeren Abstand hat, sich nur noch zum Zentrum hin bewegen kann, selbst wenn seine Bewegung nach außen gerichtet ist und mit Lichtgeschwindigkeit erfolgt. Der Schwarzschildradius wird auch in der Allgemeinen Relativitätstheorie genauso berechnet wie hier.