

Singularität (Astronomie)

Als **Singularität** bezeichnet man in Physik und Astronomie Zustände, bei denen die betrachteten Massen und die Raumzeit in einem einzigen Punkt (mathematisch) oder in einem nicht näher bekannten physikalischen Zustand sehr geringer Ausdehnung aber extrem hoher Dichte zusammen fallen.

Sie sind zunächst nur als mathematische Singularitäten formulierbar, wobei das entsprechende physikalische Gesetz nicht definiert, ungültig und ungeeignet ist, die Verhältnisse zu beschreiben. Man kann also vermutete Eigenschaften einer Singularität mathematisch angeben, weiß aber nicht, wie sie physikalisch wirklich beschaffen ist und woraus sie besteht. Eine unendlich kleine Ausdehnung (Punkt) eines physikalischen Objekts widerspricht der Alltagserfahrung. Singularitäten können aber auch nicht-punktförmig gedacht werden, wobei sich die Raumzeit soweit um das Objekt krümmt, dass Größenangaben nicht in ein sinnvolles Verhältnis zur Metrik des umgebenden Raumes gesetzt werden können.

Physikalische Größen werden durch physikalische Gesetze in Beziehung gesetzt. Dabei kann, bei Annäherung einer Größe an einen bestimmten Wert, eine andere Größe gegen unendlich streben, d.h. *singulär* werden.

Arten von Singularitäten

Es werden zwei Arten von Singularitäten unterschieden, echte oder intrinsische Singularitäten und Koordinatensingularitäten. Letztere lassen sich durch die Wahl eines geeigneten Koordinatensystems eliminieren, für *echte Singularitäten* ist dies nicht möglich, hier wird eine neue Theorie (physikalisches Gesetz) gebraucht.

Astrophysik und Kosmologie

In Astrophysik und Kosmologie wird der Begriff Singularität oft synonym für Schwarze Löcher oder in den Urknalltheorien für die *Anfangssingularität* benutzt. Die Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie sind in beiden Fällen die zugrundeliegenden physikalischen Gesetze. Für die Anfangssingularität gilt, dass in ihr Raum und Zeit nicht vorhanden sind und somit auch Angaben darüber, wie groß sie war oder wie lange sie bestand, sinnlos sind. Schwarzschild-Singularitäten lassen sich in Bezug zur umgebenden Raumzeit und durch Massenvergleiche definieren.

Schwarzschild war der erste, der eine Lösung (Äußere Schwarzschild-Lösung) für die Feldgleichungen anbieten konnte. Seine Lösung beschreibt in Wirklichkeit aber nicht-existierende, nicht-rotierende, d.h. statische Schwarze Löcher und wird im zentralen Punkt *singulär (Punktsingularität)*. Erst im Jahr 1963 fand der neuseeländische Mathematiker Roy Patrick Kerr eine weitere Lösung (Kerr-Lösung) für rotierende Schwarze Löcher, die in einem eindimensionalen Ring in der Äquatorebene *singulär* wird. Der Radius der *Ringsingularität* entspricht dem Kerr-Parameter.

Die Äußere Schwarzschild-Lösung ist ein Spezialfall der Kerr-Lösung (Kerr-Parameter „ $a = 0$ “) für maximal rotierende Schwarze Löcher, d.h. der Ereignishorizont rotiert mit Vakuumlichtgeschwindigkeit, wird „ $a = 1$ “ und die *Ringsingularität* liegt im

Ereignishorizont bei einem Gravitationsradius.

Die Urknalltheorien werden, im Gegensatz dazu, nicht in einem Punkt im Raum, sondern in einem Punkt der Zeit („ $t = 0$ “) *singulär*. Sie beschreiben also nicht den Urknall selbst, sondern nur die Entwicklung des Universums danach (ab einem Alter von ca. 10–43 Sekunden).

Die allgemeine Relativitätstheorie (Albert Einsteins Gravitationstheorie) ist eine "*klassische Theorie*", keine Quantentheorie, daher verliert sie auf sehr kleinen Längenskalen (Plancklänge) ihre Gültigkeit und es beginnt die Domäne einer Quantengravitation. Über den inneren Zustand oder den Aufbau von Singularitäten ist jedoch nur sehr wenig bekannt.

Die Größe des Schwarzschildradius beträgt für ein Schwarzes Loch von einer Sonnenmasse etwa 2,9 km, für ein Objekt von einer Erdmasse etwa 9 Millimeter.

Es ist ein weit verbreiteter Irrtum, dass das Gravitationsfeld eines Schwarzen Loches bzw. die von ihm hervorgerufene Krümmung von Raum und Zeit, bei üblichen Entfernungen von außerordentlich großer Stärke sei. Da sowohl Schwarze Löcher als auch Sterne von derselben Metrik beschrieben werden, würde sich am Gravitationsfeld im Sonnensystem nichts ändern, wenn man die Sonne durch ein Schwarzes Loch gleicher Masse ersetzt. Abgesehen vom Fehlen des Sonnenlichts wäre lediglich in unmittelbarer Umgebung des Schwarzen Loches (innerhalb des vorherigen Sonnenradius') ein enormer Zuwachs der Gravitationsbeschleunigung festzustellen.

Arten von Schwarzen Löchern

Man unterteilt Schwarze Löcher je nach der Art der Entstehung und aufgrund ihrer Masse in verschiedene Klassen:

Art	Masse	Größe
Supermassereiches Schwarzes Loch	$\sim 10.000 - 10^9 M_{\text{Sonne}}$	$\sim 0,001 - 10 \text{ AU}$
Mittelschweres Schwarzes Loch	$\sim 1000 M_{\text{Sonne}}$	$\sim 10^3 \text{ km}$ ($\sim R_{\text{Erde}}$)
Stellares Schwarzes Loch	$\sim 10 M_{\text{Sonne}}$	$\sim 30 \text{ km}$
Primordiales Schwarzes Loch	bis zu $\sim M_{\text{Mond}}$	bis zu $\sim 0,1 \text{ mm}$

Stellare Schwarze Löcher

Stellare Schwarze Löcher stellen den Endzustand der Entwicklung massereicher Sterne dar. Sterne, deren Anfangsmasse kleiner als acht Sonnenmassen ist, können nicht zu einem Schwarzen Loch werden. Sie beenden ihr Leben als vergleichsweise unspektakulär auskühlender Sternenrest (Weißer Zwerg). Sterne, deren Anfangsmasse acht Sonnenmassen übersteigt (etwa Blaue Riesen), durchlaufen am Ende ihres Lebens die höheren Stufen der Nukleosynthese bis zum Siliciumbrennen.

Sie explodieren dann in einer Kernkollaps-Supernova, wobei der übrig bleibende Sternenrest zu einem Schwarzen Loch kollabiert, sofern er noch mehr als 2,5 Sonnenmassen besitzt (Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Grenze). Ansonsten können Sterne bis zur fünfzehnfachen Sonnenmasse abhängig davon, wie viel Masse sie als Supernova

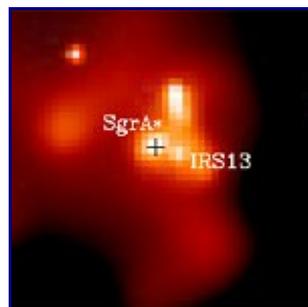
verlieren, auch als Neutronenstern enden, wenn die verbleibende Masse zwischen 1,5 und 2,5 Sonnenmassen liegt. Neutronensterne können sich – beispielsweise als kompakter Begleiter in einem Röntgendoppelstern – durch die Akkretion weiterer Materie auch im Nachhinein noch zu Schwarzen Löchern entwickeln.

Rekordhalter bei der Masse stellt aktuell das stellare Schwarze Loch in der Zwerggalaxie IC 10 im Sternbild Kassiopeia mit der 24- bis 33-fachen Sonnenmasse dar. Es ist Teil eines Doppelsternsystems. Das schwarze Loch wurde indirekt durch die in ihrer Stärke schwankende Röntgenstrahlung des begleitenden Sterns entdeckt, was ein Hinweis auf ein periodisch die Quelle verdeckendes Objekt sein kann. Berechnungen aus Daten des Satelliten Swift, sowie des Gemini-Teleskops auf Hawaii bestätigten die Vermutungen.

Mittelschwere Schwarze Löcher

Mittelschwere Schwarze Löcher entstehen möglicherweise in Folge von Sternenkollisionen und -verschmelzungen. Ihre Existenz ist noch nicht sicher erwiesen, allerdings veröffentlichten Forscher Anfang 2004 Ergebnisse einer Untersuchung von Nachbargalaxien mit dem Weltraumteleskop Chandra, in der sie Hinweise auf Mittelschwere Schwarze Löcher in sogenannten ultrahellen Röntgenquellen (ULX) fanden. Inzwischen gibt es allerdings aufgrund neuerer Beobachtungen mit dem VLT und dem Subaru-Teleskop starke Zweifel daran, dass ULX mittelschwere Schwarze Löcher sind. Ein neuer Kandidat für ein solches wird im Zentrum einer Zwerg-Seyfert-Galaxie vermutet. Wird in einem Röntgendoppelstern einer der Partner zu einem Schwarzen Loch, kann im weiteren Verlauf der Entwicklung sehr viel Masse vom leichteren Partner auf das entstandene Schwarze Loch abfließen. Die meisten Schwarzen Löcher schaffen es jedoch nicht, mehr als einige Sonnenmassen Material aus der Umgebung einzufangen. Welche Bedingungen für die mögliche Entstehung mittelschwerer Schwarzer Löcher notwendig sind, ist unklar. Als derzeit einzige Kandidaten für solche Objekte werden die Zentren der Kugelsternhaufen Omega Centauri in der Milchstrasse und G1 in der Andromeda Galaxie gewertet.

Supermassereiche Schwarze Löcher



Galaktisches Zentrum

Supermassereiche (auch *supermassiv* genannte) Schwarze Löcher können die millionen- bis milliardenfache Sonnenmasse haben und befinden sich vermutlich in den Zentren der meisten Galaxien. Wie sie entstanden sind und wie ihre Entstehung mit der Entwicklung der Galaxien zusammenhängt, ist Gegenstand aktueller Forschung.

So wird hinter der starken Radioquelle Sagittarius A* (kurz Sgr A*) im Zentrum der

Milchstraße ein supermassives Schwarzes Loch von 4,3 Millionen Sonnenmassen vermutet. Vor wenigen Jahren lag die Massenabschätzung, die auf der Beobachtung von Gaswolken (z.B. der sogenannten Mini-Spirale) fußte, noch bei etwa 2,7 Mio. Sonnenmassen. Dank verbesserter Auflösung und Empfindlichkeit der Teleskope konnte die Masse für das Schwarze Loch im Zentrum der Galaxis genauer angegeben werden, z.B. durch Analyse der Bahnkurven der sog. SO-Sterne, wobei die 0 lediglich bedeutet, dass die Umlaufbahnen der Sterne unter einem relativen Winkel von einer Bogensekunde zu beobachten sind (entsprechendes gilt für die S1, S2 Sterne usw.).

Natarian und Treister haben dargelegt, dass ein oberes Massenlimit für Schwarze Löcher existiert und bei etwa 10 Milliarden Sonnenmassen liegen muss. Die Begründung liegt, anschaulich erklärt, darin, dass die hineinstürzende Materie durch die Gravitationskraft eines solchen supermassiven Schwarzen Lochs derart beschleunigt wird, dass sich ein stabiler Orbit außerhalb des Schwarzschild-Radius ergibt. Zusätzlich wirken auch die elektromagnetische Strahlung und die „Materiewinde“, die von der Materie in der Akkretionsscheibe ausgestrahlt werden, als Widerstand gegen weiter einfallende Materie, so dass sich letztlich ein Gleichgewicht zwischen einfallender und abgestoßener Materie einstellt.

2008 hat ein schweizer Team der Technische Hochschule Lausanne (EPFL) um Alexander Eisenbrod ein solches energiereiches Ringgebilde um einen 10 Milliarden Lichtjahre entfernten Quasar, dem Einsteinkreuz im Sternbild Pegasus, am VLT beobachtet und damit die Theorie der supermassereichen Löcher sehr gut bestätigt.

Primordiale Schwarze Löcher

Anfang der 1970er Jahre stellte Stephen W. Hawking als Erster die Vermutung auf, neben den durch Supernovae entstandenen Schwarzen Löchern könnte es auch so genannte primordiale Schwarze Löcher geben. Das sind Schwarze Löcher, die sich bereits im Urknall in Raumbereichen gebildet haben, in denen die lokale Massen- und Energiedichte genügend hoch war (rechnet man die ständig abnehmende Materiedichte im Universum zurück, so findet man, dass sie in der ersten tausendstel Sekunde nach dem Urknall die Dichte des Atomkerns überstieg). Auch der Einfluss von Schwankungen der gleichmäßigen Dichteverteilung (siehe hierzu kosmische Hintergrundstrahlung) im frühen Universum war für die Bildung von primordialen Schwarzen Löchern ausschlaggebend, ebenso die beschleunigte Expansion während der Inflationsphase nach dem Urknall. Damals könnten sich kleine Schwarze Löcher mit einer Masse von etwa 10^{12} Kilogramm gebildet haben. Seit Mitte der 1990er Jahre wird diskutiert, ob die kürzesten auf der Erde gemessenen Gammastrahlungsausbrüche von verstrahlenden primordialen Schwarzen Löchern stammen könnten, denn deren berechnete Lebensdauer liegt in der Größenordnung des Alters des heutigen Universums.

Aus seinen Überlegungen über kleine Schwarze Löcher folgerte Hawking im Jahre 1974 die Existenz der nach ihm benannten Hawking-Strahlung, dass also Schwarze Löcher Materie nicht nur schlucken, sondern auch wieder freisetzen können. Obwohl die Existenz von primordialen Schwarzen Löchern keineswegs gesichert ist, haben sich also allein aus hypothetischen Betrachtungen wertvolle neue Erkenntnisse im Bereich der Kosmologie, der Quantenphysik und der Relativitätstheorie ergeben.

Schwarze Mini-Löcher

Einigen so genannten Vereinheitlichenden Theorien zufolge, wie z.B. der Stringtheorie, könnte es bald möglich sein, extrem kurzlebige Schwarze Mini-Löcher im Labor (bzw. in Teilchenbeschleunigern) herzustellen.

Sollte es sich erweisen, dass dies tatsächlich so ist, so ist aber gleichzeitig davon auszugehen, dass sich diese Schwarzen Mini-Löcher ebenfalls bei Teilchenkollisionen von kosmischer Strahlung mit Molekülen in der Hochatmosphäre bilden (seit Milliarden Jahren) und daher keine Gefahr darstellen können.