

Monatsthema Juli 2020 Schwerkraftfallen im Universum

Die Schwerkraft ist uns allen im täglichen Leben geläufig. Gegenstände fallen zu Boden, sie bewirkt Stürze. Es strengt an, Stiegen zu steigen, Gepäck zu heben oder Berge zu erklimmen. Stets macht sich die Schwerkraft bemerkbar, die man auch Gravitation nennt. Der Begriff geht auf das lateinische Wort „gravis“ für schwer zurück. Die Gravitation hält auch die Gestirne in ihren Bahnen. Kaum zu glauben, dass sie die schwächste der vier Naturkräfte ist. Ihre Kopplungsstärke ist rund 40 Zehnerpotenzen schwächer als die Kernkraft, die Protonen und Neutronen in den Atomkernen zusammenhält. Und doch siegt sie letztendlich, wenn sie Materie zu exotischen Himmelskörpern kollabieren lässt, die man heute trefflich „Schwarze Löcher“ nennt.

Einem solchen Schwarzen Loch zu entrinnen, gelingt nichts und niemandem. Nicht einmal Licht kann einem solchen Gravitationsmonster entfliehen. Wer oder was in ein Schwarzes Loch stürzt, bleibt für immer in ihm gefangen. Nicht nur das: Selbst die Annäherung an ein solches Ungetüm führt zu ersten Konsequenzen. Ganze Sterne werden zerrissen, bevor sie durch die Schwerkraft in den Gravitationsstrudel auf Nimmerwiedersehen hineingesogen werden.

Kein Wunder, wenn Science-Fiction-Autoren durch diese Schwerkraftgiganten zu ihren Zukunftsromanen angeregt werden. Deren Fantasien scheinen keine Grenzen gesetzt. Einmal entrinnen Raumfahrer mit knapper Not gerade noch einer derartigen Schwerkraftfalle. Auch werden Schwarze Löcher als Tore zu Paralleluniversen beschrieben, dann wieder als Umsteigebahnhöfe für intergalaktische Reisen, wobei mittels eines Zeittunnels Entfernungen von Millionen Lichtjahren in kurzer Zeit zurückgelegt werden können. Ja, sogar Zeitreisen in die Vergangenheit oder Zukunft sollen Schwarze Löcher ermöglichen. Doch was sind fantasievolle Spekulationen und was sind harte Fakten?

Bereits im Jahr 1783 hat der Geologe und Astronom Reverend John Michell (1724-1793) in einem Vortrag vor der Royal Society in London vermutet, es könne „dunkle Sterne“ geben, deren Masse so gewaltig ist, dass die Entweichgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ist. Er ging von Newtons Korpuskulartheorie des Lichts aus. Bei Sternen mit 500-Fachem Sonnenradius und gleicher mittlerer Dichte wie die unserer Sonne, können die Korpuskeln (Teilchen) des Lichts die Oberfläche nicht mehr verlassen. Solche Sterne sind demnach unsichtbar. Sein Vortrag wurde in den *Philosophical Transactions* der Royal Society veröffentlicht.

Unabhängig von Michell hat der Himmelsmechaniker Pierre Simon de Laplace (1749-1827) in seinem Werk *Exposition du Système du Monde* geschrieben, es könne so schwere Sterne geben, denen selbst das Licht nicht entfliehen kann. Nach solchen dunklen Sternen wurde verständlicherweise nicht gesucht, obwohl schon Michell darauf hingewiesen hat, dass Objekte in der Nähe eines dunklen Sterns durch dessen Schwerkraft abgelenkt werden können. Wenn bei einem Doppelstern eine Komponente ein dunkler Stern ist, so könnte aus der Umlaufbewegung der leuchtenden Komponente auf die Existenz und die Masse der nicht sichtbaren Komponente geschlossen werden.

Bei extrem starken Gravitationsfeldern, die sogar Photonen (Lichtteilchen) gefangen halten, versagt die Newtonsche Gravitationstheorie. Hier muss eine moderne Gravitationstheorie angewandt werden, nämlich die Allgemeine Relativitätstheorie (ART), die Albert Einstein 1915 vorgestellt hat.

Schon wenige Monate nach Veröffentlichung der ART löste Karl Schwarzschild kurz vor seinem Tod 1916 die Einsteinschen Feldgleichungen für einfache Fälle. Dabei berechnete er auch den Radius einer vorgegebenen kugelförmigen Masse, bei der die Schwerebeschleunigung an der Kugeloberfläche so groß ist, dass die Entweichgeschwindigkeit gleich der Vakuumlichtgeschwindigkeit ($c = 299.793 \text{ km/s}$) wird. Zu Ehren von Karl Schwarzschild, einem der hervorragendsten und vielseitigsten Astrophysiker zu Beginn des 20. Jahrhunderts, nennt man ihn Schwarzschild-Radius. Insbesondere in der russischen Literatur wird auch die Bezeichnung „Gravitationsradius“ für den Schwarzschildradius benutzt.



Ein Schwarzes Loch vom Typ Schwarzschild (nichtrotierend) setzt sich aus einem Ereignishorizont und einer Singularität mit unendlich hoher Dichte zusammen. In der Realität existieren solche Schwarzen Löcher jedoch nicht.

Im Klammergriff der Gravitation

Sterne enden häufig als Weiße Zwerge, wenn ihre Kernfusion als Energielieferant im Innern erlischt. Weiße Zwerge können nur bis zu einer Massenobergrenze von knapp eineinhalb Sonnenmassen existieren. Über dieser Massengrenze besteht kein Gleichgewicht mehr zwischen der Schwerkraft und dem inneren Druck des entarteten Elektronengases. Massereichere Sterne stürzen, wenn sie ausgebrannt sind, zu Kugeln von durchschnittlich nur 30 Kilometer Durchmesser zusammen. Elektronen und Atomkerne werden zu einem superdichten Neutronenbrei ineinander gequetscht. Die Theorie der Neutronensterne wurde schon in den 1930er Jahren entwickelt und der erste Neutronenstern schließlich 1967 als Pulsar entdeckt. Sternzusammenbrüche zu Neutronensternen werden als Supernova-Erscheinungen beobachtet.

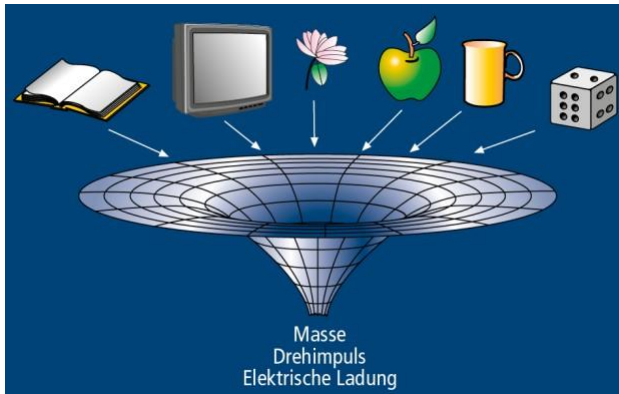
Auch für Neutronensterne gibt es eine obere Massengrenze. Hat der kollabierende Stern drei oder mehr Sonnenmassen, so kann der superdichte Neutronenbrei, besser das entartete Neutronengas, der Schwerkraft nicht mehr standhalten. Die Folge ist ein Gravitationskollaps, den nichts mehr aufhalten kann. Dies folgt aus der Speziellen und der Allgemeinen Relativitätstheorie. Der beim Zusammenbruch auftretende gigantische Druck ist pure Energie, die gemäß der bekannten Formel $E = m \cdot c^2$ zusätzlich gravitativ wirkt. Ab einer bestimmten Stärke fördert der wachsende Zentraldruck im Stern den Kollaps noch mehr als ihn zu bremsen oder gar aufzuhalten.

Die ausgebrannte Sternenmaterie kollabiert zu einem ausdehnungslosen Punkt mit unendlich hoher Dichte und unendlich starker Raumkrümmung, einer sogenannten Singularität. Der zusammenbrechende Stern wird Kollapsar genannt (von engl.: collapsing star). In der Realität gibt es allerdings keine Singularitäten. Hier versagt die ART. Da man nicht in das Schwarze Loch hineinsehen kann - der kosmische Zensor verbietet dies - weiß man nicht, was genau im Inneren passiert. Um die Vorgänge innerhalb des Ereignishorizontes zu beschreiben, wäre eine Quantentheorie der Gravitation erforderlich. Die gibt es jedoch noch nicht, vielversprechende Ansätze sind jedoch bereits gemacht.

Erreicht ein kollabierender Stern den Schwarzschildradius, so fallen seine Photonen (Lichtquanten) auf ihn zurück wie hochgeworfene Steine. Genauer: Nichts kann dem Schwerfeld eines Kollapsars entfliehen, nicht einmal Licht. Da keine elektromagnetische Strahlung den Kollapsar verlassen kann, bleibt er unsichtbar.

Die Bezeichnung Black Hole (engl., Schwarzes Loch) wurde erst im Jahr 1968 von John Archibald Wheeler (1911 - 2008), Nachfolger von Albert Einstein am Lehrstuhl für Physik in Princeton, New Jersey (USA) geprägt. Wheeler selbst erzählte, bei einem seiner Vorträge über Kollapsare hätte ein Zuhörer gerufen: „That's like a black hole.“ Wheeler fand die Bezeichnung zutreffend und benutzte sie fortan. Denn alles, was in ein Black Hole hineinstürzt, ist auf Nimmerwiedersehen verschwunden. Nichts, keine Information dringt je nach außen. Die Natur hat hier einen strengen kosmischen Zensor erschaffen.

Beim Sturz durch den Ereignishorizont gehen alle Strukturen der Materie verloren. Sogar Magnetfelder verschwinden, die Entropie erreicht ein Maximum. Wheeler meinte deshalb: „Schwarze Löcher haben keine Haare“ (no-hair theorem).



No-hair Theorem - Schwarze Löcher haben keine Haare. Alle Strukturen werden beim Sturz in ein Schwarzes Loch zerstört, alle Informationen gehen verloren. Nur drei Eigenschaften verbleiben: Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung.

Die Oberfläche eines Schwarzen Loches, der Ereignishorizont (er ist eine Fläche und keine Linie) bildet für ein einstürzendes Objekt keine Barriere. Denn die Oberfläche ist weder fest noch flüssig oder gasförmig. Nichts hemmt oder bremst einen Sturz durch den Ereignishorizont, der schlicht leer ist.

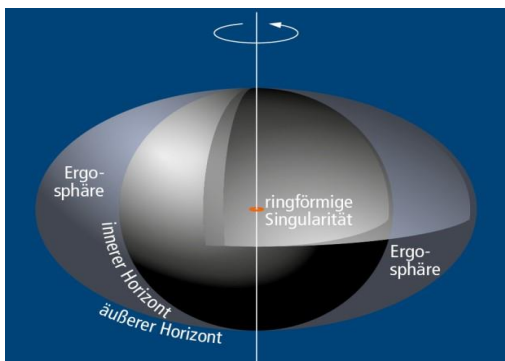
Nur drei physikalische Parameter beschreiben ein Schwarzes Loch vollständig: Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung. Da die Materie im Weltall weitestgehend elektrisch neutral ist, gibt es wohl keine elektrisch geladenen Schwarzen Löcher. Sterne sind nicht elektrisch geladen. Sie sind nach außen elektrisch neutral, da die Zahl der positiv geladenen Elementarteilchen (Protonen und Positronen) der Zahl der negativ geladenen Elektronen entspricht.

Rotierendes Black Hole mit Wurmloch

Schwarzschild hat die Metrik des Raumes in der Umgebung eines nicht rotierenden Schwarzen Loches beschrieben. In der Natur gibt es allerdings keine Schwarzen Löcher mit einer Schwarzschild-Metrik. Denn alle Körper im Weltall besitzen einen mehr oder minder großen Drehimpuls. Monde, Planeten, Asteroiden, Sonne und andere Sterne, Galaxien - sie alle rotieren.

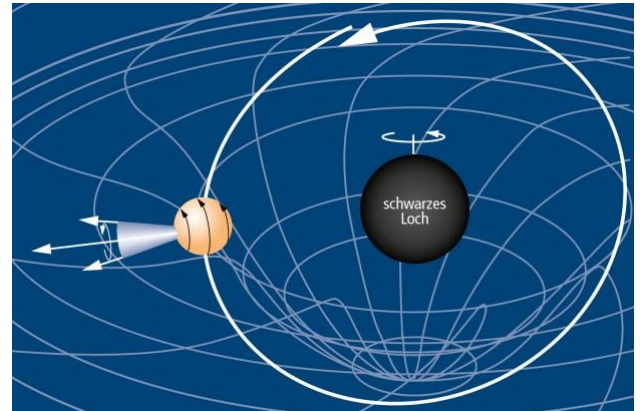
Kollabiert ein massereicher Stern zu einem Black Hole, so bleibt der Drehimpuls erhalten. Schrumpft ein Stern, so verkleinert sich sein Trägheitsmoment. Da der Drehimpuls das Produkt aus Trägheitsmoment mal Winkelgeschwindigkeit ist, so wächst die Winkelgeschwindigkeit an, wenn das Trägheitsmoment kleiner wird. Denn der Drehimpuls bleibt konstant, wenn keine äußere Kraft auf den Stern oder einen sonstigen Körper einwirkt. Unsere Sonne dreht sich in 25,4 Tagen einmal um ihre Achse. Würde sie zu einem Schwarzen Loch von nur sechs Kilometer Durchmesser kollabieren, so würde ihre Rotationsgeschwindigkeit enorm anwachsen. Ein Punkt am Sonnenäquator würde mit fast 463.000 km/s herumschweben. Dies ist mehr als die eineinhalbfache Lichtgeschwindigkeit und damit unmöglich. Beim Kollaps muss daher ein Teil der Rotationsenergie bzw. des Drehimpuls abgeführt werden, beispielsweise durch Abspaltung von Ringen oder Abstrahlung von Gravitationswellen. Kollabierte die Sonne zu einem Schwarzen Loch, so würde sie sich 16.000-mal pro Sekunde drehen, eine beachtliche Rotationsfrequenz. Die jetzige lineare Rotationsgeschwindigkeit beträgt zwei Kilometer pro Sekunde am Sonnenäquator.

Erst 1964 berechnete der neuseeländische Mathematiker Roy Kerr die Metrik in der Umgebung eines rotierenden Schwarzen Loches. Brandon Carter kalkulierte im gleichen Jahr den Kollaps eines rotierenden Black Holes.



Rotierende Schwarze Löcher haben zwei Horizonte: Den inneren, kugelförmigen Ereignishorizont und einen äußeren, ellipsoidischen Horizont, der die Ergosphäre umspannt. Die Singularität entartet zu einem Ring.

Rotierende Schwarze Löcher haben seltsame Eigenschaften. Sie reißen unter anderem den umgebenden Raum mit. Ein rotierendes Black Hole erzeugt einen wirbelartigen Strudel um sich, ein Ergebnis der ART (Lense-Thirring-Effekt). Einen leeren Raum kann man nicht rotieren sehen, aber man kann ihn spüren. In der Nähe eines schnell rotierenden Schwarzen Loches hätte man das Gefühl, auf einem drehenden Karussell zu sitzen. Manchem würde schwindelig werden. Die auftretende Zentrifugalkraft würde uns paradoxerweise nicht vom Schwarzen Loch wegtreiben, sondern im Gegenteil zu ihm hineinziehen. Das lokale Inertialsystem eines rotierenden Black Holes dreht sich relativ zur globalen Raumstruktur, dem Inertialsystem des großskaligen intergalaktischen Raumes. Der englische Fachbegriff lautet „Frame dragging“. Bei Himmelskörpern wie Planeten ist dieser Effekt winzig klein. So wurde mit dem Erdsatelliten Gravity Probe B eine Raumdehnung von lediglich fünf Hunderttausendstel Bogensekunden ($4,819758 \times 10^{-5}$) pro Umlauf von 97,5 Minuten gemessen.



Der "Frame-Dragging-Effekt": Ein rotierendes Black Hole reißt den äußeren, leeren Raum mit. Ein Kegel beginnt zu präzedieren.

Bei dem Neutronendoppelstern PSR 1913+16 (Hulse-Taylor-Pulsar) im Sternbild Adler konnte dieser Lense-Thirring-Effekt recht genau nachgewiesen werden.

Bei einem rotierenden Schwarzen Loch bilden sich zwei Horizonte. Der innere Horizont umschließt einen sphärischen Raum. Er ist der eigentliche Ereignishorizont, innerhalb dem ein Entfliehen unmöglich ist. Der äußere Horizont hat die Form eines Ellipsoides. Damit sind rotierende Black Holes nicht mehr kugelsymmetrisch, sondern besitzen eine ausgezeichnete Richtung, nämlich die der Drehachse. Der Raum zwischen innerem und äußerem Horizont wird Ergosphäre genannt. Aus diesem Bereich kann ein Körper dem Schwarzen Loch gegebenenfalls wieder entfliehen und dabei sogar beschleunigt werden, indem er ihm Rotationsenergie entzieht.

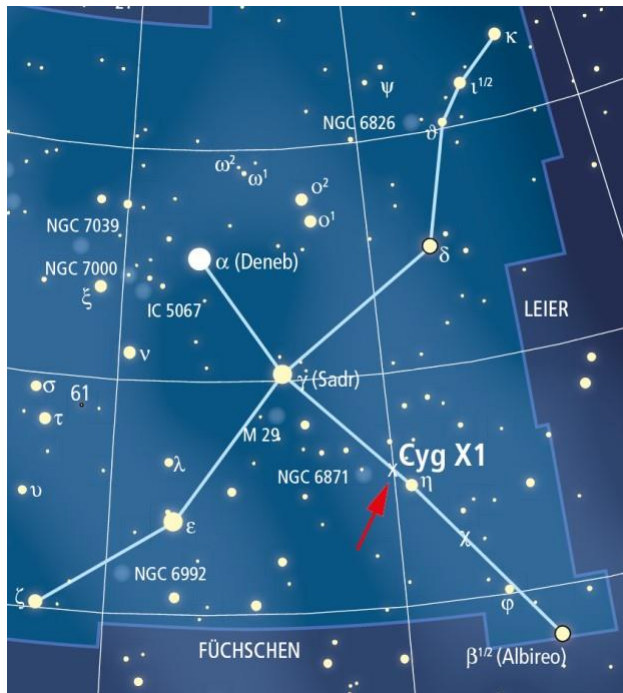
Ein rotierendes Black Hole hat im Zentrum keine punktförmige, sondern eine ringförmige Singularität. Sie ist gewissermaßen ein Tor in eine andere Welt. Wheeler nannte diese ringförmige Singularität „wormhole“ (engl., Wurmloch). Dem mathematischen Formalismus nach läuft die Zeit in diesem Anti-Universum rückwärts. Eine Reise in die Vergangenheit ist dennoch nicht möglich. Denn nach dem Keine-Haare-Theorem gehen alle Strukturen im Schwarzen Loch verloren. Der kosmische Zensor würde alle Erinnerungen löschen. Abgesehen davon sind ringförmige Singularitäten winzig klein, nämlich in der Größenordnung der Planck-Skala von 10^{-33} cm Länge. Nicht einmal ein Proton würde hindurchpassen, denn es ist 20 Zehnerpotenzen größer als solch ein Wurmloch.

Auch käme man gar nicht unbeschädigt in ein stellares Schwarzes Loch hinein. Denn einem Astronauten droht noch vor Erreichen des Ereignishorizonts die Spaghettisierung. Die Potentialdifferenz in der unmittelbaren Nähe des Ereignishorizontes ist so groß, dass die Gezeitenkräfte den Astronauten zerreißen würden und er in Form einer langen Kette von Elementarteilchen in das Schwarze Loch schlüpfen würde.

Gefahr für Begleitsterne

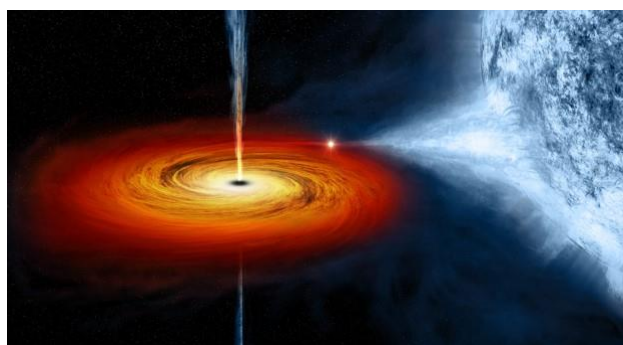
Sind nun Schwarze Löcher infolge ihres enormen Gravitationspotenzials am Ereignishorizont Schwerkräftfallen im Universum? Ja und Nein! Die Vorstellung, ein Schwarzes Loch würde wie ein Staubsauger alles unerbittlich anziehen und verschlingen, ist falsch. Würde die Sonne zu einem Black Hole kollabieren, so würde sich ihre Schwerkraftwirkung auf die sie umkreisenden Planeten nicht ändern. Die Erde bliebe in ihrer Bahn, allerdings würde es dunkel und kalt!

Und dennoch: Für manche Sterne in der Umgebung eines Schwarzen Loches führte und führt diese Nachbarschaft zu deren tragischem Ende. Für solche Sonnen sind Black Holes Schwerkraftfallen, denen sie nicht enttrinnen können.



Die Position von Cygnus X-1 im Sternbild Schwan nahe η Cygni.

Zunächst einmal ermöglichen Doppelsterne mit einem Black Hole als zweite Komponente überhaupt erst die direkte Beobachtung einer solchen Schwerkraftfalle. Die stärkste Röntgenquelle im Sternbild Schwan, Cygnus X-1, entpuppte sich 1974 als Binärsystem mit einem Black Hole. Von einem heißen, blauen Riesenstern (HDE 226 868, Spektraltyp O9 Ia) mit 33 Sonnenmassen - ein unscheinbares Lichtpünktchen 9. Größenklasse - stürzt Materie auf das begleitende Schwarze Loch von 16 Sonnenmassen. Dabei bildet die Materie eine sogenannte Akkretionsscheibe um das Black Hole, in der sich die Materie in den Schwerkraftstrudel des Schwarzen Loches hinein spiralisiert. Dabei erhitzt sich die Akkretionsscheibe auf einige Millionen Grad, was eine intensive Röntgenstrahlung zur Folge hat. Das Sternensystem erreicht dabei mehr als die 10.000-fache Sonnenleuchtkraft, die vornehmlich im Röntgenbereich abgestrahlt wird.



Röntgenquelle Cygnus X-1: Materie stürzt von einem blauen Riesenstern auf ein Black Hole, wobei eine Millionen Grad heiße Akkretionsscheibe entsteht, aus der zwei Jets herauschießen. (NASA/CXC/M.Weis)

Kommt es bei einem Doppelsternsystem mit einem Black Hole infolge von Abstrahlung von Gravitationswellen zu Verlusten von Bahndrehimpuls, so nähern sich beide Komponenten einander. Ab einer bestimmten Nähe werden die Gezeitenkräfte der Schwerkraftfalle so groß, dass der leuchtende Stern zerrissen wird. Das Black Hole verleibt sich die Sternmaterie ein und wächst dabei.

In den Zentren der meisten großen Galaxien haust ein massereiches, riesiges Schwarzes Loch von millionenfacher, teils milliardenfacher Sonnenmasse. Sterne, die diesen Monster-Black-Holes zu nahekommen, werden erbarmungslos geschreddert. Wird ein solches Monster von einer umgebenden Akkretionsscheibe gefüttert, so leuchtet die Galaxie als Quasar mit einer Helligkeit auf, die die Leuchtkraft unserer gesamten Milchstraße um das

100-Fache übertrifft. Hat das riesige Schwarze Loch die Akkretionsscheibe fast vollständig aufgefressen, so erlischt der Quasar. Ein solch verhungertes Black Hole von vier Millionen Sonnenmassen hält sich im Zentrum unserer Milchstraße auf. Durch Beobachtungen im Infraroten von Sternen, die das Black Hole im Zentrum der Galaxis umrunden, konnte seine Masse gemäß dem 3. Kepler-Gesetz bestimmt werden.



In den Zentren großer Galaxien haust meist ein riesiges Schwarzes Loch mit einer Masse von Millionen bis Milliarden Sonnenmassen. Sind diese supermassereichen Schwarzen Löcher von einer überdimensionalen Akkretionsscheibe umgeben, so leuchten sie als Quasare auf und sind selbst in großen Distanzen noch zu erkennen, da sie hundert Mal heller leuchten als eine ganze Galaxie. (NASA/JPL-Caltech)

Am 14. September 2015 wurde mit den beiden Gravitationswellendetektoren LIGO in Livingstone, Louisiana (USA) und Hanford, Washington State (USA), das Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher von 29 und 36 Sonnenmassen registriert. Beide umkreisten einander, wobei sie durch Abstrahlung von Schwerkraftwellen an Bewegungsenergie verloren und sich einander so lange näherten, bis sie kollidierten und miteinander verschmolzen.

Die Bildung solch schwerer Black Holes kann nicht aus Supernovadetonationen von massereichen Sternen erklärt werden. Etliche Kosmologen vermuten, dass bereits in den ersten Sekunden nach dem Urknall Schwarze Löcher geboren wurden. Diese primordialen (ursprünglichen) Black Holes könnten zumindest einen Teil der unsichtbaren Dunklen Materie erklären. Noch fehlt ein endgültiger Beweis für die Existenz primordialer Schwarzer Löcher. Fortschritte in der Gravitationswellenastronomie werden möglicherweise den Nachweis dieser allerersten Schwerkraftfallen erbringen.

Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie existiert ein Schwarzes Loch für alle Ewigkeit. Denn nichts kann ihm entfliehen und niemand kann es teilen oder zerlegen. Doch Stephen Hawking (1942-2018) hat gezeigt, dass aus quantenmechanischen Gründen dann und wann ein Teilchen einem solchen Black Hole entfliehen kann. Dies kommt einem Verdampfungsprozess gleich. Hawking hat eine quantenmechanische Thermodynamik der Black Holes entwickelt. Demnach können Black Holes explodieren. Das Verdampfen eines stellaren Schwarzen Loches von drei Sonnenmassen geht dabei extrem langsam vor sich. Das heute ultrakalte Black Hole von nur einem Zehnmillionstel Grad über dem absoluten ($-273,16^{\circ}\text{C} = 0\text{ K}$) Nullpunkt detoniert frühestens in 10^{65} (100 Dezilliarden) Jahren. Dies ist eine Ewigkeit im Vergleich zum heutigen Weltalter von 14 Milliarden ($1,4 \times 10^{10}$) Jahren. Beides aber sind Zeitspannen, für die uns jede anschauliche Vorstellung fehlt. Denn unsere menschliche Existenz ist nur ein Wimpernschlag im Zeitmaßstab des Universums.