

# Der Ereignishorizont: Grenzfläche in der Raumzeit

Vorwissenschaftliche Arbeit

Vorgelegt von

Sonja Pally

8b

Betreuer: Mag. Milan Nemling

BRG Kepler  
Keplerstraße 1, 8020 Graz  
März 2023

## Abstract

In den unendlichen Weiten des Universums gibt es einige Phänomene, die von der Wissenschaft momentan noch nicht erklärt werden können. Zu diesen Phänomenen zählt als Teil des Schwarzen Lochs auch der Ereignishorizont. Als „point of no return“ entkommt ihm nicht einmal das Licht, weshalb er pechschwarz erscheint, aber was der Ereignishorizont tatsächlich ist, versucht die Forschung bis heute zu klären.

Diese vorwissenschaftliche Arbeit befasst sich mit dem Ereignishorizont und versucht zudem einen grundlegenden Überblick über das Thema zu geben. Dazu zählt ein Einblick in den aktuellen Forschungsstand sowie in die Entstehung schwarzer Löcher, um einen Grundstein für den Erklärungsversuch des Phänomens Ereignishorizont zu legen.

Im Zuge der Arbeit wurde in wissenschaftlichen Texten, Zeitschriften und Büchern recherchiert und die wichtigsten Informationen in diesem Text zusammengefasst sowie Begriffe, die für Leser unverständlich sein könnten, erklärt. Hierbei stellte sich der Versuch der physikalischen Erklärung als äußerst schwierig und komplex heraus.

## INHALT

---

1	Einleitung: Das Mysterium Ereignishorizont	1
1.1	Einblick in den aktuellen Forschungsstand	2
1.2	Allgemeine Definition des Schwarzen Loches und des Ereignishorizonts: Geschichte der Entdeckung Schwarzer Löcher	4
1.3	Exkurs: Das Leben eines Sterns	7
1.3.1	Supernova:	9
1.3.2	Neutronenstern:	11
1.3.3	Weißer Zwerg:	12
2	Das Schwarze Loch: Physikalische Grundlagen	12
2.1	Phänomene, die mit Schwarzen Löchern in Verbindung stehen	14
2.1.1	Gravitationslinse:	14
2.1.2	Einsteinring:	15
3	Der Ereignishorizont	16
3.1	Der Zusammenhang zwischen Gravitation und Ereignishorizont	18
3.2	Zeit am Ereignishorizont	18
4	Fazit	21
5	Literaturverzeichnis	22
6	Abbildungsverzeichnis	25

# 1 EINLEITUNG: DAS MYSTERIUM EREIGNISHORIZONT

---

Es ist eines der größten Mysterien, das in der Astronomie heutzutage bekannt ist: Das schwarze Loch. Und obwohl immer mehr herausgefunden und entdeckt wird, so gibt es doch noch viel zu erforschen.

Diese Vorwissenschaftliche Arbeit befasst sich mit einem Teil des Schwarzen Lochs, der Ereignishorizont genannt wird und versucht ihn etwas näher zu erklären. Auch wird ein Versuch zur visuellen Darstellung des Phänomens gemacht und die Frage des aktuellen Forschungsstandes gestellt. Das Hauptziel der Arbeit liegt jedoch in der Beschäftigung mit Erklärungsansätzen des Phänomens.

Die Arbeit ist vorwiegend literarisch einzuordnen. Dabei werden verschiedenste Bücher und Texte als Quellen herbeigezogen und als Informationsquelle für eine mögliche visuelle Darstellung verwendet.

Das erste Drittel der Arbeit beschäftigt sich mit der allgemeinen Erklärung des Phänomens des Ereignishorizontes und seinem Bezug auf die vier Dimensionen und Einsteins Relativitätstheorie. Darauf aufbauend werden einige Fragen zum physikalischen Hintergrund, zum Beispiel welche physikalischen Phänomene mit Schwarzen Löchern einhergehen oder warum die Zeit am Ereignishorizont langsamer vergeht, gestellt sowie eine visuelle Darstellung versucht. Abschließend beschäftigt sich die Arbeit mit dem aktuellen Forschungsstand zu Schwarzen Löchern und dem Ereignishorizont.

## 1.1 EINBLICK IN DEN AKTUELLEN FORSCHUNGSTAND

Im folgenden Kapitel wird ein kleiner Überblick darüber geben, wo die Forschung in Bezug auf das Thema der vorliegenden Arbeit momentan steht. Hierbei ist der größte Fortschritt wohl das 2019 im Rahmen des Event Horizon Telescope (EHT) Projekts gemachte Bild des Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie M87. Dieses Bild zu machen war sehr aufwändig, zumal dafür insgesamt acht Radioteleskope auf vier Kontinenten miteinander kombiniert werden mussten. Diese befinden sich auf einer gewissen Höhe, um dem Einfluss der Atmosphäre und des Wasserdampfes zu entgehen.<sup>1</sup> Im Rahmen des gleichen Projekts wird auch seit einigen Jahren das supermassive Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße, das den Namen Sagittarius A\* trägt, beobachtet und erforscht. Dies stellt sich zunächst als schwierig heraus, da Sagittarius A\* von einer Gas- und Staubwolke verdeckt ist. Allerdings gelang es dem European Southern Observatory (ESO) zusammen mit dem EHT-Projekt im Jahr 2017 ein Bild jenes besagten Schwarzen Lochs zu machen, welches dann am 12. Mai des Jahres 2022 in einer internationalen Pressekonferenz veröffentlicht wurde.<sup>2</sup> Dieses Bild ist nun der endgültige Beweis dafür, dass auch im Zentrum der Milchstraße ein Schwarzes Loch existiert, im Fall von Sagittarius A\* eines mit etwa vier Millionen Sonnenmassen. Wie wir in Abb. 1 nun erkennen können, ist dieses Bild dem von M87 sehr ähnlich, denn in beiden kann man sowohl den Ereignishorizont, der auch Schatten des Schwarzen Lochs genannt wird, als dunklen Fleck in der Mitte erkennen, sowie das durch Reibung erhitzte und zum Glühen gebrachte Gas um ihn herum. Dieses Gas emittiert Radiowellen, die vom EHT beobachtet werden können. Von diesem Bild aus konnte gemessen werden, dass der Schatten 52 Mikrobogensekunden groß ist, was so groß ist wie ein von der Erde aus betrachteter Donut auf dem Mond. In Realität ist dieses Schwarze Loch in etwa so groß wie der Marsorbit um die Sonne aber 27.000 Lichtjahre entfernt. Aber wie kann ein Bild von einem Objekt gemacht werden, das so weit entfernt ist wie Sagittarius A\*? Die EHT Collaboration hat überall auf der Welt Radioteleskope miteinander verbunden und so ein virtuelles Teleskop in der Größe der Erde erschaffen. Mitglieder dieses gigantischen Teleskops sind zum Beispiel ALMA und APEX in Chile, 30-M in Spanien und sogar

---

<sup>1</sup> Unveiling Srg A\*, the black hole at the centre of our galaxy ,(press conference, musical act, Q&A). Video online. URL.: 12.05.2022, 19:26-31:12 min.

<sup>2</sup> FISCHER, Katarina (2022): Erstes Bild des Schwarzen Lochs im Herzen unserer Milchstraße. URL: <https://www.nationalgeographic.de/wissenschaft/2022/05/erstes-bild-des-schwarzen-lochs-im-herzen-unserer-milchstrasse> [Stand: 25.02.2023].

das South Pole Telescope (SPT) am Südpol.<sup>3</sup> Diese Technik wird Very Long Baseline Interferometry, oder kurz VLBI, genannt. Alle Mitwirkenden Teleskope beobachten dasselbe Objekt für mehrere Stunden, wobei die Daten auf einem Festplattenlaufwerk aufgenommen und von Atomuhren datiert werden. Nach dem Beenden der Aufnahme werden diese Daten an sogenannte Processing Centers geschickt, wo sie von speziellen Computern, den sogenannten Correlators, kombiniert werden. Nachdem diese Correlators die Daten analysiert haben, wird ein Bild von der Quelle der Radiowellen errechnet. Im Fall des EHT befinden sich die Radiowellen in einem Bereich von 1,3 mm Wellenlänge, da diese Wellenlänge kurz genug ist, um das Wirbeln der Materie, die um das Schwarze Loch fliegt, einzufangen.<sup>4</sup>

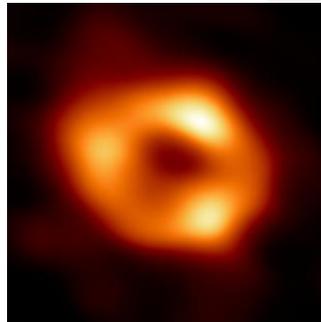


Abb.1: Sagittarius A\*  
Bild: EHT Collaboration  
Lizenz: Creative Common

Eine weitere Sensation war die Entdeckung eines frei im All treibenden Schwarzen Lochs ca. 5000 Lichtjahre von der Erde entfernt. Bei dem als „Rogue Black Hole“ bezeichneten Schwarzen Loch handelt es sich um ein stellares schwarzes Loch, ein Schwarzes Loch, das durch eine Supernova entstanden ist. Laut Syfy Wire trägt es die Bezeichnung MOA-211-BLG-191/OGLE-2011-BLG-0462 und hat eine Masse von ungefähr sieben Sonnenmassen. Der Grund, warum die Entdeckung dieses Schwarzen Lochs so sensationell ist, ist die Art, auf die es gefunden wurde. Das „Rogue Black Hole“ ist bislang das einzige seiner Art, das von Forschern gefunden wurde, denn normalerweise werden Schwarze Löcher durch die Gravitationswellen gefunden, die sie ausstrahlen, wenn sie Sterne absorbieren oder mit anderen Schwarzen Löchern kollidieren. Das „Rogue Black Hole“ allerdings ist mithilfe von Microlensing<sup>5</sup> entdeckt, bei dem ein kleines Objekt, in dem Fall das Schwarze Loch, einen Gravitationslinseneffekt hervorbringt.<sup>6</sup> Dieser Effekt wird weiter unten noch erklärt.

<sup>3</sup> ESO (2021): Watch stars move around the Milky Way's supermassive black hole in deepest images yet. URL: <https://www.eso.org/public/news/eso2119/> [Stand: 25.02.2023].

<sup>4</sup> Unveiling Sgr A\*, the black hole at the centre of our galaxy ,(press conference, musical act, Q&A). Video online. URL.: 12.05.2022, 19:26-31:12 min.

<sup>5</sup> FREISTETTER, Florian (2018): Der Mikrolinseneffekt. URL: <https://www.spektrum.de/podcast/der-mikrolinseneffekt/1731226> [Stand: 16.02.2023].

<sup>6</sup> Futurezone (2022): Erstes frei treibendes Schwarzes Loch in der Milchstraße entdeckt. URL: <https://futurezone.at/science/schwarzes-loch-milchstrasse-microlensing-rogue-black-hole/401897147> [Stand: 16.02.2023].

## 1.2 ALLGEMEINE DEFINITION DES SCHWARZEN LOCHES UND DES EREIGNISHORIZONTS: GESCHICHTE DER ENTDECKUNG SCHWARZER LÖCHER

Die Geschichte Schwarzer Löcher beginnt mit der Veröffentlichung Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie im Jahre 1915<sup>7</sup>. Diese Theorie beschreibt das Zusammenspiel von Raumzeit und Materie. Materie krümmt Raumzeit und die Bewegung der Materie wird wiederum durch diese Krümmung beeinflusst. Im Zuge der Allgemeinen Relativitätstheorie stellte Einstein folgende Gleichung auf:

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

Hierbei steht  $G_{\mu\nu}$  für den Einstein'schen Feld-Tensor,  $\kappa$  ist die Einstein'sche

Gravitationskonstante  $\frac{8\pi G}{c^4}$  und  $T_{\mu\nu}$  ist der Energie-Impuls-Tensor. Diese Gleichung dient als Grundlage für die Einstein'sche Feldgleichung:

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2}g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Hierbei ist  $R_{\mu\nu}$  der Ricci-Tensor,  $g_{\mu\nu}$  der metrische Tensor,  $R$  der Krümmungsskalar  $\kappa$  ist die Einstein'sche Gravitationskonstante und  $T_{\mu\nu}$  der Energie-Impuls-Tensor.<sup>8</sup> In dieser Formel ist die Möglichkeit der Existenz eines Schwarzen Lochs bereits miteinbegriffen, welche aber zuerst nicht erkannt wurde. Erst der Astronom Karl Schwarzschild entdeckte diese Möglichkeit, als er versuchte, die Allgemeine Relativitätstheorie auf unser Sonnensystem anzuwenden, wobei er die Krümmung der Raumzeit durch die Sonne berechnete. Um dies zu tun, vereinfachte er unser Sonnensystem, indem er annahm, dass sich die gesamte Masse der Sonne auf einen einzigen Punkt konzentrierte und berechnete dann, welche Auswirkung dieser Punkt auf die Krümmung von Licht und Raum um ihn haben könnte. Die Berechnungen

<sup>7</sup> HERMANN, Kim (2020): Schwarze Löcher wurden lange nicht ernst genommen. URL: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze-loecher/schwarze-loecher-wurden-lange-nicht-ernst-genommen/> [Stand: 04.02.2023].

<sup>8</sup> STILLERT, Alexandra: Allgemeine Relativitätstheorie und Schwarze Löcher. Eine Einführung für Lehramtsstudierende. Wiesbaden: Springer 2019, S. 48-53.

ergaben einen kleineren Radius als ihn unsere Sonne in der Realität besaß, weshalb man ihn als für das Sonnensystem unnötig ansah. Dieser innere Bereich jedoch beschrieb, was wir heute als Schwarzes Loch kennen.<sup>9</sup> Lange Zeit hielt man das Phänomen des Schwarzen Lochs für unmöglich, weil man sich damals noch kein Objekt vorstellen konnte, welches der theoretischen Lösung entsprechen würde und dicht genug war, um die Raumzeit so stark zu krümmen, dass nicht einmal Licht entkommen konnte. Eine entscheidende neue Erkenntnis zu diesem Thema war, als der Physiker Subrahmanyan Chandrasekhar, welcher sich mit der Entwicklung von Sternen und vor allem deren Endstadien beschäftigte, herausfand, dass Sterne, die schwerer als unsere Sonne sind unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabieren können. Diese Erkenntnis ließ erstmals eine Vorstellung des physikalischen Prozesses zu, der zu so einem kompakten Objekt führte. Später beschäftigten sich die theoretischen Physiker Robert Oppenheimer und Hartland Snyder genauer mit dem gravitativen Kollaps, wobei dann Roger Penrose, der sich ebenfalls damit beschäftigte, ein Durchbruch gelang. Die bisherigen Berechnungen beruhten auf sehr vielen Vereinfachungen, weshalb Kritiker die Möglichkeit eines gravitativen Kollapses in der Praxis als unmöglich ansahen. In den 1960er Jahren gelang es Penrose dann allerdings, den gravitativen Kollaps ohne starke Vereinfachungen zu errechnen. Zu diesem Zeitpunkt setzte sich auch die Bezeichnung „Schwarzes Loch“, die bisher von den Franzosen nicht gebilligt wurde, weil sie zu obszön war, durch.<sup>10</sup>

Das erste Schwarze Loch, das tatsächlich beobachtet wurde, war etwa 15 Sonnenmassen schwer und trug den Namen Cygnus X-1. Es wurde Anfang der 1970er Jahre von den Astronomen Tom Bolton, Louise Webster und Paul Murdin in unserer Milchstraße entdeckt. Heute geht man davon aus, dass es mehrere hundert Millionen kleinere (stellare) Schwarze Löcher gibt, die durch den Kollaps von Sternen entstehen. Neben diesen stellaren Schwarzen Löchern gibt es noch größere Vertreter, die Supermassiven Schwarzen Löcher, deren Herkunft und Entstehung noch wenig bekannt ist. Allerdings fanden Forscher rund um Andrea Ghez und Reinhard Genzel in den 1990er Jahren heraus, dass sich so ein Supermassives Schwarzes Loch

---

<sup>9</sup> HERMANN, Kim (2020): Schwarze Löcher wurden lange nicht ernst genommen. URL: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze-loecher/schwarze-loecher-wurden-lange-nicht-ernst-genommen/> [Stand: 04.02.2023].

<sup>10</sup> HAWKING, Stephen: Haben Schwarze Löcher keine Haare?. Zwei Vorträge. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt 2018, S. 35-36.

auch in der Mitte unserer Galaxie befindet.<sup>11</sup> Sie verfolgten jahrelang die Position der Sterne in der Nähe des Zentrums und beobachteten dabei elliptische Bahnen um das Zentrum, die nur durch ein massereiches Objekt verursacht werden konnten, welches die Sterne an sich bindet. Für diese Entdeckung erhielten sie im Jahr 2020 den Nobelpreis für Physik.

In Abbildung 2 wurden diese elliptischen Bahnen auf einem Bild, das vom Very Large Telescope Interferometer (VLTI) der ESO gemacht wurden, eingezeichnet.<sup>12</sup>

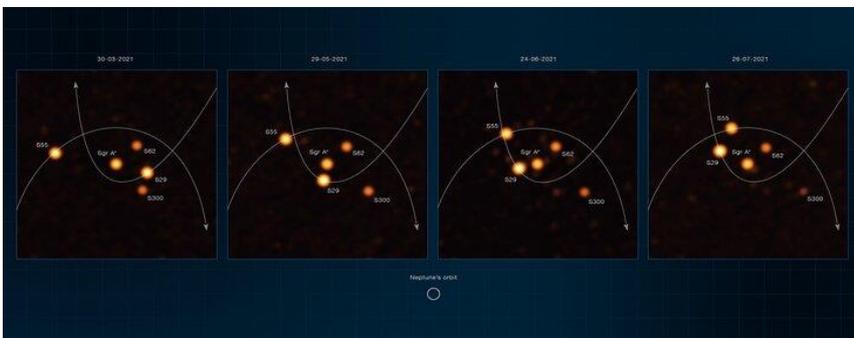


Abb.2: Bild von Sternen in der Nähe von Sagittarius A\*  
Bild: ESO  
Lizenz: Creative Commons

Heute können wir das Umfeld um ein Schwarzes Loch besser beschreiben und sogar Bilder davon machen, wie das Event Horizon Telescope im Jahr 2019 eindrucksvoll mit seinem Bild des Supermassereichen Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie M87 beweist. In Abbildung 3 ist die Materie zu sehen, die um das Schwarze Loch wirbelt. Dadurch, dass die Teilchen aneinander reiben, entsteht Wärme, welche die Teilchen dann zum Glühen bringt. Der

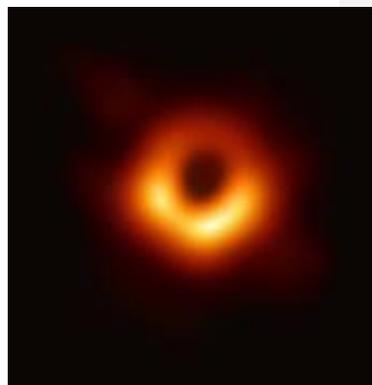


Abb.3: Bild des Schwarzen Lochs im Zentrum von M87  
Bild: ESO  
Creative Common Lizenz

**Kommentiert [1]:** Schwarzkörperstrahlung, Strahlungsgesetz

<sup>11</sup> FISCHER, Katarina (2022): Erstes Bild des Schwarzen Lochs im Herzen unserer Milchstraße. URL: <https://www.nationalgeographic.de/wissenschaft/2022/05/erstes-bild-des-schwarzen-lochs-im-herzen-unserer-milchstrasse> [Stand: 25.02.2023].

<sup>12</sup> ESO (2021): Watch stars move around the Milky Way's supermassive black hole in deepest images yet. URL: <https://www.eso.org/public/news/eso2119/> [Stand: 25.02.2023].

Schwarze Punkt in der Mitte zeigt den Ereignishorizont, hinter dem die Materie schlussendlich verschwindet. Mittlerweile wurde von der NASA sogar eine Animation veröffentlicht, die annähernd die Rotation und Raumzeit-Krümmung des Schwarzen Lochs darstellen soll, was man auch in Abbildung 4 erkennen kann.<sup>13</sup> Über den Bereich im Innern des Schwarzen Loch weiß man allerdings dennoch nichts.

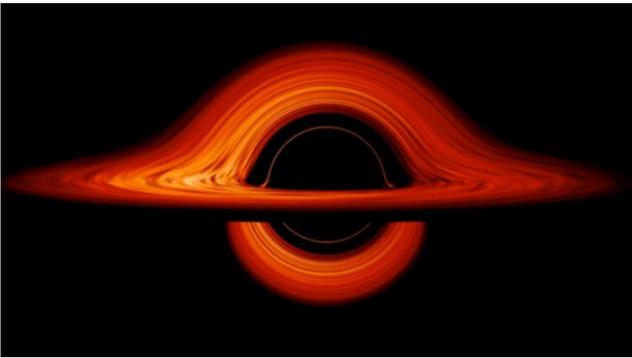


Abb.4: Screenshot aus der Animation eines Schwarzen Lochs

Bild: NASA

Lizenz: [NASA copyright policy page](#)

### 1.3 EXKURS: DAS LEBEN EINES STERNS

Das Schwarze Loch ist eine von mehreren Arten, auf die ein Stern ableben kann. Um die Umstände der Entstehung von Schwarzen Löchern zu verstehen ist es jedoch wichtig, zuerst die Anfänge und den Tod eines Sterns näher zu beleuchten und eben diese Anfänge werden hier beschrieben.

Jedes Objekt, das ausreichend Druck und Hitze besitzt, ist in der Lage Kernfusion zu betreiben. Ab einer Temperatur von 15 Millionen C° und ab dem ca. 200 milliardenfachen des Drucks unserer Erdatmosphäre sind die Voraussetzungen für Kernfusion gegeben.<sup>14</sup> Der Grundbrennstoff ist Wasserstoff, welcher überall im Weltall zu finden ist und als Grundlage für die Entstehung jedes neuen Sterns dient. Ein Stern entsteht, wenn eine Materieansammlung genug Dichte hat, um die Materie durch eigene Anziehungskraft im Kern

<sup>13</sup> HERMANN, Kim (2020): Schwarze Löcher wurden lange nicht ernst genommen. URL: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze-loecher/schwarze-loecher-wurden-lange-nicht-ernst-genommen/> [Stand: 04.02.2023].

<sup>14</sup> Max-Planck-Gesellschaft: Was ist Kernfusion? Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, URL: <https://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/fusion21/kernfusion/index> [Stand: 25.02.2023].

so sehr zu verdichten, dass die nötige Temperatur und Druck entstehen.<sup>15</sup> Die Anziehungskraft sorgt nun dafür, dass mehr Materie Teil der Materiewolke wird und sich Druck und Temperatur weiter erhöhen. Diese beschleunigen die Wasserstoffatome, die dann wieder mehr Temperatur und Druck erzeugen. Bei solchen Temperaturen befinden sich die Wasserstoffatome bereits im Plasmazustand und definieren sich durch Protonen und freie Elektronen. Da die Atome durch Temperatur und Druck extrem beschleunigt werden und unausweichlich auch aufeinanderprallen, kommen sich die Atomkerne nah genug, dass die schwache Kernkraft stärker als die Coulomb-Kraft wird. Die schwache Kernkraft ist zwar stärker als die Coulomb-Kraft, hat aber einen geringeren Radius, in dem sie wirkt. Normal würden sich die Atome aufgrund dessen, dass sie dieselbe Ladung haben, abstoßen, aber durch die Kernkraft werden sie dennoch zusammengezogen. Zwei Wasserstoffatome fusionieren zu Deuterium, einem schwereren Wasserstoff-Isotop. Das Deuterium fusioniert mit einem weiteren Wasserstoff zu einem Zwischenprodukt – einem Heliumatom mit zwei Protonen und einem Neutron - wobei Gamma-Strahlung frei wird. Die Zwischenprodukte fusionieren letzten Endes, wie man in Abbildung 5 erkennen kann, zu einem Heliumatom. Wenn Temperatur und Druck hoch genug sind fusionieren fortlaufend zwei gleiche Atome zum nächstschwereren Atom. Zwei Heliumatome fusionieren zu einem Kohlenstoffatom, zwei Kohlenstoffatome wiederum zu einem Neonatom - und so weiter. Diesen

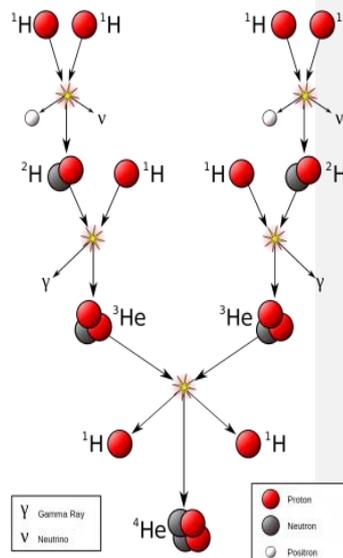


Abb.5: Die häufigste Art der Fusionsreaktion in der Sonne

Bild: Borb

Lizenz: CreativeCommons CC-BY-SA-3.0-2.5-2.0-1.0

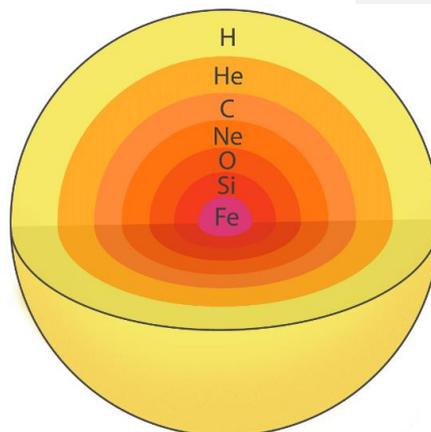


Abb.6: Das Schalenbrennen

Bild: Alexander Gorfer

(quant.uni-graz.at), (CC-BY-SA 4.0)

<sup>15</sup> Sternsucher: Kernfusion. Sternsucher.com, URL: <http://www.sternsucher.com/weltraum/astrophysik/201-kernfusion.html> [Stand: 04.02.2023].

Vorgang nennt man Schalenbrennen, weil jede Schale des Sterns nacheinander verbrannt wird, wie in Abbildung 6 zu erkennen ist.<sup>16</sup> Die Ressourcen eines Sternes sind nicht unendlich – Silizium ist das letzte Element, das noch fusioniert werden kann, und zwar zu Eisenkernen. Um die Fusion von Eisen zu schwereren Elementen fortzuführen, müssten der Fusion extreme Mengen an Energie hinzugefügt werden, da die Fusion von Eisenkernen mehr Energie benötigt als bei der Fusion frei wird. Nachdem der Stern beim Eisenkern angelangt ist, hat er keinen Brennstoff mehr, wodurch der Druck nach außen, der durch die Fusion entsteht, verschwindet. Dieser Druck, der durch die Kernfusion entsteht, wird Fusionsdruck genannt.<sup>17</sup> So endet der Stern in einem der folgenden Zustände:

### 1.3.1 Supernova:

Als Supernova wird das explosive Ableben eines Sterns bezeichnet, bei welchem der größte Teil des Sterns komplett vernichtet und in Energie umgewandelt wird (Erklärung siehe unten). Bei diesem Prozess erhöht sich die Helligkeit des sterbenden Sterns um das Millionen- bis Milliardenfache, wodurch sie am Nachthimmel leicht zu erkennen sind. So kann eine einzelne Supernova im Laufe weniger Wochen oder Monate annähernd so viel Energie abstrahlen wie unsere Sonne in einem Zeitraum von 10 bis 100 Milliarden Jahren.

Man unterscheidet zwischen den zwei Supernova Typen 1 und 2:

Supernovae des Typ 1 können nur bei Sternen mit geringer Masse entstehen. Hierbei ist mit geringer Masse eine Masse von etwa 8 Sonnenmassen gemeint. Diese Art der Supernova kann nur in einem engen Doppelsternsystem entstehen, bei dem sich ein Weißer Zwerg (ein ausgebrannter Sternenrest) und meistens ein Roter Riese (Stadium vor dem des Weißen

---

<sup>16</sup> GORFER, Alexander: Neutronensterne und Schwarze Löcher. Artikel 1: Sternentwicklung. URL: <https://quant.uni-graz.at/quant-module/neutronensterne-und-schwarze-loecher/33-neutronensterne-und-schwarze-loecher-artikel/24-artikel-1-neutronensterne-und-schwarze-loecher> [Stand: 04.02.2023].

<sup>17</sup> Sternsucher: Kernfusion. Sternsucher.com, URL: <http://www.sternsucher.com/weltraum/astrophysik/201-kernfusion.html> [Stand: 04.02.2023]; GORFER, Alexander: Neutronensterne und Schwarze Löcher.

Zwerges) umkreisen.<sup>18</sup> Der weiße Zwerg hat das Stadium der Eisenkerne erreicht und kann somit keine Kernfusion mehr betreiben, während der Rote Riese noch genügend Brennmaterial hat, um weitere einige tausend Jahre weiter zu bestehen. Dadurch, dass der Rote Riese nun viel größer ist, kommt seine Materie nahe genug an den Weißen Zwerg heran, um von ihm absorbiert und als Brennstoff verwendet werden zu können. Sobald er genug Material gesammelt hat, kann er die Kernfusion wieder starten, welche für den Stern jedoch so energetisch sind, dass er eine kritische Masse erreicht, wodurch er dann explodiert.<sup>19</sup> In Abbildung 7 wird der soeben beschriebene Ablauf der Supernova noch einmal visuell dargestellt.

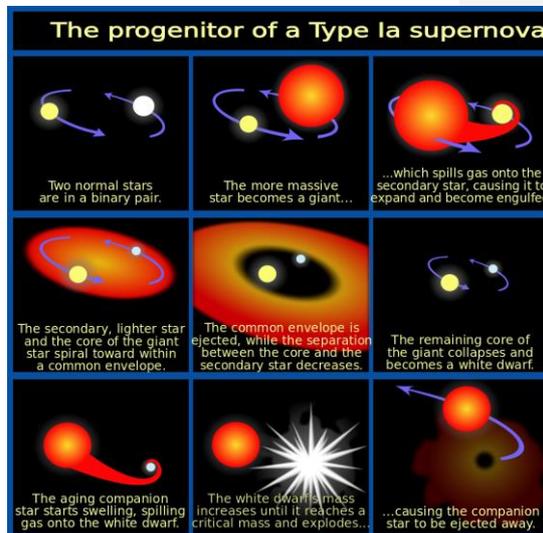


Abb.7: Verlauf einer Typ 1 Supernova

Urheber: NASA, ESA

Keine Veränderungen vorgenommen

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/star/supernova/2004/34/image/d/>

Typ 2 Supernovae hingegen entstehen bei Roten Riesen, die eine Sonnenmasse von 8 Sonnenmassen oder mehr besitzen und ihr Brennmaterial verbraucht haben. Dadurch reicht der Fusionsdruck im Inneren nicht mehr aus, was den Stern instabil macht und dazu führt, dass der Stern durch seine eigene Gravitation in sich zusammenfällt. Hierbei wird so viel Energie in Form von Licht frei, dass die Supernova zeitweise sogar heller strahlen kann als ihre Heimatgalaxie. Typ 2 Supernovae bilden eine Voraussetzung für die Bildung von verschiedenen kompakten Objekten, wie Neutronensterne (welche dann als Pulsare beobachtbar sind) oder Schwarze Löcher. Zudem kann man nach einer Supernova sogenannte Supernova Überreste, wie den Tarantelnebel, beobachten. Diese Nebel können dann wieder zur Geburt neuer Sterne führen.<sup>20</sup>

<sup>18</sup> Max-Planck-Gesellschaft: Supernova. URL: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/526410/supernovae> [Stand: 04.02.2023].

<sup>19</sup> MÜLLER, Andreas (2014): Supernova. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/supernova/465> [Stand: 25.02.2023].

<sup>20</sup> Max-Planck-Gesellschaft: Supernova. URL: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/526410/supernovae> [Stand: 04.02.2023].

### 1.3.2 Neutronenstern:

Wie im vorherigen Absatz erwähnt, entsteht ein Neutronenstern durch eine Typ 2 Supernova, indem die Gravitation den Kern so stark komprimiert, dass sich Protonen und Elektronen in Neutronen und Neutrinos umwandeln, was im Prozess Atome zerstört. Neutronensterne sind Objekte mit extrem hoher Masse und Dichte, die, im Gegensatz zum Schwarzen Loch, aus sichtbarer und physikalisch beweisbarer Materie bestehen. Im Kern des Neutronensterns komprimieren sich mehrere Tonnen Masse auf die Fläche eines Kubikzentimeters. Eine besondere Art des Neutronensterns ist der Pulsar.

Der Pulsar ist ein Neutronenstern, der sich mit oft mehr als 700 Umdrehungen die Sekunde um die eigene Achse dreht, wobei die Radiowellen, welche er ausstößt, ebenfalls rotieren. Zusammen mit der der Rotationsachse entgegengesetzten Magnetachse sieht es von der Erde daher so aus, als ob der Pulsar kurz aufleuchtet und dann wieder dunkler werden würde. Die Entstehung dieser Radioemissionen wird von der Zeitschrift Spektrum so passend erklärt, dass ich diesen Absatz übernehmen möchte:

Wie aus dem Nichts kommt es zu einer starken Entladung, die eine Wolke aus Elektronen und Protonen erzeugt. Anschließend entsteht ein „Nachglühen“, wobei die Elektron-Positron-Paare mit ihren eigenen elektrischen Feldern dem anfänglichen elektrischen Feld entgegenwirken und es dämpfen. Dadurch beginnt Letzteres irgendwann zu oszillieren, was schließlich dazu führt, dass elektromagnetische Strahlung ausgesandt wird.<sup>21</sup>

Seinen Namen bekam der Pulsar dadurch, dass er wie ein Leuchtturm in regelmäßigen Abständen aufleuchtet und der erste Pulsar wurde 1967 von Jocelyn Bell und Antony Hewish entdeckt. Seither zählen sie zu den interessantesten Forschungsgebieten der heutigen Astrophysik.<sup>22</sup>

---

<sup>21</sup> Spektrum Akademischer Verlag (2020): Wieso Pulsare strahlen. URL: <https://www.spektrum.de/news/wieso-pulsarestrahlen/1744246#:~:text=Die%20Drehung%20des%20Pulsars%20f%C3%BChrt,und%20wieder%20aus%20ihr%20herausbewegen> [Stand: 25.02.2023].

<sup>22</sup> Max-Planck-Gesellschaft: Neutronensterne. URL: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/forschung/fundamental/neutronensterne> [Stand: 04.02.2023]; Spektrum: Wieso Pulsare Strahlen.

### 1.3.3 Weißer Zwerg:

Diese Objekte sind in etwa so groß wie die Erde, haben jedoch nur eine Sonnenmasse, weshalb sie mit einer inneren Dichte von etwa  $10^6 \text{ g/cm}^3$  zu den kompaktesten Objekten in diesem Universum zählen. Sie entstehen, wenn ein Stern mit ungefähr einer Sonnenmasse stirbt, aber nicht in einer Supernova explodiert. Hierbei wirft der Stern nach dem Rote-Riesen-Stadium seine äußere Hülle als planetarischen Nebel ab. Seine Stabilität erhält der Weiße Zwerg dabei vom fermionischen Entartungsdruck der Elektronen, die zusätzlich dem Pauli-Prinzip unterliegen. Fermionen sind Teilchen mit halbzahligen Spin. Somit haben die Elektronen halbzahligen Spin und können sich auf Grund des Pauli-Prinzips nicht beliebig nahekommen. Das Pauli-Prinzip gilt nur für Fermionen und besagt, dass sie nicht in allen Quantenzahlen gleich sein dürfen. Dieser Entartungsdruck ist erst bei besonders hohen Dichten relevant, weshalb der Weiße Zwerg durch ihn stabilisiert wird. Ist der Gravitationsdruck jedoch zu groß, so kann auch der Entartungsdruck das Objekt nicht mehr stabilisieren, was bei einer Typ 1 Supernova der Fall ist (siehe Supernova Typ 1).<sup>23</sup>

## 2 DAS SCHWARZE LOCH: PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

---

In diesem Kapitel sollen die physikalischen Grundlagen des schwarzen Loches im Überblick beschrieben werden. Das Schwarze Loch entsteht, wenn ein sterbender Stern seine äußere Hülle in einer gigantischen Explosion, der vorhin genannten Supernova, abwirft. Der zurückbleibende Kern ist durch Fehlen des Fusionsdrucks instabil, da die Gravitation immer noch vorhanden ist und die äußeren Schichten des Sterns nun in den Kern zieht will, wodurch er dann schlussendlich in sich zusammenfällt und seine gesamte Masse auf ein unglaublich kleines Volumen mit enormer Dichte komprimiert. Würde man die Erde in ein Schwarzes Loch verwandeln wollen, so müsste man ihre gesamte Masse auf eine Kugel mit einem Durchmesser von gerade einmal sieben Millimeter zusammenpressen. Ein Schwarzes Loch ist aufgeteilt in verschiedene Schichten. Diese sind von innen nach außen wie folgt: die

---

<sup>23</sup> MÜLLER, Andreas (2014): Weißer Zwerg. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/weisser-zwerg/525> [Stand: 04.02.2023].

Singularität, Ereignishorizont und die Photonensphäre.<sup>24</sup> Bei einem rotierenden schwarzen Loch gibt es den sogenannten Ereignishorizont, der Punkt, ab dem die Anziehungskraft des schwarzen Loches so stark wird, dass nicht einmal die Lichtgeschwindigkeit, die schnellstmögliche Geschwindigkeit im Universum, ausreicht, um dem schwarzen Loch zu entkommen. Bei einem statischen schwarzen Loch hingegen nennt man diesen Punkt den Schwarzschildradius, welchen man mit folgender Formel berechnen kann:<sup>25</sup>

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Hierbei ist  $G$  die Gravitationskonstante,  $M$  die Masse des Objekts und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit.<sup>26</sup> Der Ereignishorizont ist wie eine Grenzfläche in der Raumzeit. Objekte außerhalb des Ereignishorizonts verhalten sich wie normale Massekörper und können ihn auf einer stabilen Umlaufbahn umkreisen. Optisch gesehen erscheint er von außen wie eine undurchsichtige schwarze Fläche in der Form eines Rotationsellipsoids. Durch die enorme Gravitationskraft, die den Ereignishorizont überhaupt zu einem Rotationsellipsoid werden lässt, wird der Raum rund um das Schwarze Loch extrem verzerrt.

Bei beiden, Schwarzschildradius und Ereignishorizont, ist die Fluchtgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit  $c$ , somit ist sämtliche Materie innerhalb des Schwarzen Lochs nicht sichtbar, da kein Licht emittiert wird, das auf das menschliche Auge treffen könnte.

---

<sup>24</sup> Abenteuer Universum: Schwarze Löcher. Seltsame Eigenschaften. URL: <https://abenteuer-universum.de/sterne/bl4.html> [Stand: 04.02,2023].

<sup>25</sup> STILLERT, Alexandra: Allgemeine Relativitätstheorie und Schwarze Löcher. Eine Einführung für Lehramtsstudierende. Wiesbaden: Springer 2019, S. 65; HANSLMEIER, Arnold: Einführung in Astronomie und Astrophysik. 4. Auflage. Berlin: Springer 2020, S. 446.

<sup>26</sup> HANSLMEIER, Arnold: Einführung in Astronomie und Astrophysik. 4. Auflage. Berlin: Springer 2020, S. 446; Spektrum Akademischer Verlag, Schwarzschild-Radius, Spektrum, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/schwarzschild-radius/12986> [Stand: 25.02.2023].

## 2.1 PHÄNOMENE, DIE MIT SCHWARZEN LÖCHERN IN VERBINDUNG STEHEN

### 2.1.1 Gravitationslinse:

Als Gravitationslinse bezeichnet man ein Phänomen, bei dem, wie in Abbildung 8 zu sehen ist, aufgrund eines massereichen Objekts Licht abgelenkt wird. Solche massereichen Objekte können in etwa eine Galaxie oder ein Schwarzes Loch sein. Dieses Phänomen kann für die Forschung nutzbar gemacht werden, weil das Licht so gekrümmt wird, dass Objekte, die sich weit hinter dem für die Lichtkrümmung verantwortlichen Gravitationsfeld befinden, trotzdem wie durch eine Konvexlinse beobachtet werden können. In der Theorie der Allgemeinen Relativitätstheorie kann das jedes Objekt sein, aber in der Praxis kann dieser Effekt nur bei schweren, kompakten Massen angewandt werden, da sie eine höhere Ablenkung der Strahlen verursachen.<sup>27</sup>

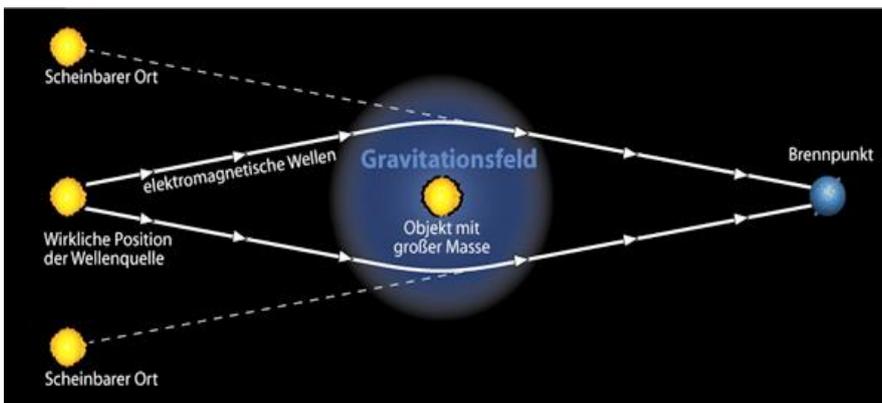


Abb.8: Veranschaulichung der Gravitationslinse

Bild: Horst Frank

Lizenz: Creative Commons

<sup>27</sup> MÜLLER, Andreas (2014): Gravitationslinse. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/gravitationslinse/154> [Stand: 04.02.2023].

### 2.1.2 Einsteinring:

Der Einsteinring ist ein Phänomen, das aus der Gravitationslinse resultiert. Im Prozess der Raumkrümmung durch ein schweres Objekt werden, wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, mehrfach Bilder desselben Objekts erstellt. Dies ist aber nur möglich, wenn das Objekt im Hintergrund, die Linse und der Beobachter in einer geraden Linie sind. Einstein war bewusst, dass er dieses Phänomen nicht direkt beobachten konnte, weil es zu klein war, um es durch ein herkömmliches Teleskop zu sehen. Jedoch gelang es Radioastronomen im Jahr 1988 mit einem VLA (Very Large Array), einem Radioteleskop, ein Bild von der von Einstein vorhergesagten Konstellation zu machen. Erkennen ist ein Einsteinring daran, dass er eine Ansammlung aus langgezogenen und verzerrten Kopien ein und desselben Objekts ist. Inzwischen finden Forscher und Astronomen diese Einsteinringe auch in anderen Wellenlängenbereichen, wie zum Beispiel im Radiowellenbereich. Es gibt allerdings auch die Möglichkeit Mehrfachbilder eines Objekts, ohne den typischen Ring zu sehen, wie zum Beispiel beim Quasar 1938+666, bei dem die exakten Bedingungen für das Entstehen eines Rings nicht gegeben sind, es allerdings trotzdem Mehrfachbilder gibt. <sup>28</sup>

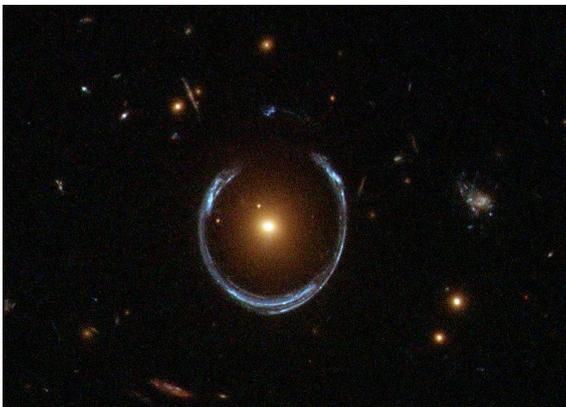


Abb.9: Bild eines Einsteinringes gemacht vom Hubble Space Telescope

Bild: NASA

Lizenz: [NASA copyright policy page](#)

<sup>28</sup> MÜLLER, Andreas (2014): Gravitationslinse. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astonomie/gravitationslinse/154> [Stand: 04.02.2023].

### 3 DER EREIGNISHORIZONT

---

Wie alle Horizonte beschreibt auch dieser eine Grenze zwischen dem Sichtbaren und dem Unsichtbaren, jedoch kann man ihn nicht als etwas Festes identifizieren. Man weiß nicht, woraus der Ereignishorizont tatsächlich besteht.

Jedoch kann man mithilfe der Schwarzschildmetrik das innere und äußere Gravitationsfeld beschreiben und den Radius, das Volumen sowie die kritische Masse, ab der ein Objekt zum Schwarzen Loch wird, berechnen.<sup>29</sup> Nichtsdestotrotz weiß man nicht viel über den Ereignishorizont. Obwohl er eine Grenze in der Raumzeit ist und als ein „point of no Return“ bekannt ist, wird thermische Strahlung emittiert, die langsamer ist als Licht. Stephen Hawking erklärte dies durch die Emission der sogenannten Hawking-Strahlung, die er fand, als er sich mit etwas beschäftigte, das den damaligen physikalischen Theorien entsprechend nicht existieren hätte dürfen. Da jedoch zu dem Zeitpunkt noch die These, dass ein Schwarzes Loch nichts emittiert, aktuell war, ignorierte er die Strahlung, die er fand und versuchte sie in seinen Berechnungen zu widerlegen. Diese Strahlung war für ihn nur ein Störfaktor, da sie unmöglich da sein hätte können, weil ein Schwarzes Loch laut damaligem Forschungsstand nichts emittiert. Im Zuge des Eliminierungsprozesses fiel ihm auf, dass diese störende Strahlung sich nicht eliminieren ließ, wobei er letzten Endes herausfand, dass die Wellenlänge der Teilchen exakt thermisch war, was ihn dann schließlich davon überzeugte, dass diese Teilchen tatsächlich emittiert werden. In seinem Buch „Haben Schwarze Löcher keine Haare?“ beschrieb er seine Entdeckung wie folgt:

Meine Berechnungen sagten vorher, dass ein Schwarzes Loch Teilchen und Strahlung emittiert, als wäre es ein gewöhnlicher heißer Körper – mit einer Temperatur, die sich zu seiner Oberflächengravitation proportional und zu seiner Masse umgekehrt proportional verhält.

Schließlich beschäftigte er sich doch noch aktiv mit dieser Strahlung und fand mittels Berechnungen heraus, dass man die von einem Schwarzen Loch abgegebene Strahlung mit dem Modell eines grauen Strahlers berechnen kann, welcher anders als ein Schwarzer Strahler

---

<sup>29</sup> STILLERT, Alexandra: Allgemeine Relativitätstheorie und Schwarze Löcher. Eine Einführung für Lehramtsstudierende. Wiesbaden: Springer 2019, S. 61-99.

nicht die gesamte Strahlung absorbiert und abgibt, obwohl der Entstehungsmechanismus dieser Strahlung ein anderer ist.<sup>30</sup>

Hawking stellte den Emissionsprozess mit der Quantenmechanik in Verbindung, denn diese besagt, dass der Raum mit einer Ansammlung an virtuellen Teilchen und Antiteilchen gefüllt ist - virtuell, weil man sie im Gegensatz zu realen Teilchen nicht mit einem Teilchendetektor ausfindig machen kann.<sup>31</sup> Diese kommen immer paarweise vor. Sie entstehen in einem Paar, trennen sich, kommen wieder zusammen und löschen sich gegenseitig komplett aus. Diese Teilchen können allerdings mithilfe des sogenannten Lamb-Shift, bei dem das Energieniveau eines angeregten Wasserstoffatoms verschoben wird, trotzdem „sichtbar“ gemacht werden.<sup>32</sup> Der Lamb-Shift, oder auch Lamb-Verschiebung, ist ein Phänomen, das 1947 von den Physikern Willis Eugene Lamb und Robert Curtis Retherford entdeckt wurde. Ihr Experiment zeigte, dass die Orbitale  $2s_{1/2}$  und  $2p_{1/2}$  eines Wasserstoffatoms eine Energiedifferenz aufwiesen. Da sie den Zustand des Wasserstoffatoms nicht mit der bis dahin anerkannten Dirac-Theorie (beschreibt eine relativistische Wellengleichung für Teilchen mit der Masse  $m$  und dem Spin  $\frac{1}{2}$ )<sup>33</sup> erklären konnten, suchten sie nach einer anderen Erklärung für die Verschiebung, was schließlich zur Formulierung der Quantenelektrodynamik führte.

Am Rand des Schwarzen Lochs besteht die Möglichkeit, dass eines der beiden Teilchen über den „point of no Return“, den Ereignishorizont, kommt und in das Schwarze Loch fällt, während das andere in das Universum entkommt, wo es als Strahlung wahrgenommen werden kann. Allerdings ist diese Strahlung ausschließlich bei großen bis supermassiven Schwarzen Löchern mit mehreren hundert Sonnenmassen erkennbar, da der Teilchenausstoß erst dann groß genug ist, dass man ihn erkennen und messen kann. Ein Schwarzes Loch mit einer Sonnenmasse würde nicht genügend Teilchen ausstoßen, wodurch es unentdeckt bliebe.<sup>34</sup>

---

<sup>30</sup> BAKER, Joanne: 50 Schlüsselideen Quantenphysik. Wiesbaden: Springer 2015, S. 8-11.

<sup>31</sup> HAWKING, Stephen: Haben Schwarze Löcher keine Haare?. Zwei Vorträge. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt 2018, S. 37.

<sup>32</sup> Spektrum Akademischer Verlag, Lamb-Shift, Spektrum, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/lamb-shift/8724> [Stand: 04.02.2023].

<sup>33</sup> Spektrum Akademischer Verlag: Dirac-Gleichung, Spektrum. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/dirac-gleichung/3140> [Stand: 04.02.2023].

<sup>34</sup> HAWKING, Stephen: Haben Schwarze Löcher keine Haare?. Zwei Vorträge. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt 2018, S. 36-39.

### 3.1 DER ZUSAMMENHANG ZWISCHEN GRAVITATION UND EREIGNISHORIZONT

Um das vorherig Gesagte noch einmal zusammenzufassen ist der Ereignishorizont ein Point of no Return, was bedeutet, dass nicht einmal Licht entkommt. Somit lässt sich vermuten, dass der Ereignishorizont in Wirklichkeit aus nichts besteht, außer Gravitationswellen, was den Ereignishorizont nur zu einer Grenze macht, ab der die Anziehungskräfte des Schwarzen Loches, die mit der Entfernung im Quadrat abnimmt, keine Teilchen mehr absorbieren kann.

Man könnte diese Theorie anzweifeln, indem man sagt, der Ereignishorizont bestehe nicht aus nichts, sondern aus allem, da ihm nichts entkommen kann und alles innerhalb des Horizonts gefangen ist. Allerdings ist es nicht der Ereignishorizont, der die Masse der „geschluckten“ Objekte hat, sondern die Singularität, der Ort, an dem alle Masse auf ein unglaublich kleines Volumen mit extremer Dichte komprimiert wird. Der Ereignishorizont ist deshalb aber nicht das Ende des Schwarzen Lochs. Von der Singularität aus betrachtet ist er nur der Punkt, ab dem Materie mit Unterlichtgeschwindigkeit einem Schwarzen Loch entkommen kann. Je weiter man sich von der Singularität wegbewegt, desto kleiner wird die Geschwindigkeit, die man benötigt, um aus dem Gravitationsfeld des Schwarzen Lochs zu entkommen, je weiter man sich Richtung Singularität bewegt, umso größer die benötigte Geschwindigkeit.

### 3.2 ZEIT AM EREIGNISHORIZONT

Um diese Frage zu klären, lassen wir uns auf ein Gedankenexperiment ein: Ein Astronaut fällt in das Schwarze Loch. Vom Blickwinkel des Astronauten aus betrachtet, würde man sehen, dass das Schwarze Loch, dem er sich nähert, immer größer wird. Wenn er nach oben in das Universum sieht, so würde die extreme Raum-Zeit-Krümmung des Schwarzen Lochs dafür sorgen, dass er nur mehr einen immer kleiner werdenden Durchmesser des Universums sieht. Je näher er dem Schwarzen Loch kommt, desto kleiner wird der Bereich, den er wahrnehmen kann. Ab einem gewissen Punkt bildet sich eine schwarze Wand um ihn, obwohl er noch weit genug vom Eintreten in das Schwarze Loch entfernt ist. Das liegt an der extremen Krümmung der Raumzeit, welche dafür sorgt, dass das gesamte emittierte Licht des Universums nur mehr von vorne kommt, selbst wenn sich der Stern, der es emittiert, im rechten Winkel zum

Schwarzen Loch befindet.<sup>35</sup> Er kommt immer näher an den Ereignishorizont und wird somit immer mehr von den Raumzeitkrümmungen beeinflusst. Jetzt würde er auch das Licht eines Sterns sehen, der sich hinter ihm befindet, während der Bereich des Universums, den er sieht, immer kleiner wird. Er überquert nun den Ereignishorizont und sieht, wie die Geschichte des Universums wie in einem Zeitraffer vorüber geht. Nach ein paar Augenblicken sieht er denselben Film noch einmal, allerdings rückwärts laufend bis hin zu dem Zeitpunkt, an dem er seine Reise gestartet hat. Wenn nun aber eine außenstehende Person dabei zusehen würde, wie der Astronaut in das Schwarze Loch fällt, so würde es für sie so aussehen, als ob er den Ereignishorizont nie passieren würde.<sup>36</sup> Er würde langsam blasser und blasser und durch die Rotverschiebung, bei der die Gravitation die Lichtwellen auseinanderzieht und so in das rote Spektrum bringen, röter werden und schließlich verschwinden.<sup>37</sup> Laut Einstein beeinflusst Masse sowohl Zeit als auch Raum und je näher man sich an einem massereichen Objekt befindet, desto länger dauert es, von außen betrachtet, bis eine Minute vergangen ist. Da nun Schwarze Löcher zu den massereichsten Objekten in unserem Universum zählen ist die Zeitdilatation dementsprechend lang. Für den Astronauten hingegen vergeht die Zeit normal, während für alle anderen Jahre vergehen. Am Ereignishorizont bleibt die Zeit dann schließlich stehen, bis sie hinter dem Ereignishorizont anfängt rückwärtszulaufen.<sup>38</sup>

Aber warum vergeht die Zeit am Ereignishorizont langsamer? Das hat ebenfalls mit Einsteins Relativitätstheorie zu tun, denn Raum und Zeit sind keine unterschiedlichen Dinge. Es gibt nur eins: Raumzeit. Das bedeutet, dass diese zwei Dinge miteinander in Verbindung stehen und sich die Zeit automatisch auch verändert, sobald sich der Raum verändert. Die Anziehungskraft eines Schwarzen Lochs ist nicht nur groß genug, dass Licht nicht mehr entkommen kann, sondern sie krümmt die Raumzeit um das Schwarze Loch extrem. Einstein hat verstanden, dass Masse Raumzeit verändert und krümmt, und dass diese Zeitdilatation nicht nur bei Schwarzen Löchern der Fall ist, sondern in allen Teilen des Universums, an denen es Masse und somit Gravitation gibt - auch auf der Erde. Je näher man an der Quelle der Gravitation ist, desto langsamer vergeht die Zeit, was bedeutet, dass die Zeit an der Spitze des Mount Everest

---

<sup>35</sup> Abenteuer Universum: Schwarze Löcher-Seltsame Eigenschaften. URL: <https://abenteuer-universum.de/sterne/bl4.html> [Stand: 04.02,2023].

<sup>36</sup> STILLERT, Alexandra: Allgemeine Relativitätstheorie und Schwarze Löcher. Eine Einführung für Lehramtsstudierende. Wiesbaden: Springer 2019, S. 74.

<sup>37</sup> HANSLMEIER, Arnold: Einführung in Astronomie und Astrophysik. 4. Auflage. Berlin: Springer 2020, S. 446.

<sup>38</sup> Abenteuer Universum: Schwarze Löcher-Seltsame Eigenschaften. URL: <https://abenteuer-universum.de/sterne/bl4.html> [Stand: 04.02,2023].

zum Beispiel minimal schneller vergeht als im Tal. Die Physiker Joseph Hafele und Richard Keating bewiesen die Gravitations-Zeitdilatation 1971 mit Hilfe ihres Experiments, bei dem sie mit Caesium-Atomuhren an Bord eines Verkehrsflugzeuges die Erde einmal in westlicher und einmal in östlicher Richtung umkreisten, wobei darauf geachtet wurde, dass die Flughöhe annähernd gleich bleibt.<sup>39</sup> Dabei musste auf Grund der Geschwindigkeit des Flugzeugs auf die speziell-relativistische Zeitdilatation, die aufgrund von Geschwindigkeit entsteht und nicht wie die Gravitations-Zeitdilatation durch ein Gravitationsfeld, Rücksicht genommen werden.<sup>40</sup> Die erhaltenen Werte wurden anschließend in folgende Formel eingesetzt und mit den Werten einer weiteren Uhr am Boden verglichen:

$$\frac{d\tau_2}{d\tau_1} = \sqrt{\frac{1-r_s/r_2}{1-r_s/r_1}}$$

Dabei bezeichnen  $d\tau_2$  und  $d\tau_1$  die beiden Eigenzeitintervalle,  $r_s$  ist der Schwarzschildradius und  $r_1$  und  $r_2$  sind die gemessenen Zeiten der Uhren.<sup>41</sup> Im Zuge dieser Berechnungen kamen sei auf folgende Ergebnisse: Die Uhr, welche in Richtung Erdrotation flog, war um 59 Nanosekunden langsamer, während die Uhr, die gegen die Erdrotation flog, war um 273 Nanosekunden schneller als die Uhr am Boden.<sup>42</sup>

<sup>39</sup> Spektrum Akademischer Verlag: Hafele-Keating-Experiment. Spektrum, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/hafele-keating-experiment/6254> [Stand: 24.02.2023].

<sup>40</sup> Spektrum Akademischer Verlag: Gravitations-Zeitdilatation. Spektrum, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/gravitations-zeitdilatation/6104> [Stand: 24.02.2023]; Spektrum Akademischer Verlag, Zeitdilatation, Spektrum, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/zeitdilatation/15773> [Stand: 24.02.2023].

<sup>41</sup> Spektrum Akademischer Verlag: Gravitations-Zeitdilatation. Spektrum, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/gravitations-zeitdilatation/6104> [Stand: 24.02.2023].

<sup>42</sup> Edward G. Lake, Analyzing the „Twin-Paradox“, Independent Researcher, 09.07.2018, 5.

## 4 FAZIT

---

Abschließend kann gesagt werden, dass das Phänomen des Ereignishorizontes extrem komplex und schwer zu verstehen ist. Dennoch wird am Thema des Schwarzen Lochs weiterhin geforscht werden, um neue Erkenntnisse zu erlangen. Es werden Technologien und Methoden entwickelt, um diese außergewöhnlichen Objekte zu finden und Bilder von ihnen zu machen. Bisher weiß man, wie Schwarze Löcher entstehen können und welche Voraussetzungen dafür gegeben sein müssen. Auch Phänomene, die mit Schwarzen Löchern in Verbindung stehen, können mittlerweile erklärt und sogar für Astronomen nutzbar gemacht werden. So nutzen Astronomen zum Beispiel das Phänomen der Gravitationslinse, um Objekte zu beobachten, die von einem anderen Objekt verdeckt sind, indem sie das durch das vordere Objekt gekrümmte Licht beobachten, welches Doppelbilder des dahinterliegenden Objekts darstellt. Des Weiteren gibt es bereits Theorien zu der Frage der Zeitverlangsamung am Ereignishorizont. In dieser vorwissenschaftlichen Arbeit wird versucht eine dieser Theorien mit der Zeitdilatation zu erklären. Da neue Erkenntnisse in diesem Feld nicht im Rahmen einer vorwissenschaftlichen Arbeit liegen, soll dies bei den Wissenschaftler\*innen auf den Universitäten und Institutionen verbleiben. Diese Arbeit hat einen Überblick über das Thema gegeben, um der Leserschaft einen Einblick darüber zu verschaffen, mit welchen Aspekten sich die Fachwissenschaft auseinandersetzt.

## 5 LITERATURVERZEICHNIS

---

### Bücher:

- STILLERT, Alexandra: Allgemeine Relativitätstheorie und Schwarze Löcher. Eine Einführung für Lehramtsstudierende. Wiesbaden: Springer 2019.
- HANSLMEIER, Arnold: Einführung in Astronomie und Astrophysik. 4. Auflage. Berlin: Springer 2020.
- BAKER, Joanne: 50 Schlüsselideen Quantenphysik. Wiesbaden: Springer 2015.
- HAWKING, Stephen: Haben Schwarze Löcher keine Haare?. Zwei Vorträge. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt 2018.

### Arbeiten:

- Edward G. Lake, Analyzing the „Twin-Paradox“, Independent Researcher, 09.07.2018.

### Internetquellen:

- Abenteuer Universum: Schwarze Löcher-Seltsame Eigenschaften. URL: <https://abenteuer-universum.de/stersterne/bl4.html> [zuletzt abgerufen am 04.02,2023].
- ESO (2021): Watch stars move around the Milky Way's supermassive black hole in deepest images yet. URL: [zuletzt aufgerufen am 25.02.2023]
- FISCHER, Katarina (2022): Erstes Bild des Schwarzen Lochs im Herzen unserer Milchstraße. URL: <https://www.nationalgeographic.de/wissenschaft/2022/05/erstes-bild-des-schwarzen-lochs-im-herzen-unserer-milchstrasse> [zuletzt aufgerufen am 25.02.2023]
- FREISTETTER, Florian (2018): Der Mikrolinseneffekt. URL: <https://www.spektrum.de/podcast/der-mikrolinseneffekt/1731226> [zuletzt aufgerufen am 16.02.2023]
- GORFER, Alexander: Neutronensterne und Schwarze Löcher. Artikel 1: Sternentwicklung. URL: <https://quant.uni-graz.at/quant-module/neutronensterne-und-schwarze-loecher/33-neutronensterne-und-schwarze-loecher-artikel/24-artikel-1-neutronensterne-und-schwarze-loecher> [zuletzt aufgerufen am 04.02.2023]

- HERMANN, Kim (2020): Schwarze Löcher wurden lange nicht ernst genommen. URL: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze-loecher/schwarze-loecher-wurden-lange-nicht-ernst-genommen/> [zuletzt aufgerufen am 04.02.2023]
- Max-Planck-Gesellschaft: Neutronensterne. URL: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/forschung/fundamental/neutronensterne> [zuletzt aufgerufen am 04.02.2023]
- Max-Planck-Gesellschaft: Supernova. URL: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/526410/supernovae> [zuletzt aufgerufen am 04.02.2023]
- Max-Planck-Gesellschaft: Was ist Kernfusion?. URL: <https://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/fusion21/kernfusion/index> [zuletzt aufgerufen am 25.02.2023]
- MÜLLER, Andreas (2014): Einstein-Ring. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/einstein-ring/89> [zuletzt aufgerufen am 04.02.2023]
- MÜLLER, Andreas (2014): Gravitationslinse. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/gravitationslinse/154> [zuletzt aufgerufen am 04.02.2023]
- MÜLLER, Andreas (2014): Supernova. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/supernova/465> [zuletzt aufgerufen am 25.02.2023]
- MÜLLER, Andreas (2014): Weißer Zwerg. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/weisser-zwerg/525> [zuletzt aufgerufen am 04.02.2023]
- Futurezone (2022): Erstes frei treibendes Schwarzes Loch in der Milchstraße entdeckt. URL: <https://futurezone.at/science/schwarzes-loch-milchstrasse-microlensing-rogue-black-hole/401897147> [zuletzt aufgerufen am 16.02.2023]
- Spektrum Akademischer Verlag (2020): Wieso Pulsare strahlen. URL: <https://www.spektrum.de/news/wieso-pulsare-strahlen/1744246#:~:text=Die%20Drehung%20des%20Pulsars%20f%C3%BChrt,und%20wieder%20aus%20ihr%20herausbewegen> [zuletzt aufgerufen am 25.02.2023]

- Spektrum Akademischer Verlag: Dirac-Gleichung, Spektrum. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/dirac-gleichung/3140> [zuletzt aufgerufen am 04.02.2023]
- Spektrum Akademischer Verlag: Gravitations-Zeitdilatation. Spektrum, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/gravitations-zeitdilatation/6104> [zuletzt aufgerufen am 24.02.2023]
- Spektrum Akademischer Verlag: Hafele-Keating-Experiment. Spektrum, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/hafele-keating-experiment/6254> [zuletzt aufgerufen am 24.02.2023]
- Spektrum Akademischer Verlag, Lamb-Shift, Spektrum, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/lamb-shift/8724> [zuletzt aufgerufen am 04.02.2023]
- Spektrum Akademischer Verlag, Schwarzschild-Radius, Spektrum, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/schwarzschild-radius/12986> [zuletzt aufgerufen am 25.02.2023]
- Spektrum Akademischer Verlag, Zeitdilatation, Spektrum, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/zeitdilatation/15773> [zuletzt aufgerufen am 24.02.2023]
- Sternsucher: Kernfusion. Sternsucher.com, URL: <http://www.sternsucher.com/weltraum/astrophysik/201-kernfusion.html> [zuletzt aufgerufen am 04.02.2023]

#### Videos:

- ESO (2022), Unveiling Sgr A\*, the black hole at the centre of our galaxy ,(press conference, musical act, Q&A), Online unter, 2:53:01, 12.05.2022.

## 6 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

Abb. 1: Sagittarius A\*

Abb. 2: Bild von Sternen in der Nähe von Sagittarius A\*

Abb. 3: Bild des Schwarzen Lochs im Zentrum von M87

Abb. 4: Screenshot aus der Animation eines Schwarzen Lochs

Abb. 5: Die häufigste Art der Fusionsreaktion in der Sonne

Abb. 6: Das Schalenbrennen

Abb. 7: Verlauf einer Typ 1 Supernova

Abb. 8: Veranschaulichung der Gravitationslinse

Abb. 9: Bild eines Einsteinringes gemacht vom Hubble Space Telescope

Abb. 1: <https://eventhorizontelescope.org/blog/astronomers-reveal-first-image-black-hole-heart-our-galaxy> [abgerufen 24.02.2023]

Abb. 2: <https://www.eso.org/public/news/eso2119/> [abgerufen 24.02.2023]

Abb. 3: <https://www.eso.org/public/images/eso1907a/> [abgerufen 24.02.2023]

Abb. 4: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/nasa-visualization-shows-a-black-hole-s-warped-world> [abgerufen 24.02.2023]

Abb. 5: <http://www.sternsucher.com/weltraum/astrophysik/201-kernfusion.html>  
[abgerufen 24.02.2023]

Abb. 6: <https://quant.uni-graz.at/quant-module/neutronensterne-und-schwarze-loecher/33-neutronensterne-und-schwarze-loecher-artikel/24-artikel-1-neutronensterne-und-schwarze-loecher> [abgerufen 04.02.2023]

Abb. 7: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/star/supernova/2004/34/image/d/>  
[abgerufen 24.02.2023]

Abb. 8: <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Gravitationslinse.gif> [abgerufen 24.02.2023]

Abb. 9: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A\\_Horseshoe\\_Einstein\\_Ring\\_from\\_Hubble.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_Horseshoe_Einstein_Ring_from_Hubble.JPG) [abgerufen 24.02.2023]