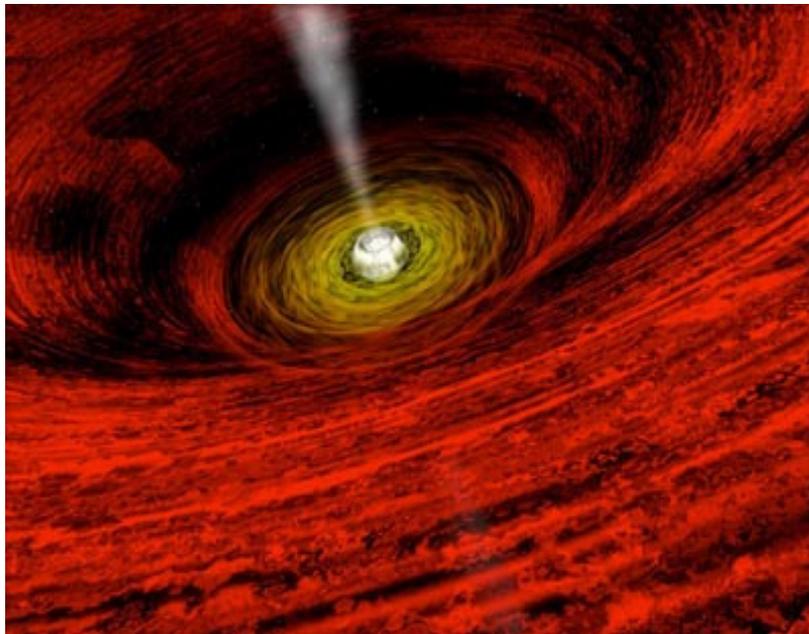


BG Zehnergasse Wiener Neustadt, Niederösterreich

*Entstehung und Eigenschaften
Schwarzer Löcher*



Fachbereichsarbeit aus Physik

VON

Cornelia Faustmann

Betreuung:

Fr. Mag. Gisela Schreiber

Wiener Neustadt, am 13. Februar 2004

Vorwort

„... Atome, Sterne, Galaxien,
Schwarzes Loch, erklär' es flink.
Ob Einsteins Raum gekrümmt genug,
dass Zeitmaschinen möglich sind.“¹

Wen interessieren sie nicht, diese exotischen Phänomene der Astrophysik, die Schwarzen Löcher? Lange wurden sie von den Wissenschaftlern als Humbug utopischer Gedankenspielerien abgetan. Kosmische Staubsauger, Wurmlöcher, die Zeitreisen ermöglichen, und alles vernichtende Todesstrudel: Vor allem in Science-Fiction-Filmen sind Schwarze Löcher allgegenwärtig.

So sind bei der bekannten Fernsehserie „Star Trek“ Wurmlochpaare Verbindungspunkte zwischen zwei weit entfernten Orten im Universum. Es sind Gebilde extrem hoher Masse, welche die Raumzeit so weit krümmen, dass ein Tunnel zwischen zwei Raumzeit-Koordinaten entsteht. Dabei kann man aber nicht nur den Raum, sondern auch die Zeit überwinden. Das wohl bekannteste stabile Wurmloch existiert in der Nähe der Raumstation „Deep Space Nine“ - es führt in den Gamma-Quadranten der Milchstraße. Wir bewegen uns auf der Oberfläche des in sich unendlich gekrümmten Universums. Eine Reise auf einem Großkreis um den „Mittelpunkt“ des Weltalls würde wesentlich mehr Zeit brauchen als die „Abkürzung“ durch das Wurmloch. Für einen Beobachter innerhalb dieses Bezugssystems erscheint es jedoch so, als verschwinde man an einer Stelle und tauche plötzlich an einem anderen, weit entfernten Ort wieder auf. Dieser Aspekt der Science-Fiction fasziniert mich besonders, da hierbei eine Vermischung von Realität und Phantasie stattfindet.

Manche Physiker - wie z. B. Stephen W. Hawking - halten Wurmlöcher für tatsächlich möglich, allerdings nicht in der Form, wie sie bei „Star Trek“ gezeigt werden. Vielmehr könnten es Verbindungen zwischen zwei Schwarzen Löchern sein, die man nicht durchqueren kann. Niemand weiß zwar wirklich, was passiert, wenn man in ein solches Schwarzes Loch fällt, aber alle sind sich einig darüber, dass man es nicht überleben würde. Es besteht ferner eine Theorie, dass Wurmlöcher nur in gänzlich andere Universen führen und nicht in unser eigenes zurück.

Doch was hat es mit diesen faszinierenden Phänomenen im Weltall, die den Astronomen immer noch jede Menge Rätsel aufgeben, in Wirklichkeit auf sich? Gibt es sie tatsächlich und ist ihre Existenz bewiesen, oder sind sie nur Gedankenkonstrukte, die auf mathematischen Gleichungen beruhen?

Vor allem ihre besonderen Auswirkungen auf Raum und Zeit, die man erst seit Einsteins Relativitätstheorie halbwegs erklären kann, sprengen unser Vorstellungsvermögen und lassen den Astrophysikern jede Menge Raum für Spekulationen. Vielleicht ist aber gerade unser Unwissen verantwortlich für unser Interesse.

¹ Jim AL-KHALILI: Schwarze Löcher, Wurmlöcher und Zeitmaschinen. ISBN 3-8274-1018-5. Heidelberg · Berlin: Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 2001, S 13.

Für mich waren Science-Fiction-Filme, wie die oben angeführte Fernsehserie „Star Trek“, aber auch viele Bücher, die ich wegen meines Interesses für Astrophysik zu diversen Anlässen geschenkt bekam, der Anreiz, mich näher mit Schwarzen Löchern und den zahlreichen Fragen zu diesen Phänomenen zu befassen und schließlich eine Fachbereichsarbeit über diese Thematik zu verfassen. Es entwickelte sich bei mir fast eine Art Suchtverhalten, möglichst viel über den aktuellen Stand der Forschungen zu erfahren, was dazu führte, dass unsere Internet-Pauschale öfters überzogen war, und ich bis Jänner 2004 mein Taschengeld in Zeitschriften, die Abhandlungen über Schwarze Löcher veröffentlichten, investierte.

Schließlich möchte ich an dieser Stelle meiner Familie und all jenen herzlich danken, die mich bei meiner Arbeit direkt oder indirekt unterstützt haben. Insbesondere gilt mein Dank meiner Physik-Professorin, Fr. Mag. Gisela Schreiber, die durch ihren interessanten Unterricht meine Freude am Fach Physik geweckt und mich bestärkt hat, eine Fachbereichsarbeit über Schwarze Löcher zu verfassen. Auch der ausgezeichneten Betreuung und den vielen konstruktiven Gesprächen, die sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, gilt mein Dank.

Wiener Neustadt, Februar 2004

Cornelia Faustmann

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	6
2. DIE ENTWICKLUNG DER STERNE	7
2.1 DIE ENTSTEHUNG EINES STERNS	7
2.2 DIE HAUPTREIHENSTERNE	8
2.3 DIE ALTERSPHASE DER STERNE	12
2.4 DER ZUSAMMENBRUCH EINES STERNS	13
3. STRUKTUREN IM KOSMOS	15
3.1 DAS MASSEN-RADIEN-DIAGRAMM	15
3.2 WEIßE ZWERGE	16
3.3 NEUTRONENSTERNE	17
3.4 SCHWARZE LÖCHER	18
4. UNSICHTBARE STERNE.....	20
4.1 BEGINN DER FORSCHUNG AN SCHWARZEN LÖCHERN	20
4.2 CHANDRASEKHARS ERKENNTNISSE	22
4.3 OPPENHEIMERS RELATIVISTISCHE ERKLÄRUNG	23
5. EIGENSCHAFTEN SCHWARZER LÖCHER.....	24
5.1 SCHWARZSCHILD-RADIUS UND EREIGNISHORIZONT	24
5.2 DIE SINGULARITÄT	25
5.3 DIE AKKRETIONSSCHEIBE	27
5.4 MATERIEJETS	29
5.5 ROTIERENDE SCHWARZE LÖCHER.....	29
5.6 DIE BEDEUTUNG DER THERMODYNAMIK	31
5.7 DIE „HAWKING-STRAHLUNG“	34
5.8 VERDAMPFUNG DURCH TEILCHENEMISSIONEN	37
5.9 DAS ENDE EINES SCHWARZEN LOCHS.....	38
5.10 DER NACHWEIS SCHWARZER LÖCHER	39
5.11 VERSCHIEDENE TYPEN VON SCHWARZEN LÖCHERN	40
5.12 HÄUFIGKEITEN SCHWARZER LÖCHER	42
6. KOLLISIONEN SCHWARZER LÖCHER.....	44
6.1 DIE SIMULATION AM SUPERCOMPUTER.....	44
6.2 DIE EMISSION VON GRAVITATIONSWELLEN	44
6.3 DAS ZWEI-KÖRPER-PROBLEM	45
6.4 DAS PROBLEM DER SINGULARITÄTEN	47
6.5 BRILLWELLEN	48
7. ERKLÄRUNG DER SCHWARZEN LÖCHER DURCH DIE RELATIVITÄTSTHEORIE	49
7.1 GRUNDLAGEN DER RELATIVITÄTSTHEORIE.....	49
7.2 ANWENDUNG DER ALLGEMEINEN RELATIVITÄTSTHEORIE AUF SCHWARZE LÖCHER	52
7.3 HORIZONTERWEITERUNG DURCH DIE RELATIVITÄTSTHEORIE.....	54

8. DER HYPOTHETISCHE STURZ IN EIN SCHWARZES LOCH	56
8.1 GRAVITATION, RAUM UND ZEIT	56
8.2 DIE KOSMISCHE ZENSUR	57
8.3 INNERE UND ÄUßERE BEOBACHTUNGEN	59
8.4 WURMLÖCHER UND ZEITREISEN	60
8.5 WEIBE LÖCHER.....	62
9. SCHLUSS.....	64
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	65
LITERATURVERZEICHNIS	67
ANHANG A	70
ANHANG B	71

1. Einleitung

Die moderne Astrophysik von heute erforscht im Gegensatz zu früher nicht mehr nur Planeten, Kometen, Sterne oder Galaxien, vielmehr beschäftigt sie sich auch intensiv mit Weißen Zwergen, Roten Riesen und Schwarzen Löchern. Bis zu den sechziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts wurde die reale Existenz von Schwarzen Löchern noch bezweifelt, obwohl diese schon lange theoretisch - basierend auf der Allgemeinen Relativitätstheorie - prognostiziert wurden. Die in den nachfolgenden Jahrzehnten erzielten Fortschritte in der theoretischen Physik der Schwarzen Löcher sowie in der Röntgen- und Radioastronomie, wie die Entdeckung von Pulsaren, Quasaren und der kosmischen Hintergrundstrahlung, lassen aktuell keine Zweifel mehr über die Existenz von Schwarzen Löchern aufkommen.

Die vorliegende Arbeit soll den Stand der heutigen Forschung widerspiegeln und ist gemäß obiger Ausführungen entsprechend aufgebaut. Da die Sternentwicklung sowie entsprechende Strukturen im Kosmos bei der Entstehung von Schwarzen Löchern eine große Rolle spielen, ist der erste Teil der Fachbereichsarbeit diesen Themen gewidmet. Im Anschluss daran werden die Beobachtungsmöglichkeiten und Eigenschaften dieser Phänomene näher dargelegt, wobei auch die Aspekte des Ablebens und Aufeinandertreffens von Schwarzen Löchern behandelt werden. Zum Abschluss wird auf die Erklärungsmöglichkeiten durch die Relativitätstheorie näher eingegangen, wobei der hypothetische Sturz eines Astronauten in ein Schwarzes Loch den relativistischen Ansatz sowie die physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Auswirkungen der theoretischen Physik der Schwarzen Löcher illustriert.

Zur besseren Lesbarkeit der Arbeit ist im Anhang A eine Tabelle der öfters verwendeten Formelzeichen und Konstanten zusammengestellt, wobei auf die Erklärung der SI-Einheiten dort verzichtet wird. Außerdem ist am Ende der Arbeit ein Abbildungsverzeichnis angefügt, wo die genauen Bildquellen, die dann nicht direkt im Text zitiert werden, zu finden sind. Zur multimedialen Illustration ist im Anhang B eine CD beigelegt, auf der interessante Audio- und Video-Dateien enthalten sind.

2. Die Entwicklung der Sterne

Bis zur Entdeckung der Kernenergie wurde vermutet, dass jeder Stern sein Leben als Roter Riese beginnt und durch Abgabe von Strahlung, die aus dem Gewinn von Gravitationsenergie resultiert, dann allmählich kleiner wird. Es wurde angenommen, dass sich der Stern dadurch zunächst zu einem Hauptreihenstern entwickelt und schließlich zum Weißen Zwerg wird. Diese Vermutung entsprach jedoch nicht den Beobachtungen, und die Rechnungen zeigten, dass ein derartiges Sternenleben nur wenige Millionen Jahre dauern könnte. Die Astrophysik des zwanzigsten Jahrhunderts hat diese Vorstellung völlig verändert.

2.1 Die Entstehung eines Sterns

In der Wärmelehre wird erklärt, dass jedes Gas unter Laborbedingungen das ihm zur Verfügung stehende Volumen gleichmäßig ausfüllt. Die großen Gaswolken im Kosmos neigen aber dazu, sich zusammenzuziehen und einen Stern zu bilden. Die weiteren Ursachen, die zur Geburt eines Sterns führen, werden nachfolgend skizziert.

Bei der Temperatur T hat ein Molekül der Gaswolke die mittlere kinetische Energie $\frac{3}{2}kT$.

Bei tiefen Temperaturen erreichen die meisten Moleküle nicht die zum Entweichen aus der Gaswolke notwendige Fluchtgeschwindigkeit, sondern fallen unter der Wirkung der Gravitationskraft wieder zurück. Unter der Fluchtgeschwindigkeit versteht man die minimale Geschwindigkeit, die ein Objekt benötigt, um die Gravitationskraft eines Himmelskörpers verlassen zu können. Schießt man ein Objekt mit mindestens der Fluchtgeschwindigkeit nach oben, so reicht die Schwerkraft nicht aus, um dieses vollständig abzubremsen. Die Fluchtgeschwindigkeit wird aus der kinetischen Energie und der Fluchtenergie berechnet, wobei die Bewegungsenergie mindestens gleich der Fluchtenergie sein muss.

Die Gaswolke breitet sich dann nicht im Raum aus, sondern zieht sich zusammen. Ein Stern entsteht, falls die Beziehung

$$\frac{3}{2}kT < \frac{GmM}{R} \quad (\text{F. 2.1.1})$$

erfüllt ist. Aus der obigen Ungleichung folgt für ein Gas mit der Dichte ρ :

$$\frac{3}{2}kT < \frac{Gm}{R} \left(\frac{4\pi}{3} \rho R^3 \right), \quad (\text{F. 2.1.2})$$

und somit gilt:

$$R > \sqrt{\frac{9kT}{8\pi Gm\rho}}. \quad (\text{F. 2.1.3})$$

Falls der Radius einer Gaswolke diesen Wert überschreitet, so zieht sich die Gaswolke zusammen, und Sterne entstehen.

Zur Veranschaulichung wird die Berechnung des Radius für interstellaren Wasserstoff mit $T = 110 \text{ K}$, $m = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, $\rho = 10^{-20} \text{ kg/m}^3$ angeführt:

$$R > 6,9 \cdot 10^{17} \text{ m.} \quad (\text{F. 2.1.4})$$

Aus einer großen Wolke interstellaren Gases entsteht eine Assoziation von Sternen. Seit einigen Milliarden Jahren findet dieser Vorgang im Universum statt und wird auch heute noch in unserer Galaxie beobachtet.²

2.2 Die Hauptreihensterne

Bei der Kontraktion der Gaswolken, die einige Millionen Jahre dauert, heizt sich das Gas auf, da die Moleküle im Gravitationsfeld fallen, und bei Zusammenstößen wird diese Bewegung in ungeordnete thermische Bewegung umgewandelt. Diese Kontraktion kommt zum Stillstand, wenn die Kernreaktionen im Inneren der Gaswolke beginnen, und ein Stern leuchtet auf. Damit im Sternenzentrum Kernreaktionen einsetzen, muss die Sternmasse mindestens ein Hundertstel der Sonnenmasse betragen. Liegt sie darunter, so kühlt der Stern allmählich aus und wird zu einem planetenähnlichen Körper - zu einem Schwarzen Zwerg.

Wenn der Gasdruck im Inneren des Sterns der Gravitation das Gleichgewicht hält, dann ist dieser stabil. Der Druck im Mittelpunkt des Sterns kann leicht abgeschätzt werden, indem das Gewicht einer Gassäule von 1 m^2 Querschnitt und der Länge R bestimmt wird. Diesem Gewicht muss der Gasdruck P das Gleichgewicht halten:

$$P \cong \left(\frac{GM}{R^2} \right) (\rho R) = \frac{GM\rho}{R}, \text{ also } \frac{P}{\rho} \cong \frac{GM}{R}. \quad (\text{F. 2.2.1})$$

Das Ergebnis ist nur näherungsweise gültig, weil die Dichte ρ des Sterns als konstant angenommen und als Gravitationskraft der Wert an der Oberfläche in der Berechnung verwendet worden ist. In derselben Näherung darf P als mittlerer Druck im Stern betrachtet werden, der mit Hilfe der Zustandsgleichung für ein ideales Gas berechnet werden kann:

$$PV = NkT. \quad (\text{F. 2.2.2})$$

Führt man statt des Volumens V die Dichte $\rho = Nm/V$ ein, so folgt durch Einsetzen in die Gleichgewichtsbedingung:

$$\frac{P}{\rho} = \frac{kT}{m} \approx \frac{GM}{R}, \text{ bzw. } kT \approx \frac{GMm}{R}. \quad (\text{F. 2.2.3})$$

² vgl. SEXL-RAAB-STREERUWITZ: PHYSIK Teil 3B. ISBN 3 8000 6242 9. Wien: Verlag Carl Ueberreuter, 1978, S 84.

Dies stimmt mit den früheren Überlegungen überein. Der Stern fliegt auseinander, falls die kinetische Energie der Moleküle zu groß ist. Ist diese Molekularenergie zu klein, so fällt der Stern zusammen.

Damit kann die Temperatur im Inneren der Sterne abgeschätzt werden. Für die Sonne erhält man

$$T \cong \frac{GmM}{kR} = 2,3 \cdot 10^7 \text{ K.} \quad (\text{F. 2.2.4})$$

„Die hohen Temperaturen im Sterninnern werden durch Kernfusion aufrechterhalten. In Reaktionsketten wird dabei Wasserstoff in Helium umgewandelt („Wasserstoffbrennen“).

Die Kernreaktionen im Inneren eines Sternes sind deswegen kompliziert, weil vier Nukleonen zum Aufbau eines Heliumkernes erforderlich sind. Ein gleichzeitiger Zusammenstoß von vier Teilchen an einem Punkt ist ein höchst unwahrscheinlicher Vorgang, deshalb muß der Heliumkern schrittweise aufgebaut werden. Je nach Temperatur im Sterninneren dienen dazu zwei verschiedene Zyklen.“³

Bei kühlen Sternen überwiegt der Proton-Proton-Zyklus, der aus drei Einzelketten besteht, als wichtigster Prozess im nuklearen Brennen der Sterne.

Das Wasserstoffbrennen, die erste nukleare Brennphase, in der die Umwandlung von Wasserstoff zu Helium erfolgt, wird nun ausführlich erläutert:

Die wichtigste Kette ist die p-p-I-Kette mit 85,99% Häufigkeit, es folgen die p-p-II-Kette mit 13,99% und die p-p-III-Kette mit 0,02%. Alle drei Ketten haben folgende Ausgangsreaktion:



Da wegen der kurzen mittleren Lebensdauer der Neutronen von ungefähr 15 Minuten in den Sternen auf Dauer keine Neutronen vorhanden sind, muss zur Erzeugung des nächstschwereren Elements ein Proton in ein Neutron umgewandelt werden. Diese Reaktion kann nur durch die schwache Wechselwirkung vor sich gehen. Es werden dabei Positronen (e^+) und Neutrinos (ν) gebildet.

Die nächste Reaktion lautet



Dies erfolgt aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung, dabei werden hochenergetische Photonen (γ -Quanten) ausgesandt. Mit der Vernichtung des ${}^3\text{He}$ -Kerns durch Fusion von vier Protonen zu ${}^4\text{He}$ wird die p-p-I-Kette beendet:



Sobald genügend ${}^4\text{He}$ vorhanden ist, kann das ${}^3\text{He}$ auch durch folgende Reaktion vernichtet werden:



³ SEXL: Physik, S 84.

(nach alter Rechtschreibung zitiert; neue Rechtschreibung: muss)

Diese Reaktion ist der Ausgangspunkt für die Fortsetzung der p-p-II- und der p-p-III-Kette. Im Inneren der Sterne sind die Atome fast vollständig ionisiert, daher muss ein freies Elektron außerhalb des Atomkerns eingefangen werden:



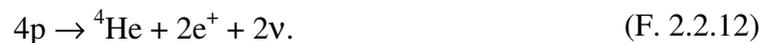
Dieses erzeugte ${}^7\text{Li}$ wird ziemlich rasch durch die Reaktion



mittels Aussendung von α -Strahlen (He-Kernen) vernichtet. Durch diese Reaktion wird die p-p-II-Kette beendet und das restliche nicht verbrannte ${}^7\text{Be}$ wird durch die Reaktion



verbraucht. Dieses entstandene ${}^8\text{B}$ zerfällt durch den β^+ -Zerfall, wodurch sich schließlich zwei ${}^4\text{He}$ -Kerne ergeben. Das Nettoergebnis der p-p-Kette lautet somit:



Folgende Tabelle gibt einen zusammenfassenden Überblick über das Wasserstoffbrennen:

Reaktion			Lebensdauer der Nukleonen
$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$			$p \sim 9 \cdot 10^9$ Jahre
$p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$			$d \sim 1,6$ Sekunden
p-p-I-Kette	${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$		${}^3\text{He} \sim 2,2 \cdot 10^5$ Jahre
	p-p-II-Kette	p-p-III-Kette	
		${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$	
	${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu$	${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu$	${}^7\text{Be} \sim 0,33$ Jahre
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow p + p + {}^4\text{He}$	${}^7\text{Li} + p \rightarrow \alpha + \alpha$	${}^8\text{Be}^* \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$	${}^7\text{Li} \sim 10^{-5}$ Sekunden
$Q_{\text{eff}} = 26,20$ MeV	$Q_{\text{eff}} = 25,66$ MeV	$Q_{\text{eff}} = 19,17$ MeV	

Tabelle 2.2.1: Das Wasserstoffbrennen

Unter dem Q-Wert einer Reaktion versteht man die Differenz der Massen der beteiligten Kerne vor und nach der Reaktion, bzw. die bei der Reaktion verbrauchte oder freigewordene Energie. „In allen drei Teilketten wird der gleiche Q-Wert von $Q = 26,73$ MeV erzielt. Neutrinos verlassen auf Grund ihrer geringen Wechselwirkung die Sonne und bewegen sich ungehindert durch die Sonnenhülle. Sie können daher nicht zur Energieproduktion im Stern beitragen und müssen vom Q-Wert abgezogen werden, wenn die Energieerzeugungsraten betrachtet werden. Der Q-Wert, welcher den Energieverlust durch Neutrinos berücksichtigt, wird als effektiver Q-Wert Q_{eff} bezeichnet.“⁴

⁴ Heinz OBERHUMMER: Kerne und Sterne: Einführung in die nukleare Astrophysik. ISBN 3-335-00319-5. Leipzig: Barth, 1993, S 117.

Das Wasserstoffbrennen besteht neben der p-p-Kette auch aus dem CNO-Zyklus, in dem ebenfalls vier Protonen in vier Teilzyklen in ${}^4\text{He}$ umgewandelt werden. Dieser Zyklus beginnt und endet auch wieder mit ${}^{12}\text{C}$. Die ${}^{12}\text{C}$ -Kerne dienen hier als Katalysatoren und sind die Basis für die einzelnen Teile des Kreislaufes. Im ersten Teil werden N und O gebildet und in den weiteren Zyklen entstehen F, O und Ne. Die instabilen Elemente N, O und F werden schließlich wieder zu ${}^{12}\text{C}$ umgewandelt, sodass ein neuer Zyklus ablaufen kann. Es sind auch noch weitere Zyklen, wie der NeNa- und der MgAl-Zyklus möglich. Diese sind für die Energieerzeugung in den Sternen relativ unwichtig, haben aber eine große Bedeutung für die Nukleosynthese der Elemente ${}^{20}\text{Ne}$ bis ${}^{27}\text{Al}$.⁵

„In jeder Sekunde werden im Inneren der Sonne $6,7 \cdot 10^{11}$ kg Wasserstoff verarbeitet, wobei die entstehenden Heliumkerne wegen des Massendefektes eine um $4,2 \cdot 10^9$ kg geringere Masse aufweisen. Pro Sekunde werden dabei $4 \cdot 10^{26}$ J frei und in Form von Strahlung in den Weltraum abgegeben. Die Masse der Sonne reicht aus, um das Wasserstoffbrennen etwa 10 Milliarden Jahre lang aufrechtzuerhalten. In dieser Zeit verbleibt die Sonne auf der Hauptreihe.“⁶

Im **Hertzsprung-Russell-Diagramm** wird der Zusammenhang zwischen Temperatur und Gesamtstrahlung eines Sterns dargestellt. Dem überwiegenden Teil der Sterne entsprechen in diesem Diagramm Punkte. Die Hauptreihe ist ein Band von links oben nach rechts unten - die Sterne in dieser Region werden als „Normalsterne“ bezeichnet. Hier sind im linken oberen Bereich die sehr heißen und leuchtkräftigen Sterne zu finden, wobei rechts unten die schwach leuchtenden und kühleren Sterne angeordnet sind. Die Strahlung steigt mit zunehmender Temperatur, und die Sterne von höherer Oberflächentemperatur sind größer als jene mit relativ geringer Temperatur. Jedoch sind die Größenunterschiede innerhalb der Hauptreihe nicht sehr beträchtlich: Die Radien dieser Sterne betragen das 0,5- bis 7-fache des Sonnenradius. Darüber hinaus ist oben rechts die Gegend der kühlen und leuchtstarken „Riesen“, während die Weißen Zwerge, die heiß und leuchtschwach sind, links unten liegen.

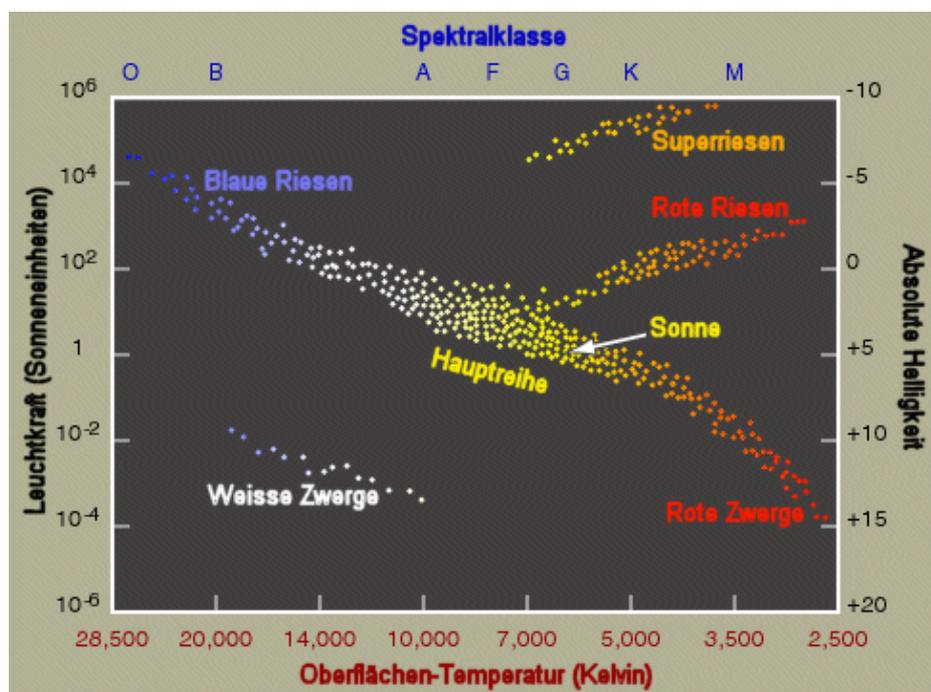


Abbildung 2.2.1: Das Hertzsprung-Russell-Diagramm

⁵ vgl. Heinz OBERHUMMER: Kerne und Sterne: Einführung in die nukleare Astrophysik, S 116-119.

⁶ SEXL: Physik, S 84, 85.

In den Hauptreihensternen findet Wasserstoffbrennen statt. Dabei ergeben sich jedoch sehr unterschiedliche Lebensdauern. So reicht beispielsweise der Wasserstoffvorrat eines Sternes von 50 Sonnenmassen, der etwa die 10^5 -fache Leuchtkraft der Sonne hat, nur für eine Brenndauer von einigen Millionen Jahren. Die heute auf der Hauptreihe beobachtbaren Sterne mit großer Masse können sich daher erst vor relativ kurzer Zeit gebildet haben, was bestätigt, dass in unserer Galaxie laufend neue Sterne entstehen.⁷

2.3 Die Altersphase der Sterne

Wenn das Zentrum eines Sterns dicht und heiß genug wird, beginnt eine neue Entwicklungsphase im Leben des Himmelskörpers. Diese setzt ein, sobald ungefähr 10% des Wasserstoffvorrats des Sterns verbraucht sind. Die Fusion des Wasserstoffs geht nun nicht mehr im Zentrum, sondern in einer weiter außen liegenden Schicht vor sich, da im Inneren dieses Element nicht mehr vorhanden ist. Im Zentrum dient nun das schwere Helium zur Verbrennung. Da durch das Fehlen des Wasserstoffs kein Druck nach außen mehr herrscht, zieht sich das Sterninnere zusammen und die Temperatur steigt (siehe auch Kapitel 2.4). Das Heliumbrennen kann unter gewissen Bedingungen schlagartig einsetzen und von Explosionen, die als Heliumblitze bezeichnet werden, begleitet werden. Es erfolgt nur, wenn die Masse des Sterns mindestens eine halbe Sonnenmasse beträgt, da sonst die notwendigen Temperaturen nicht erreicht werden. Der Stern bläht sich in den äußeren Regionen aufgrund des größeren Strahlungsdrucks infolge des Heliumbrennens auf und wird zu einem Roten Riesen. Im Zentrum des Roten Riesen steigt die Temperatur wegen der Heliumverbrennung weiter an. Bei diesem Vorgang findet eine Kernreaktion nicht, wie sonst üblich zwischen zwei, sondern zwischen drei Atomkernen statt:



Das Nettoergebnis dieses Tripel-Alpha-Prozesses ist der Verbrauch von drei α -Teilchen, was aber nur deswegen stattfinden kann, weil die Reaktion von ${}^8\text{Be}$ mit dem α -Teilchen bei den Energien des Heliumbrennens in Roten Riesen eine ausgeprägte Resonanz besitzt. Andererseits könnte keine nennenswerte Menge von Kohlenstoff beziehungsweise von allen schwereren Elementen entstehen. Der Tripel-Alpha-Prozess wurde aufgrund des Vorhandenseins von Kohlenstoff in unserem Universum schon lange vorausgesagt, konnte aber erst im Jahre 1957 im Labor durch Zerfall von angeregtem ${}^{12}\text{C}$ in drei α -Teilchen nachgewiesen werden. Dies war damals für alle Skeptiker ein Beweis, dass die Nukleosynthese im frühen Universum und in den Sternen stattfand. Weiters liefert diese Resonanz ein Beispiel dafür, dass die Naturkonstanten und Wechselwirkungen so fein abgestimmt sind, dass somit Elemente und Strukturen sowie Lebewesen in unserem Kosmos gebildet werden können. Im Universum existiert etwas mehr Sauerstoff als Kohlenstoff. Die Reaktionsrate für die Entstehung von Sauerstoff darf aber nicht zu groß sein, da sonst der erzeugte Kohlenstoff wieder völlig vernichtet werden würde.

In Sternen, die bis zu etwa acht bis zehn Sonnenmassen besitzen, werden die Temperaturen für die weiteren nuklearen Brennphasen nicht erreicht - das nukleare Brennen hört daher auf.

⁷ vgl. SEXL: Physik, S 85.

Solche Sterne sprengen ihre äußere Hülle ab, fallen durch die Schwerkraft zusammen und werden schließlich zu Weißen Zwergen (siehe Kapitel 3.2).⁸



Abbildung 2.3.1: Eine künstlerische Darstellung eines Roten Riesen

2.4 Der Zusammenbruch eines Sterns

Für Sterne mit Massen größer als acht Sonnenmassen folgen nach dem Heliumbrennen das Kohlenstoff-, Neon-, Sauerstoff- und Siliziumbrennen sowie im Endstadium schließlich das explosive Brennen. Wenn der Brennstoff einer nuklearen Brennphase nahezu erschöpft ist, wird der nach außen gerichtete thermische Druck viel schwächer und das Sterninnere kontrahiert so lange, bis durch die Aufheizung des Zentrums die nächste nukleare Brennphase einsetzt. Die vorige Brennphase wird nun weiter außen fortgesetzt. Die Eigenschaften der fortgeschrittenen nuklearen Brennphasen bestimmen die Weiterentwicklung des Sterns und erzeugen die schweren Elemente bis zur Massenzahl 56. Je schwerer die Atomkerne sind, desto größer muss die Temperatur werden, damit Kernfusionsreaktionen stattfinden können. Nur bei hoher kinetischer Energie der Teilchen kann die abstoßende Kraft (*Coulombbarriere*) zwischen den Atomkernen überwunden werden. Die Nukleosynthese hört durch Reaktionen zwischen geladenen Teilchen für Elemente schwerer als Eisen, das eine Massenzahl von 56 hat, auf. Im Inneren eines hinreichend massereichen Sterns entsteht durch das Siliziumbrennen ein Eisen-Nickel-Kern. Der Stern besitzt eine Schalenstruktur, wobei vom Kern nach außen in dünnen konzentrischen Schalen die einzelnen Brennphasen angeordnet sind.

⁸ vgl. Heinz OBERHUMMER: Kerne und Sterne: Einführung in die nukleare Astrophysik, S 120.



Abbildung 2.4.1: Die nuklearen Brennphasen (Schalenbrennen) in massereichen Sternen

Sobald kein Brennen mehr stattfindet und daher kein Strahlungsdruck nach außen dem Gravitationsdruck standhalten kann, beginnt der Stern zu kollabieren. Durch den Kollaps des Eisen-Nickel-Kerns entsteht eine nach außen gerichtete Stoßwelle, sodass die äußeren Schalen des Sterns weggeschleudert werden. Man spricht dann von einer Supernova vom Typ II. Im Zentrum des Sterns vereinigen sich Elektronen mit Protonen unter dem Druck der Schwerkraft und bilden Neutronen. Falls diese einer weiteren Kontraktion widerstehen können, bildet sich ein Neutronenstern (siehe Kapitel 3.3). Ist die Masse so groß, dass auch der Neutronendruck überwunden wird, entsteht ein Schwarzes Loch.⁹

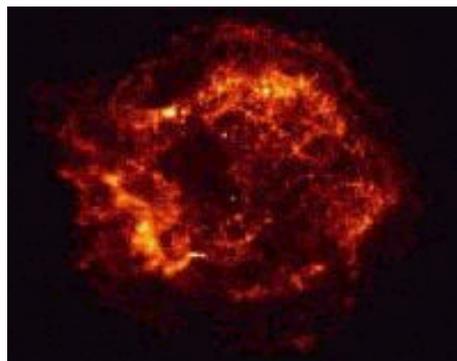


Abbildung 2.4.2: Die Supernova Cassiopeia A

⁹ vgl. Heinz OBERHUMMER: Kerne und Sterne: Einführung in die nukleare Astrophysik, S 71-72.

3. Strukturen im Kosmos

3.1 Das Massen-Radien-Diagramm

Ein Überblick über die Vielfalt der Körper im Universum kann durch das Massen-Radien-Diagramm erhalten werden, in dem u. a. alle bisher behandelten Objekte eingetragen sind. Da viele Größenordnungen das einzelne Atom vom Stern trennen, scheint es sinnvoll, einen logarithmischen Maßstab zu verwenden.

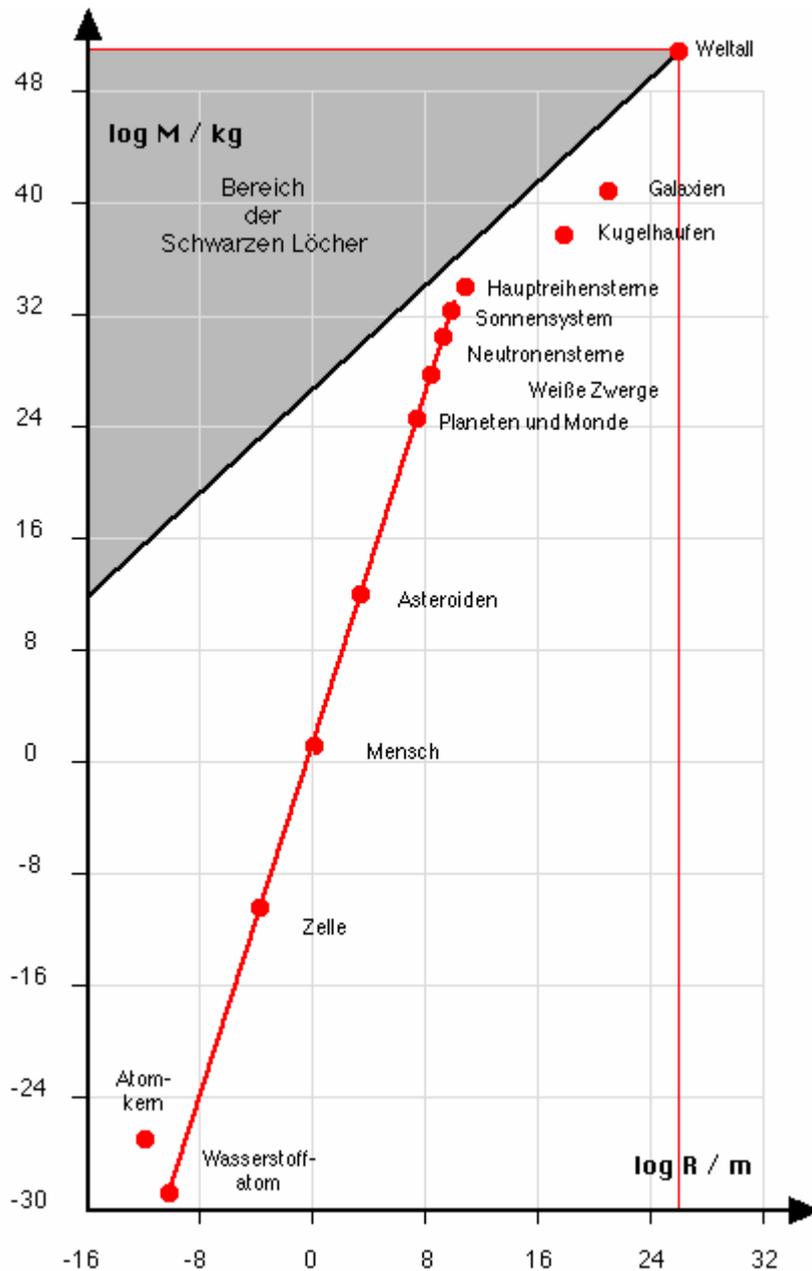


Abbildung 3.1.1: Das Massen-Radien-Diagramm

In diesem Diagramm sind die Hauptreihensterne mit den Massen zwischen 10^{28} kg und 10^{32} kg und den Radien zwischen 10^{11} m und 10^{13} m zu finden.¹⁰

3.2 Weiße Zwerge

In Sternen, die bis zu etwa 8 bis 10 Sonnenmassen besitzen, wird nach dem Ende des nuklearen Brennens die äußere Hülle abgesprengt. Wegen der Gravitationsanziehung kontrahiert der restliche Teil des Himmelskörpers, sodass er eine besonders hohe Dichte und Temperatur aufweist. Dieser Stern wird schließlich durch den nach außen wirkenden Druck der Elektronen stabilisiert und erreicht so seinen Endzustand als Weißer Zwerg mit einem Radius von einigen tausend Kilometern und einer Dichte von Hunderten von Tonnen pro Kubikzentimeter.



Abbildung 3.2.1: Ein Weißer Zwerg inmitten des ringförmigen planetaren Nebels Shapley 1

Es kann eine große Zahl solcher Weißer Zwerge beobachtet werden. Als einer der ersten, die entdeckt wurden, gilt ein Objekt, das den hellsten Stern am Nachthimmel, den Sirius, umkreist.

Die hohe Dichte bei Weißen Zwergen beweist, dass in ihnen die Atome unter der Wirkung der Gravitation auf ein Hundertstel ihres üblichen Radius komprimiert wurden, wodurch jedem Elektron nur äußerst wenig Platz zur Verfügung steht. Nach der de-Broglie-Beziehung nehmen deshalb sein Impuls und seine kinetische Energie stark zu, weshalb energiereiche Elektronen entstehen, die dann für den hohen Druck im Sterninneren verantwortlich sind. Weil dieser Druck von der Temperatur unabhängig und eine Folge der Quantenphysik ist, bleibt ein Weißer Zwerg auch dann stabil, wenn er seine vorhandene thermische Energie vollständig abgegeben hat. Er kühlt dabei allmählich ab und bleibt schließlich als ausgebrannter Stern im Weltall zurück.¹¹

Der Elektronendruck kann der Schwerkraft nur bis zur *Chandrasekhar-Grenze* (siehe Kapitel 4.2), $M = 1,4 M_{\odot}$, das Gleichgewicht halten. Größere Massen können durch den Elektronendruck nicht stabilisiert werden.

¹⁰ vgl. SEXL: Physik, S 86.

¹¹ vgl. SEXL: Physik, S 87.

3.3 Neutronensterne

In massereichen Sternen nimmt die Dichte der Materie zu, bis die Energie der Elektronen ausreicht, um aus Elektron und Proton ein Neutron entstehen zu lassen:



Durch diesen „inversen β -Zerfall“ werden die Elektronen allmählich aufgebraucht. Die gesamte Sternmaterie wird in ein Neutronengas umgewandelt und ein Neutronenstern mit der Größenordnung von ungefähr einer Sonnenmasse entsteht.

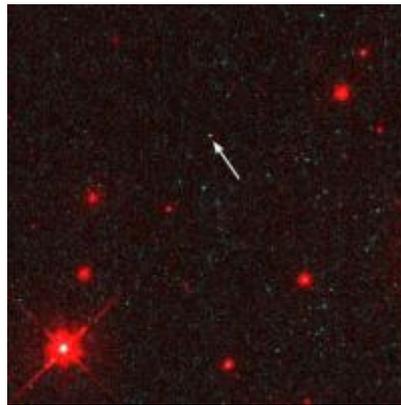


Abbildung 3.3.1: Ein einzeln stehender Neutronenstern

Dieser wurde mit dem Hubble-Teleskop in sichtbarem Licht aufgenommen.

Aufgrund des starken Magnetfeldes $B \approx 10^8$ Tesla der Neutronensterne können diese im All entdeckt werden. In einem solchen Magnetfeld bewegen sich geladene Teilchen auf Spiralbahnen und emittieren dabei Synchrotronstrahlung, die mit Radioteleskopen und bei manchen Neutronensternen auch mit optischen Teleskopen beobachtbar ist. Bei der Entstehung eines Neutronensternes verkleinert sich der Radius eines Sternes von rund 10^6 Kilometern auf etwa 10 Kilometer. Da der Drehimpuls erhalten bleiben muss, beginnt der Stern, der ursprünglich in einigen Tagen einmal um seine Achse rotierte, sich immer rascher zu drehen, wodurch sich Rotationsperioden ergeben können, die nur Bruchteile einer Sekunde betragen. Da sich das Magnetfeld gemeinsam mit dem Stern dreht, überstreicht der Leuchtfinger der Synchrotronstrahlung den Himmel mit der Periode der Drehbewegung. Die Neutronensterne können also durch ihre pulsierende Strahlung lokalisiert werden, weshalb sie auch Pulsare genannt werden.

Der wohl bekannteste Pulsar befindet sich im Zentrum des Krebsnebels, der im Jahre 1054 bei einer von chinesischen Astronomen beobachteten Supernova-Explosion entstand. Ein Sternenkollaps führte hier zu einem Neutronenstern, der sich 33-mal pro Sekunde um seine Achse dreht und dabei Radiowellen sowie sichtbares Licht abgibt.¹²

¹² vgl. SEXL: Physik, S 87-88.



Abbildung 3.3.2: Der Krebsnebel

Im Inneren befindet sich der bei einer Supernova-Explosion entstandene Neutronenstern. Obwohl die Supernova schon mehr als 900 Jahre alt ist, expandiert der Krebsnebel immer noch.

3.4 Schwarze Löcher

Wenn ein Stern mit einer größeren Masse als 10 Sonnenmassen kollabiert, so kann der Druck der Neutronen der Gravitation nicht mehr das Gleichgewicht halten und der Kollaps des Sterns wird nicht mehr aufgehalten. **Ein Schwarzes Loch entsteht.** Der Stern fällt immer weiter in sich zusammen, bis er schließlich fast punktförmig wird. Dieser Zusammenbruch kann nicht bis zum Ende verfolgt werden. Die Fluchtgeschwindigkeit, die zum Verlassen der Sternoberfläche erforderlich ist, steigt stark an, und erreicht schließlich die Lichtgeschwindigkeit.

Die **Fluchtgeschwindigkeit** wird aus der kinetischen Energie und der Fluchtenergie berechnet. Da diese Energien gleich sein müssen, gilt folgende Gleichung:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{GMm}{R} \text{ bzw. } v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}. \quad (\text{F. 3.4.1})$$

Dies ist die Geschwindigkeit, um einen Körper aus dem Gravitationsfeld einer Masse M zu bringen. Die Anziehung durch andere Himmelskörper wird dabei vernachlässigt. Für die Erdoberfläche ergibt sich bei Vernachlässigung des Luftwiderstands eine Fluchtgeschwindigkeit von 11,2 km/s.

Wenn die Fluchtgeschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit c erreicht, dann gilt:

$$c^2 = \frac{2GM}{R} \text{ bzw. } R = \frac{2GM}{c^2}. \quad (\text{F. 3.4.2})$$

Diesen Radius nennt man **Schwarzschild-Radius** (siehe Kapitel 5.1). Dieser Grenzradius wurde nach dem deutschen Astronomen Karl Schwarzschild benannt. Der weitere Kollaps eines Sterns zu immer kleineren Radien kann von außenstehenden Beobachtern nicht mehr verfolgt werden, wodurch es sehr schwer war, Schwarze Löcher im All zu entdecken. „1994 lieferte das Hubble-Weltraumteleskop einen klaren Beweis, dass ein Schwarzes Loch im Zentrum der Galaxie M87 existiert. Die hohe Beschleunigung von Gasen in dieser Region

deutet darauf hin, dass ein Objekt oder eine Gruppe von Objekten mit 2,5 Millionen bis 3,5 Milliarden Sonnenmassen vorhanden sein muss.“¹³

Seit der Verwendung des englischen Begriffs „*black hole*“ im Jahre 1967 durch John Archibald Wheeler, einem amerikanischen Physiker, der viele moderne Arbeiten auf diesem Gebiet beeinflusst hat, sind Schwarze Löcher auch in der Öffentlichkeit präsent und Gegenstand zahlreicher Forschungen.¹⁴

¹³ Microsoft(R) Encarta(R) 97 Enzyklopädie. (c) 1993-1996 Microsoft Corporation.

¹⁴ vgl. Stephen HAWKING: Das Universum in der Nußschale. ISBN 3-455-09345-0. Hamburg: Hoffmann und Campe, 2001, 1. Auflage, S 121.

4. Unsichtbare Sterne

4.1 Beginn der Forschung an Schwarzen Löchern

Ende des achtzehnten Jahrhunderts sprachen Wissenschaftler von unsichtbaren Sternen und kamen erstmals auf die Idee, dass es Phänomene wie die Schwarzen Löcher geben könnte.

Es wurde lange Zeit angenommen, dass der französische Mathematiker und Astronom Pierre Simon Laplace es war, der als erster Wissenschaftler die Existenz Schwarzer Löcher vorausgesagt hatte. Heute ist bekannt, dass John Michell, ein englischer Geologe, ihm zuvor gekommen war.

Der Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts war noch nicht bekannt. Es gab die Korpuskulartheorie von Isaac Newton und die Wellentheorie von Christian Huygens, die 1678 der Pariser Akademie der Wissenschaften vorgelegt wurde. In der nachfolgenden Tabelle¹⁵ ist ein Überblick über die beiden Theorien zusammengestellt.

Korpuskulartheorie (Newton)	Wellentheorie (Huygens)
Lichtquellen sind Teilchenstrahler.	Lichtquellen sind harmonische Transversaloszillatoren (Polarisationsexperiment).
Ausbreitung von Substanz.	Ausbreitung von Energie in einem Medium (Äther).
Lichtgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit der Korpuskel.	Lichtgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit der Lichtwellenausbreitung.
Korpuskel breiten sich geradlinig aus.	Licht breitet sich wellenförmig im Äther aus.
Es gibt so viele Arten von Korpuskel, wie es Farben im Spektrum gibt, und deren Dispersion (Farbzerstreuung) ist reversibel.	Die Farbe des Lichts ist abhängig von der Wellenlänge und deren Dispersion (Farbzerstreuung) ist reversibel.
Brechung erfolgt durch farbspezifisch mechanische Einwirkung des Mediums.	Brechung erfolgt durch wellenlängenspezifisch unterschiedliche Lichtgeschwindigkeit im Medium.
Vakuumlichtgeschwindigkeit ist für alle Korpuskel gleich. Lichtgeschwindigkeit im Medium ist abhängig von der Korpuskelfarbe.	Ätherlichtgeschwindigkeit ist für alle Wellenlängen gleich. Lichtgeschwindigkeit im Medium ist abhängig von der Wellenlänge.
Weißes Licht besteht aus allen Korpuskeln des sichtbaren Spektrums zu gleichen Teilen.	Weißes Licht besteht aus Wellen aller Längen des sichtbaren Spektrums zu gleichen Teilen.

Tabelle 4.1.1: Korpuskular- und Wellentheorie des Lichts

¹⁵ vgl. Gerhard RAMSEBNER: *licht*, 23. 9. 2003. - URL: <http://www.ramsebner.com/txt/licht/licht.html>, [Stand 14. 1. 2004].

Mit Newtons Theorie war die Gravitationswirkung auf Licht leicht erklärbar. Aufgrund dieser Korpuskulartheorie konnte eine Ablenkung der von Fixsternen zur Erde gelangenden Lichtstrahlen bei ihrem Passieren der Sonne während einer Sonnenfinsternis nachgewiesen werden. Ging man aber vom Wellenmodell aus, so konnte damit die Ablenkung im Gravitationsfeld nicht erklärt werden.

In einem 1783 in den Philosophical Transactions der Londoner Royal Society veröffentlichten Artikel kam der Cambridge-Gelehrte John Michell zu dem Ergebnis, dass ein Stern von hinreichend großer Masse und Dichte ein so starkes Gravitationsfeld haben müsste, dass alles von der Oberfläche des Sterns emittierte Licht von der Gravitationskraft des Sterns wieder zurückgezogen werden würde. Er vermutete, dass es eine große Zahl solcher Sterne geben müsste. Und obwohl sie nicht gesehen werden könnten, weil ihr Licht die Erde nicht erreichen würde, müsste ihre Massenanziehung doch spürbar sein.

Die Argumente von John Michell werden nachfolgend kurz beschrieben: Feuert man ein Objekt senkrecht nach oben, so wird sein Anstieg durch die Schwerkraft abgebremst, bis es schließlich seinen Aufstieg beendet und zurückfällt. Überschreitet die anfängliche Aufwärtsgeschwindigkeit jedoch einen kritischen Wert, nämlich die so genannte Fluchtgeschwindigkeit, dann reicht der Einfluss der Schwerkraft nicht mehr aus, um das Objekt zu stoppen, sodass es ins Unendliche entkommt.

Gemäß der Formel 3.4.1 hat die Fluchtgeschwindigkeit auf der Erdoberfläche einen Wert von elf Kilometern pro Sekunde. Auf der Sonne beträgt sie 620 Kilometer pro Sekunde und am Mond etwas mehr als zwei Kilometer pro Sekunde. Michells Berechnungen ergaben für einen Stern mit der ca. 500-fachen Sonnengröße, aber der gleichen Dichte, eine Fluchtgeschwindigkeit, die der Lichtgeschwindigkeit entspricht.

Er hielt sich natürlich an die klassische Physik Newtons und daher an die Korpuskulartheorie und zog daraus den Schluss, dass Licht wie jedes andere Objekt der Schwerkraft unterliegen müsste. Bei einem Stern, der die gleiche Dichte wie die Sonne hätte, aber mehr als 500-mal so groß wäre, würde die Fluchtgeschwindigkeit also die Lichtgeschwindigkeit überschreiten. Hier wären laut Michell die Lichtteilchen dann nicht mehr schnell genug, um die Anziehungskraft des Sterns zu überwinden, wodurch dieser Himmelskörper nach außen hin schwarz erscheinen müsste und somit unsichtbar wäre.

Es wird vermutet, dass Pierre Simon Laplace, als er seine These veröffentlichte, den Artikel von John Michell nicht kannte. In der ersten und zweiten Ausgabe seines Buches „Darstellung des Weltsystems“ ist seine Theorie zu finden, während sie in späteren Auflagen fehlt. Vielleicht verwarf er später seine Idee, da im 19. Jahrhundert die Teilchen- oder Korpuskulartheorie des Lichts ihr früheres Ansehen einbüßte. Man glaubte damals, alles mit der Wellentheorie erklären zu können. Es war daher fraglich, ob die Schwerkraft das Licht überhaupt beeinflussen könnte.

Aufgrund der Wellentheorie war es nicht zulässig, das Licht wie Objekte in Newtons Gravitationstheorie zu behandeln, weil die Lichtgeschwindigkeit einen festen Wert hat. Es muss seinen Weg nach oben nämlich mit konstanter Geschwindigkeit fortsetzen. Erst im Jahre 1915 lieferte Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie eine schlüssige Erklärung über die Auswirkungen der Gravitation auf das Licht.¹⁶

¹⁶ vgl. Jim AL-KHALILI: Schwarze Löcher, Wurmlöcher und Zeitmaschinen, S 121-122.

4.2 Chandrasekhars Erkenntnisse

Ende der zwanziger Jahre des vorigen Jahrhunderts erfolgte durch den indischen Studenten Subrahmanyan Chandrasekhar ein bedeutender Schritt zum Verständnis der Schwarzen Löcher. Dieser reiste 1928 nach England, um in Cambridge bei dem britischen Astronomen Sir Arthur Eddington, einem Experten auf dem Gebiet der Allgemeinen Relativitätstheorie, zu studieren.

„(Es heißt, Anfang der zwanziger Jahre habe ein Journalist Eddington berichtet, er habe gehört, daß es auf der Welt nur drei Leute gebe, die die allgemeine Relativitätstheorie verstanden hätten. Eddington schwieg eine Weile und sagte dann: ‚Ich überlege, wer der dritte sein könnte.‘) Auf der Reise von Indien nach England errechnete Chandrasekhar, bis zu welcher Größe sich ein Stern auch dann noch gegen die eigene Schwerkraft behaupten kann, wenn er seinen ganzen Brennstoff verbraucht hat. Dabei ging er von folgendem Grundgedanken aus: Wenn der Stern kleiner wird, rücken die Materieteilchen sehr nahe aneinander und müssen deshalb nach dem Paulischen Ausschließungsprinzip sehr unterschiedliche Geschwindigkeiten haben.“¹⁷

Das Pauli-Prinzip ist ein wichtiges Prinzip der Quantenmechanik. Es ist nach seinem Entdecker, dem Österreicher Wolfgang Pauli, benannt. In seiner zuerst beobachteten und einfachsten Form gilt, dass in einem Atom keine zwei Elektronen in allen vier Quantenzahlen, die zu seiner Zustandsbeschreibung im Atommodell notwendig sind, übereinstimmen dürfen.

Aus diesem Prinzip ergibt sich, dass sich die Materieteilchen wieder voneinander entfernen, wodurch ein Stern zur Expansion neigt. So kann dieser einen konstanten Radius bewahren, wenn die Anziehung infolge der Gravitation und die Abstoßung infolge des Ausschließungsprinzips gleich sind - genauso wie sich zu einem früheren Zeitpunkt Gravitation und Wärmebewegung die Waage hielten. Chandrasekhar erkannte jedoch, dass die Abstoßungskraft durch das Ausschließungsprinzip limitiert ist. Die Relativitätstheorie schränkt den maximalen Geschwindigkeitsunterschied der Materieteilchen im Stern auf die Lichtgeschwindigkeit ein. Bei hinreichender Verdichtung des Sterns würde die durch das Ausschließungsprinzip bewirkte Abstoßung kleiner sein als die Anziehungskraft der Gravitation. Demnach wäre es einem kalten Stern von mehr als etwa der 1,5-fachen Sonnenmasse nicht möglich, seiner Schwerkraft zu widerstehen. Diese Masse wird heute als die Chandrasekhar'sche Grenze bezeichnet. Aus ihr leiten sich weitreichende Konsequenzen für das spätere Schicksal von Sternen mit großer Masse ab (siehe auch Kapitel 3.2 sowie 3.3).

Sobald Sterne mit Massen über dem Chandrasekhar'schen Grenzwert keinen Brennstoff mehr haben, explodieren diese in einigen Fällen oder verlieren genügend Materie, wodurch die Masse unter diesen Grenzwert fällt und somit ein Gravitationskollaps großen Ausmaßes vermieden wird. Es war kaum vorstellbar, dass dies immer passiert, wobei sich das Problem ergab, ob dabei jeder Stern unendliche Dichte erlangen würde. Eddington weigerte sich, Chandrasekhars Schlussfolgerungen zu akzeptieren, da er von den Auswirkungen dieser Überlegungen schockiert war. Andere Wissenschaftler schlossen sich ebenfalls dieser Meinung an, und auch Albert Einstein erläuterte in einem Artikel, dass Sterne auf keinen Fall zur Größe Null zusammenstürzen könnten. Die Einwände so vieler Fachleute bewogen Chandrasekhar dazu, sich mit anderen astronomischen Problemen (z. B. Sternenhaufen) und

¹⁷ Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit. ISBN 3-499-60924-X. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Mai 2000, S 108.
(nach alter Rechtschreibung zitiert; neue Rechtschreibung: dass)

nicht weiter mit diesem Forschungsgebiet zu beschäftigen. Doch der Chandrasekhar im Jahre 1983 verliehene Nobelpreis galt auch als Würdigung seiner frühen Arbeiten über die Grenzmasse kalter Sterne.¹⁸



Abbildung 4.2.1: Subrahmanyan Chandrasekhar

4.3 Oppenheimers relativistische Erklärung

Chandrasekhar hatte gezeigt, dass Paulis Ausschließungsprinzip den Zusammenbruch eines Sterns nicht verhindern kann, wenn dessen Masse den Chandrasekhar'schen Grenzwert überschreitet. Die Frage, was der Allgemeinen Relativitätstheorie zufolge mit einem solchen Stern passieren würde, beantwortete im Jahre 1939 der junge amerikanische Physiker Robert Oppenheimer.

Oppenheimer ging in seinen Überlegungen davon aus, dass sich Lichtkegel im Raum-Zeit-Diagramm in der Nähe großer Massen leicht nach innen wölben. Dies zeigt sich auch an der Krümmung des Lichts ferner Sterne, die während einer Sonnenfinsternis beobachtbar ist. Wenn nun ein Stern in sich selbst zusammenfällt, so nimmt das Gravitationsfeld an seiner Oberfläche erheblich zu, und der Kegel krümmt sich immer weiter nach innen. Das Licht erscheint nun für einen entfernten Betrachter zunehmend rot und schwächer, da es sich immer weniger der stärker werdenden Gravitation entziehen kann. Ab einem bestimmten Radius des kollabierenden Sterns ist die Krümmung des Lichtkegels dann so stark nach innen gerichtet, dass nun gar kein Licht mehr der Anziehung des Sternes entkommen kann.¹⁹

Vor Beginn des Zweiten Weltkriegs kam Oppenheimer jedoch zu der Erkenntnis, dass aus seinen Überlegungen nichts folgte, was mit den damals verfügbaren Teleskopen hätte beobachtet werden können. Während des Zweiten Weltkriegs arbeitete er maßgeblich bei einem Projekt zur Entwicklung der Atombombe mit - das Problem des Gravitationskollapses wurde jedoch weitgehend wieder vergessen, da auch nach dem Kriegsende die meisten Physiker an der Erforschung der Atome und besonders deren Kerne interessiert waren.

In den sechziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts flammte das Interesse an den Fragen der Astronomie und Kosmologie neuerlich auf. Dies war auf die Anwendung moderner Techniken zurückzuführen, die es erlaubten, die Zahl und Reichweite astronomischer Beobachtungen erheblich zu erhöhen. Oppenheimers Arbeit wurde neuerlich aufgegriffen, und zahlreiche Wissenschaftler begannen, an ihrer Weiterführung zu arbeiten.

¹⁸ vgl. Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, S 108-110.

¹⁹ vgl. Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, S 110-111.

5. Eigenschaften Schwarzer Löcher

5.1 Schwarzschild-Radius und Ereignishorizont

Bei Schwarzen Löchern handelt es sich um fast leeren Raum. Sie sind also Löcher im Weltraum, innerhalb derer Raum und Zeit ihre Eigenschaften grundlegend ändern.

Wenn die Masse eines Sterns in einem hinreichend kleinen Raum konzentriert ist, dann wird das Gravitationsfeld an der Oberfläche des Sterns so stark, dass ihm nicht einmal Licht entkommen kann.

Die Größe von Schwarzen Löchern ist durch den Schwarzschild-Radius definiert, der die Grenze angibt, ab welcher kein Licht mehr entweichen kann (siehe Kapitel 3.4).

Ein Schwarzes Loch mit der Masse von $10 M_{\odot}$ hat laut Formel 3.4.2 einen Schwarzschild-Radius von 29,5 Kilometern, jenes mit nur einer Sonnemasse hat lediglich einen Radius von 2,95 Kilometern.

Nachdem Einstein im Jahre 1915 seine Allgemeine Relativitätstheorie abgeschlossen hatte, begann er, nach Lösungen für seine Feldgleichungen zu suchen. Diese Gleichungen entsprachen seinen Vorstellungen über den Zusammenhang zwischen Materie, Raum und Zeit. Es war jedoch nicht Einstein, der intensiv die Arbeiten an seinen Feldgleichungen fortführte, sondern der deutsche Astronom **Karl Schwarzschild**, dem 1916 als Erstem eine exakte Lösung der Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie gelang.

„Einstein hatte seine Theorie erst wenige Monate zuvor veröffentlicht, und Schwarzschild starb schon bald, nachdem er seine Berechnungen beendet hatte, an einer unheilbaren Hautkrankheit, die er sich im Ersten Weltkrieg zugezogen hatte. Die Schwarzschild-Lösung, wie man sie heute nennt, beschreibt die Auswirkung eines Gravitationsfelds auf Raum und Zeit in der Umgebung einer beliebigen kugelförmigen Massenkonzentration. Erst später bemerkte man, dass Schwarzschilds Ergebnisse die Beschreibung eines Schwarzen Loches enthielten.“²⁰

Lange Zeit begegneten die meisten Physiker, unter ihnen auch Einstein, der Idee, dass es extreme Materiekonfigurationen im realen Universum geben könnte, mit großer Skepsis. Doch heute ist bekannt, dass jedes hinreichend schwere, nicht rotierende Objekt, egal wie kompliziert seine Form oder innere Struktur ist, zu einem vollkommen kugelförmigen Schwarzen Loch vom Schwarzschild-Typ zusammenstürzen muss.

Da der Schwarzschild-Radius die Grenze eines Schwarzen Lochs darstellt, kann man sich einen kollabierenden Stern so vorstellen, als ob dieser von einer Kugel mit dem Radius des Schwarzschild-Radius umgeben wäre. Diese imaginäre Kugel wird als **Ereignishorizont** bezeichnet. Dieser bildet eine künstliche Grenze im Raum, jenseits derer es keine Rückkehr mehr gibt. „Außerhalb dieses Horizonts ist die Schwerkraft stark, aber endlich, und Objekte können die Anziehungskraft immer noch überwinden. Aber innerhalb des Horizonts müsste ein Objekt dazu schneller sein als das Licht, und das ist nicht möglich.“²¹

²⁰ Jim AL-KHALILI: Schwarze Löcher, Wurmlöcher und Zeitmaschinen, S 125.

²¹ Jim AL-KHALILI: Schwarze Löcher, Wurmlöcher und Zeitmaschinen, S 127.

Stephen Hawking und Roger Penrose definierten ein Schwarzes Loch als eine Gruppe von Ereignissen, denen man nicht sehr weit entkommen kann. Unter der Grenze eines Schwarzen Lochs versteht man den Ereignishorizont. Der Radius des Ereignishorizonts ist direkt proportional zur Masse des Schwarzen Lochs. Er wird durch die Wege jener Lichtstrahlen festgelegt, die möglichst weit nach außen zu gelangen versuchen und sich schließlich für immer auf dem Ereignishorizont bewegen. Stephen Hawking fand heraus, dass die Bahnen der Lichtstrahlen im Ereignishorizont nicht näher aneinander rücken können, und folgerte daraus, dass sich die Wege der Lichtstrahlen stets voneinander fort oder zueinander parallel bewegen müssen. Aus dieser wichtigen Erkenntnis schloss Hawking, dass die Fläche des Ereignishorizonts niemals abnehmen könne. Roger Penrose bestätigte dieses wichtige Ergebnis, das zu einer wesentlichen Einschränkung für das mögliche Verhalten Schwarzer Löcher führt.

Alle Körper haben ihren eigenen potenziellen Ereignishorizont und Schwarzschild-Radius. Sogar die Erde könnte zu einem Schwarzen Loch mit einem Radius von 8,9 Millimetern werden. Sie hat jedoch nicht genug Masse, um von sich aus zu kollabieren, es müsste also entsprechend großer Druck von außen kommen, wodurch sie letztlich über ihren eigenen Ereignishorizont hinaus schrumpfen und dann unaufhaltsam weiter kollabieren könnte.

5.2 Die Singularität

Sobald ein kollabierender Stern über seinen Ereignishorizont hinaus zusammengefallen ist, kann nichts seinen weiteren Kollaps aufhalten, bis seine gesamte Masse auf einen Punkt zusammengepresst ist. Man nennt dies dann eine **Singularität** - die physikalischen Gesetze sind auf die Singularität eines Schwarzen Loches nicht mehr anwendbar.

„Entsprechend den Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie ist eine Singularität der Ort, wo die Materie unendlich dicht und der Raum unendlich gekrümmt ist und wo die Zeit endet. Viele glauben fälschlicherweise, dass die Zeit am Ereignishorizont endet. Das hat mit den Vorgängen zu tun, die entfernte Beobachter feststellen, wenn ein Objekt in ein Schwarzes Loch fällt.“²²

Wendet man die Gesetze der Quantenmechanik an, was auf dieser Ebene unumgänglich ist, dann stellt man fest, dass das Volumen der Singularität nur extrem klein (viel kleiner als das eines Atoms) ist, aber nicht exakt den Wert Null hat. Viele physikalische Einzelheiten sind allerdings noch zu klären, denn bislang existiert noch keine genaue Vorstellung, wie man die Gesetze der Quantenmechanik und der Allgemeinen Relativitätstheorie gleichzeitig anwendet.

Die *Stringtheorie* ist aber einer der vielversprechenden Kandidaten der GUT (*Grand Unified Theory*), deren Ziel es ist, die beiden Haupttheorien der heutigen Physik, die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenfeldtheorie, zu vereinigen. Die primäre Aussage der Stringtheorie lautet: Alle Elementarteilchen sind nichts anderes als verschiedene Aspekte eines einzelnen Teilchens, des so genannten Strings.

„Diese Strings sind eindimensionale Fäden, welche in einem imaginären Medium schwingen: Membrane, genannt Branes. Je nach ‚Frequenz‘ (Energie) stellen sie zum Beispiel ein Elektron oder ein Quark dar. Daraus folgt, dass Strings sehr, sehr, klein sein müssen (nicht

²² Jim AL-KHALILI: Schwarze Löcher, Wurmlöcher und Zeitmaschinen, S 129.

größer als eine Planck-Länge). Somit wäre es praktisch unmöglich diese Teilchen zu messen. Ein Teilchenbeschleuniger, welcher eine solch hohe Energie erzeugen könnte, müsste so groß wie das Sonnensystem sein. Die Stringtheorie ist in mehrere Teiltheorien unterteilt, welche zur Berechnung einzelner Situationen nützlich sind.²³

Die Physiker sind seit langem auf der Suche nach der „**großen vereinheitlichten Theorie**“, mit der man durch eine einzige Formel das gesamte Universum, vom Quantenkosmos bis zu den größten Ausdehnungen des Alls, beschreiben will.

Das Problem liegt jedoch darin, dass beispielsweise Einsteins Theorie ab dem Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs ihre Gültigkeit verliert, so wie alle anderen Naturgesetze auch. Daher wird nach einer Theorie der Quantengravitation gesucht, die hier ansetzt und Erklärungen liefern könnte.

Es ist nicht bekannt, in welcher Form die Materie in einer Singularität vorliegt, aber Atomkerne werden es bestimmt nicht sein, und selbst Kernteilchen wie die Neutronen können hier nicht stabil bestehen. Vielleicht ist es nur eine „Quarksuppe“ mit Gluonen (das sind Teilchen, die Quarks zu Teilchen wie Neutronen oder Protonen zusammenfügen). Es ist aber möglich, dass selbst Quarks unter diesem hohen Druck nicht bestehen können, weshalb man die Existenz von Strings annimmt. Diese Teilchen könnten die Grundbausteine des gesamten Kosmos sein.

Zusammenfassend kann man nun behaupten, dass ein Schwarzes Loch ziemlich einfach aufgebaut ist. Es hat eine Singularität (Mittelpunkt) und einen Ereignishorizont (Oberfläche), alles Übrige ist nur Schwerkraft.

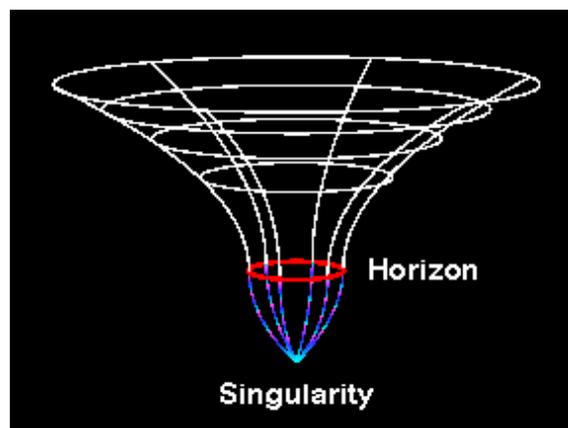


Abbildung 5.2.1: Der Aufbau eines Schwarzen Lochs - vereinfacht dargestellt

²³ Jim WALES, Wikipedia Foundation Inc.: WIKIPEDIA, die freie Enzyklopädie – Stringtheorie, 4. 1. 2004. - URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Stringtheorie>, [Stand 14. 1. 2004].

5.3 Die Akkretionsscheibe

Schwarze Löcher sind von einer riesigen, **dichten Scheibe aus Materie** umgeben, die von den Astronomen als **Akkretionsscheibe** bezeichnet wird. Staub- und Gasteilchen, die sich in der Nähe des Loches befinden und der starken Gravitation ausgesetzt sind, sammeln sich allmählich rund um das Schwarze Loch und umkreisen es. Also wird in den inneren Regionen der Scheibe die Anziehung so stark, dass die Teilchen auf immer enger werdenden Kreisbahnen in das Schwarze Loch hineingezogen werden. Dadurch entsteht im Laufe der Zeit eine Scheibe mit immensen Ausmaßen. Mit sinkendem Radius werden die Partikel immer stärker beschleunigt. Materie, die den Ereignishorizont überschritten hat, stürzt mit fast Lichtgeschwindigkeit in die Singularität. Während dieses Vorgangs heizt sich die Materie bis auf einige Millionen Grad Celsius auf und sendet Strahlung in allen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums, vor allem aber Röntgenstrahlung, aus. Die Emission dieser Strahlung außerhalb des Schwarzschild-Radius ist der Grund, warum Schwarze Löcher überhaupt wahrgenommen werden können.²⁴

Mittels Satelliten kann versucht werden, diese Röntgenstrahlung zu entdecken (siehe auch Kapitel 5.10). Im Juni 2000 wurde mit dem Röntgen-Weltraumteleskop „*XMM-Newton*“, das die Erde umkreist, Röntgenstrahlung entdeckt. Aus der Energie der Teilchen konnte der Herkunftsort berechnet und somit festgestellt werden, dass die Strahlung von einer $1,3 \cdot 10^8$ Lichtjahre entfernten Galaxie stammt, nämlich von der Akkretionsscheibe eines supermassiven Schwarzen Lochs von $10^8 M_{\odot}$.²⁵

Das Bild der Spektrallinien sah völlig anders aus, als es die Forscher erwartet hatten. Dadurch erkannten die Astrophysiker, dass sich die Materie mit großer Geschwindigkeit um das Schwarze Loch bewegt und dieses somit rotieren muss (siehe Kapitel 5.5).

²⁴ vgl. Harald FRATER, Springer Verlag, Heidelberg – MMCD GmbH, Düsseldorf: *G.O. Wissen Online – FOCUS Schwarze Löcher*, März 2001. - URL: <http://www.g-o.de/kap4a/40cd0102.htm>, [Stand 14. 1. 2004].

²⁵ vgl. Henning ENGELN: Orte ohne Wiederkehr. In: Geo - Das neue Bild der Erde, *Fantastische Welten*, hrsg. v. Peter-Matthias Gaede. Bd. 11/November 2002. Hamburg: Gruner + Jahr AG & Co Druck- und Verlagshaus, 2002, S 70.



Abbildung 5.3.1: Eine lebhafteste künstlerische Darstellung von Cygnus X-1

Cygnus X-1 ist eine starke Röntgenquelle in unserer Galaxie, die als Schwarzes Loch gilt. HDE226868, dem Begleitstern von Cygnus X-1, in dieser doppelseitigen Abbildung als riesige weiße Kugel dargestellt, wird Materie entrissen und spiralförmig zu einer Akkretionsscheibe gebündelt, bevor sie ins Schwarze Loch stürzt.

5.4 Materiejets

Weitere Phänomene, die mit Schwarzen Löchern verbunden sind, sind die so genannten **Materiejets**. Sie bestehen aus heißem Gas und schießen mit weit mehr als der halben Lichtgeschwindigkeit bis zu Millionen von Lichtjahren weit ins Weltall hinaus. Ihr Ursprung sind die heißen Gasmassen, die ein Schwarzes Loch umgeben.

Die Ursache dieser Jets liegt in dem **intensiven Magnetfeld**, das ein Schwarzes Loch umgibt. Geladene, energiereiche Partikel werden bei ihrer Bewegung durch das Magnetfeld zu Jets gebündelt, die der Rotationsachse des Lochs folgen. Dadurch werden sie auf extrem hohe Geschwindigkeiten beschleunigt und ins All geschleudert. Es könnte jedoch auch der Druck des intensiven Strahlungsfeldes für ihre Entstehung verantwortlich sein.²⁶

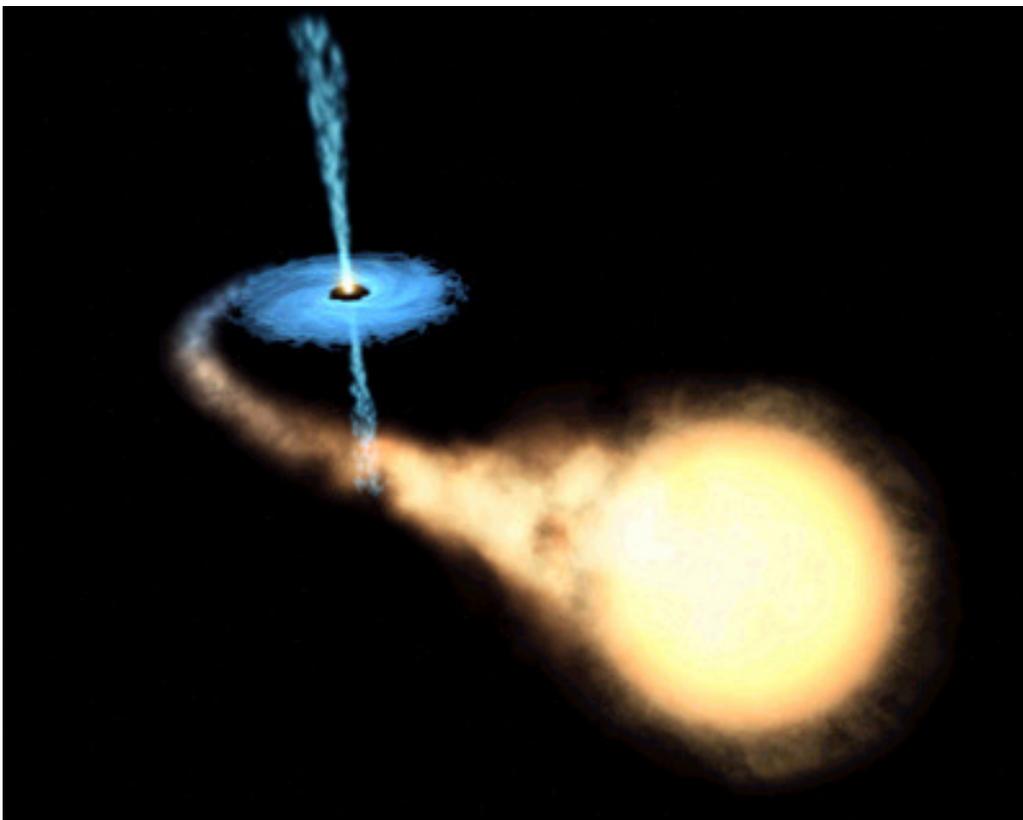


Abbildung 5.4.1: Materiejets bei einem Schwarzen Loch mit Begleitstern

5.5 Rotierende Schwarze Löcher

Bisher wurde nur die einfachste Art eines Schwarzen Loches erklärt, nämlich jene, die durch die Schwarzschild-Lösung der Einstein'schen Feldgleichungen beschrieben wird. Dabei handelt es sich allerdings um ein idealisiertes Szenario. Bei einem wirklichen Schwarzen

²⁶ vgl. Harald FRATER: *G.O. Wissen Online – FOCUS Schwarze Löcher*,
URL: <http://www.g-o.de/kap4a/40cd0102.htm>.

Loch käme die **Rotation** hinzu, die auch mit dem Weltraumteleskop „*XMM-Newton*“ (siehe Kapitel 5.3) bestätigt wurde.

Der Mathematiker Roy Kerr aus Neuseeland fand 1963 eine allgemeinere Lösung der Einstein'schen Gleichungen, die ein kollabiertes rotierendes Objekt beschreibt. Die Sterne drehen sich um ihre eigene Achse - und wenn sie kollabieren, drehen sie sich schneller.

Der Drehimpuls ($\vec{L} = m \cdot \vec{v} \times \vec{R}$), ein Merkmal aller rotierenden Objekte, bleibt so wie die Energie erhalten. Dies bedeutet, dass er stets die gleiche Größe behält, sofern keine äußere Kraft auf das Objekt einwirkt. Der Drehimpuls hängt von der Masse des Objekts, dessen Rotationsgeschwindigkeit und dessen Form ab.

Beim Kollaps eines rotierenden Sterns reduziert sich das Volumen, was durch eine größere Drehgeschwindigkeit ausgeglichen werden muss, damit der Drehimpuls erhalten bleibt. Deshalb rotieren auch Pulsare so schnell (siehe Kapitel 3.3).

Im Zentrum der Überreste vieler Supernovae gibt es noch einen kleinen dichten Kern als Rest des ursprünglichen Sterns. Diese Objekte werden Neutronensterne genannt, sie gehören zu den interessantesten Objekten der Astrophysik und sind ein zentrales Forschungsgebiet der letzten Jahre. Zwecks Erhaltung des Drehimpulses drehen sie sich sehr schnell und senden dabei ein kreisendes Strahlenbündel aus. Liegt die Erde in der Bahn dieses Strahlenbündels, sieht es von dort so aus, als pulsiere dieses Licht - daher der Name Pulsar.

Entsprechend Newtons Erklärung der Gravitation gibt es keinen Unterschied zwischen der Gravitationswirkung eines kugelförmigen rotierenden Objekts und eines gleichartigen Objekts, das nicht rotiert (solange es dabei nicht auch taumelt). Im Gravitationsfeld großer Massen ist laut der Allgemeinen Relativitätstheorie zu erwarten, dass die stabilen Kreisbahnen sehr viel näher an das rotierende Schwarze Loch heranreichen.

Ein rotierendes Schwarzes Loch schleift den umliegenden Raum mit sich und bildet daraus einen gravitativen Wirbel. In einem solchen Bereich des Raums müsste ein umlaufender Körper in einer der Rotationsrichtung des Schwarzen Loches gleichen Richtung beschleunigen, nur um nicht angezogen zu werden. Aufgrund dieser Tatsache verfügt man über eine Möglichkeit, die Rotationsgeschwindigkeit eines Schwarzen Loches zu messen. Um diese zu eruieren, müssen zwei Satelliten in entgegengesetzte Umlaufbahnen um das Loch gebracht werden. Da der Satellit, der in Gegenrichtung zur Drehung des Schwarzen Loches umläuft, gegen den Gezeitenstrom des sich bewegenden Raums entgegenwirken muss, ist seine Bahn länger, und er braucht deshalb mehr Zeit für eine volle Umrundung. Aus der Differenz der Umlaufzeiten beider Satelliten ergibt sich die Rotationsgeschwindigkeit.

Der Bereich der Umgebung eines rotierenden Schwarzen Loches, der von der Bewegung erfasst wird, wird als **Ergosphäre** bezeichnet. Ein rotierendes Schwarzes Loch hat also zwei Horizonte: einen inneren, sphärischen, den Ereignishorizont, und daneben einen äußeren Horizont, der auf der Höhe des Äquators ausgebeult ist und die äußere Grenze der Ergosphäre bildet. Innerhalb der Ergosphäre ist der Sog der Rotation so stark, dass alles davon mitgerissen wird. Ein Objekt, das in die Ergosphäre fällt, kann dieser allerdings wieder entkommen, solange es nicht hinter den Ereignishorizont gerät.²⁷

²⁷ vgl. Jim AL-KHALILI: Schwarze Löcher, Wurmlöcher und Zeitmaschinen, S 133-135.

5.6 Die Bedeutung der Thermodynamik

„Der erste Hinweis darauf, daß möglicherweise eine Verbindung zwischen Schwarzen Löchern und der Thermodynamik existiert, ergab sich 1970 mit der mathematischen Entdeckung, daß die Oberfläche des Ereignishorizonts stets anwächst, wenn zusätzliche Materie oder Strahlung in das Schwarze Loch dringt. Mehr noch: Wenn zwei Schwarze Löcher zusammenstoßen und zu einem einzigen Schwarzen Loch verschmelzen, so ist die Horizontfläche des resultierenden Schwarzen Loches größer als die Flächensumme der Ereignishorizonte, welche die ursprünglichen Schwarzen Löcher umgeben haben. Diese Eigenschaften lassen auf eine Verwandtschaft zwischen der Fläche des Ereignishorizonts eines Schwarzen Loches und dem Entropiebegriff in der Thermodynamik schließen.“²⁸

Die Entropie kann als Maß für die Unordnung eines Systems verstanden werden, beziehungsweise als ein Maß der fehlenden Information über ein thermodynamisches System. Sie bleibt bei reversiblen Vorgängen in einem abgeschlossenen System konstant und nimmt bei irreversiblen Vorgängen zu. Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt: Wärme geht von selbst nur von einem Körper höherer Temperatur auf einen Körper tieferer Temperatur über, d. h., dass mit der Zeit die Entropie in einem abgeschlossenen System niemals kleiner wird.

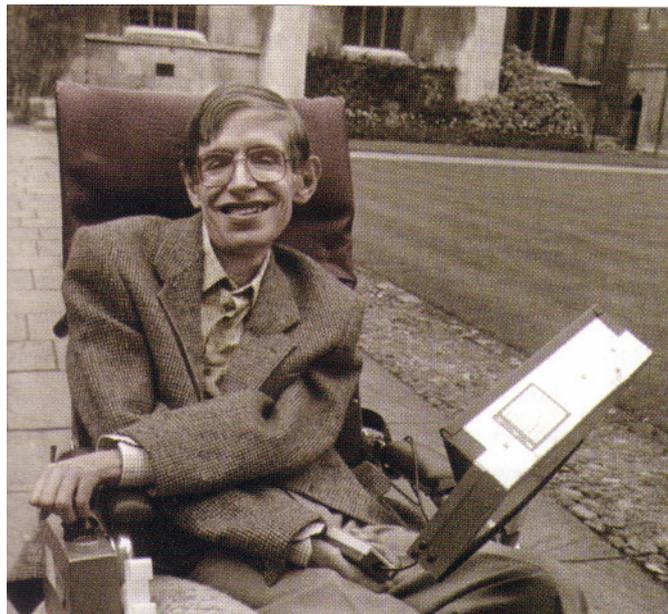


Abbildung 5.6.1: Stephen Hawking

Dieses Bild zeigt den Wissenschaftler in Cambridge, als er die erste Fassung der „Kurzen Geschichte der Zeit“ schrieb.

Die Analogie zwischen den Eigenschaften Schwarzer Löcher und den Gesetzen der Thermodynamik ist von James M. Bardeen, Brandon Carter und Stephen Hawking erkannt

²⁸ Stephen W. HAWKING: Einsteins Traum – Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit. ISBN 3-498-02919-3. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Verlag GmbH, 1993, S 101.
(nach alter Rechtschreibung zitiert; neue Rechtschreibung: dass)

worden. Sie gingen vom Ersten Hauptsatz der Thermodynamik aus, der wie folgt lautet: Die innere Energie eines Körpers kann durch Zufuhr von Arbeit und Wärme erhöht werden.

$$\Delta U = W + Q \quad (\text{F. 5.6.1})$$

Dies bedeutet, dass eine kleine Veränderung in der Entropie eines Systems immer an eine proportionale Veränderung der Energie des Systems gekoppelt ist. Dieser Proportionalitätsfaktor wird als die Temperatur des Systems bezeichnet. Bardeen, Carter und Hawking fanden ein ähnliches Gesetz, das die Massenveränderung eines Schwarzen Loches in Beziehung zur Flächenänderung des Ereignishorizonts stellt. Der Proportionalitätsfaktor enthält eine Größe, die Oberflächenschwere genannt wird und ein Maß für die Stärke des Gravitationsfeldes am Ereignishorizont darstellt.

„Wenn man akzeptiert, daß die Fläche des Ereignishorizonts der Entropie analog ist, so müßte man auch akzeptieren, daß die Oberflächenschwere der Temperatur analog ist. Unterstrichen wird die Ähnlichkeit dadurch, daß sich die Oberflächenschwere an allen Punkten des Ereignishorizonts als gleich erweist, genauso wie die Temperatur eines Körpers im thermischen Gleichgewicht überall gleich ist.“²⁹

Basierend auf den Beziehungen zwischen **Entropie** und **Horizontfläche** kam im Jahre 1972 Jacob D. Bekenstein von der Universität in Princeton zu einer entscheidenden Erkenntnis: Wenn ein Schwarzes Loch durch einen Gravitationskollaps entsteht, nimmt es rasch einen ruhenden Zustand an, der nur durch drei Parameter gekennzeichnet ist - die Masse, den Drehimpuls und die elektrische Ladung. Von diesen drei Eigenschaften abgesehen, hat das Schwarze Loch keine anderen Charakteristika des kollabierten Objekts bewahrt.

Diese Schlussfolgerung, bekannt als das Theorem „*Ein Schwarzes Loch hat keine Haare*“, wurde später in gemeinsamer Arbeit von Werner Israel, David C. Robinson sowie von Carter und Hawking bewiesen. Es besagt also, dass durch einen Gravitationskollaps sehr viel Information verloren geht. So sind im Endzustand eines Schwarzen Lochs sowohl die Materiekonfiguration als auch die Gestalt und Struktur des kollabierten Körpers für immer verloren.

Laut Bekenstein könnte der Logarithmus der Anzahl der Konfigurationen, aus denen sich möglicherweise ein Schwarzes Loch bildete, als Entropie interpretiert werden. Daher bestand ein Problem in seiner Schlussfolgerung darin, dass ein Schwarzes Loch mit einer endlichen Entropie, die proportional zur Fläche seines Ereignishorizonts ist, auch eine endliche Temperatur haben müsste, woraus sich für ein Schwarzes Loch bei irgendeiner Temperatur ungleich Null ein Gleichgewicht mit der thermischen Strahlung ergeben könnte. Nach klassischen Begriffen ist ein solches Gleichgewicht jedoch unmöglich, da das Schwarze Loch definitionsgemäß jegliche einfallende Wärmestrahlung absorbieren würde, ohne jedoch im Gegenzug irgendetwas zu emittieren.³⁰

Dieses Paradoxon, dass sich Schwarze Löcher dennoch in einem thermischen Gleichgewicht befinden, blieb bis Anfang 1974 ungelöst, als die Hawking-Strahlung entdeckt wurde. Stephen Hawking untersuchte, wie sich Materie in der Nachbarschaft eines Schwarzen Loches nach den Gesetzen der Quantenmechanik verhalten würde, und entdeckte neben der

²⁹ Stephen W. HAWKING: Einsteins Traum – Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit, S 102.
(nach alter Rechtschreibung zitiert; neue Rechtschreibung: dass, müsste)

³⁰ vgl. Stephen W. HAWKING: Einsteins Traum – Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit, S 101-104.

Formel für die Schwarzschildentropie auch die Formel für die Temperatur eines Schwarzen Lochs:

$$\text{Schwarzschildentropie } S = \frac{Akc^3}{4\hbar G}, \quad (\text{F. 5.6.2})^{31}$$

$$\text{Temperatur eines Schwarzen Lochs } T = \frac{\hbar c^3}{8\pi kGM}. \quad (\text{F. 5.6.3})^{32}$$

Die Entropie ist ein Maß für die Zahl der inneren Zustände (der möglichen inneren Konfigurationen), die ein Schwarzes Loch aufweisen könnte, ohne einem äußeren Beobachter, der nur seine Masse, Rotation und Ladung wahrnehmen kann, in irgendeiner Hinsicht anders zu erscheinen. Die Entropie ist proportional zur Horizontfläche des Schwarzen Lochs: In angemessenen Einheiten entspricht jedem Bit Information über den inneren Zustand des Schwarzen Lochs eine Flächeneinheit des Horizonts. Dies legt eine tiefreichende Verbindung zwischen Quantengravitation und Thermodynamik nahe.³³

Ein interessanter Aspekt in diesem Zusammenhang ist auch, dass Wissenschaftler mit Hilfe der Entropie aus den Eigenschaften Schwarzer Löcher eine absolute Obergrenze für die Information, die in Materie, Energie oder einem Raumgebiet beinhaltet sein kann, hergeleitet haben.

Darauf basierend nehmen moderne Forschungen an, dass unsere Welt einem Hologramm gleichen könnte - einem dreidimensionalen Abbild, das auf einem flachen Film gespeichert ist. Nach diesem *holografischen Prinzip* wäre unser Universum in Wirklichkeit auf eine zweidimensionale Oberfläche „geschrieben“, und unsere dreidimensionalen Wahrnehmungen im Alltag wären somit nur Illusionen. Verallgemeinert man dieses Prinzip, so könnte unser dreidimensionaler Kosmos vollständig äquivalent zu alternativen Quantenfeldern und physikalischen Gesetzen sein, die auf einer weit entfernten riesigen Fläche ablaufen.

Aus der Theorie Schwarzer Löcher folgt, dass der maximale Entropie- oder Informationsgehalt eines beliebigen Raumgebiets nicht vom dreidimensionalen Volumen, sondern von der zweidimensionalen Oberfläche des Gebiets abhängt. Schwarze Löcher liefern also Hinweise, dass das holografische Prinzip tatsächlich gelten könnte.

Nimmt man die Physik des Universums als holografisch an, dann muss eine alternative, auf einer dreidimensionalen Grenze der Raumzeit gültige Menge physikalischer Gesetze existieren, die zu der uns bekannten vierdimensionalen Raum-Zeit-Physik äquivalent ist. Eine dreidimensionale Theorie, die so etwas leistet, ist bislang noch nicht bekannt. Erste Schritte zur Prüfung solcher Ideen basieren alle auf vereinfachten Modellen unseres Universums. Als Beispiele für solche Modelle gelten die *Anti-de-Sitter-Raumzeiten* (siehe Kapitel 7.2).³⁴

„**Das holografische Prinzip** stellt völlige Äquivalenz zwischen zwei Universen her, die unterschiedliche Dimensionen haben und unterschiedlichen physikalischen Gesetzen gehorchen. Theoretiker haben dieses Prinzip mathematisch für einen speziellen Typ

³¹ vgl. Stephen HAWKING: Das Universum in der Nußschale, S 71.

³² vgl. Stephen HAWKING: Das Universum in der Nußschale, S 126.

³³ vgl. Stephen HAWKING: Das Universum in der Nußschale, S 71.

³⁴ vgl. Jakob D. BEKENSTEIN: Das holografische Universum. In: Spektrum der Wissenschaft, *Sind Sie ein Hologramm?*, hrsg. v. Dr. habil. Reinhard Breuer. Bd. November 2003. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, 2003, S 34, 37, 39-40.

fünfdimensionaler Raumzeit („Anti-de-Sitter“) und ihre vierdimensionale Grenze bewiesen. Das fünfdimensionale Universum wird praktisch wie ein Hologramm auf seiner vierdimensionalen Grenzfläche abgebildet. In der fünfdimensionalen Raumzeit herrscht die Superstringtheorie, aber auf dem vierdimensionalen Hologramm gilt eine sogenannte konforme Feldtheorie mit Punktteilchen.

Ein Schwarzes Loch in der fünfdimensionalen Raumzeit ist äquivalent zu heißer Strahlung auf dem Hologramm. Insbesondere haben das Loch und die Strahlung dieselbe Entropie, obwohl der physikalische Ursprung der Entropie in beiden Fällen völlig verschieden ist. Zwar scheinen diese beiden Beschreibungen des Universums nicht das Geringste gemeinsam zu haben, aber dennoch vermag prinzipiell kein Experiment zwischen ihnen zu unterscheiden.“³⁵

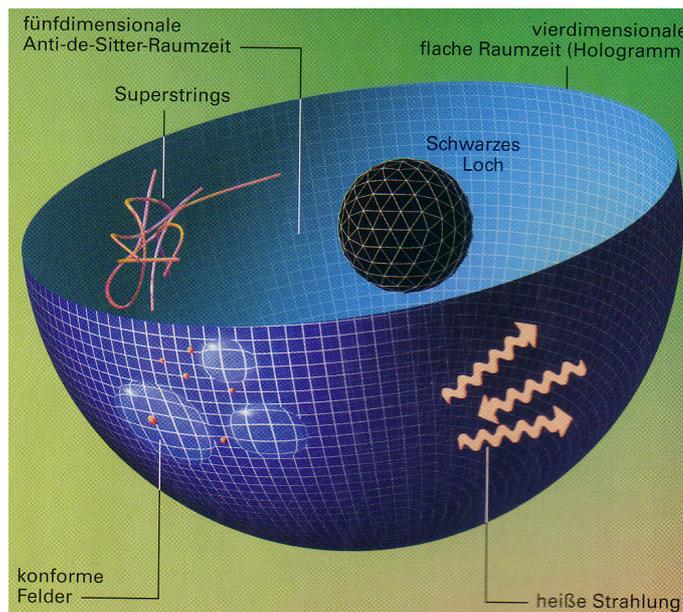


Abbildung 5.6.2: Ein holografisches Modell der Raumzeit

5.7 Die „Hawking-Strahlung“

Als Stephen Hawking 1975 in Paris über seine Entdeckung berichtete, dass nach der Quantentheorie **Schwarze Löcher nicht vollständig schwarz** sind, war die Veranstaltung recht spärlich besucht, weil damals fast niemand in Paris an die Existenz Schwarzer Löcher glaubte. „Außerdem fanden die Franzosen, der Name habe, übersetzt in ihre Sprache - *trou noir* -, zweifelhafte sexuelle Anklänge, weshalb sie ihn durch *astre occlu*, verschlossener oder verborgener Stern, ersetzen.“³⁶ Doch weder dieser noch andere Namensvorschläge nahmen das Bewusstsein der Öffentlichkeit so gefangen wie die englische Bezeichnung „*black hole*“.

Hawking stellte einen Zusammenhang zwischen den damaligen Thesen von Feynman und Dyson, die sich nicht mit der Gravitation beschäftigten, und Einsteins Relativitätstheorie her. Er zeigte, dass Schwarze Löcher strahlen, und fand zusätzlich eine Verbindung zwischen der

³⁵ Jakob D. BEKENSTEIN: Das holografische Universum. In: Spektrum der Wissenschaft, *Sind Sie ein Hologramm?*, S 40.

³⁶ Stephen HAWKING: Das Universum in der Nußschale, S 121.

Thermodynamik und der Schwerkraft als Ansatz zu einer **Vereinheitlichung** in der modernen Physik.

Als Hawking feststellte, dass Schwarze Löcher stetige Teilchenströme abstrahlen könnten, war er selbst verwirrt. Schließlich kam er zu der Überzeugung, dass das Emissionsspektrum genauso wie das jedes anderen thermischen Körpers beschaffen sein müsse. Der reale physikalische Vorgang wird am besten durch seine Erklärung beschrieben: „Das Schwarze Loch erschafft und emittiert genau die Teilchen und die Strahlung, die ein normaler heißer Körper mit einer Temperatur produzieren würde, welche sich proportional zur Oberflächenschwere und umgekehrt proportional zur Masse verhielte. Dadurch wurde Bekensteins Hypothese, daß ein Schwarzes Loch über eine endliche Entropie verfügt, vollkommen schlüssig, war doch jetzt ersichtlich, daß sich ein Schwarzes Loch bei einer endlichen Temperatur ungleich Null in einem thermischen Gleichgewicht befinden könnte.“³⁷

Die Quantenmechanik lehrt, dass die Gesamtheit des Raums mit Paaren „virtueller“ **Teilchen** und **Antiteilchen** erfüllt ist, die sich ständig paarweise trennen und dann wieder aufeinander treffen, um sich gegenseitig zu zerstören. Die Ursache dafür liegt in der Heisenberg'schen Unschärferelation: $E \cdot t \geq \hbar$. Im Gegensatz zu „realen“ Teilchen können diese sich materialisierenden Teilchen mit Detektoren nicht direkt beobachtet werden, weshalb sie als virtuell bezeichnet werden.

Ein Partner in der Teilchen-Antiteilchen-Beziehung hat aufgrund der Quantenmechanik positive, der andere negative Energie. Reale Teilchen sind normalerweise stets von positiver Energie, wodurch der Partner mit negativer Energie nie real existieren kann, außer in der Umgebung Schwarzer Löcher. In der Nähe eines massiven Körpers ist die Energie eines Teilchens immer etwas geringer als in größerer Entfernung, da Energie benötigt wird, um dieses gegen die Massenanziehung des Körpers auf Distanz zu halten. Das Gravitationsfeld eines Schwarzen Lochs ist jedoch so stark, dass selbst reale Teilchen negative Energie aufweisen können. Folglich kann der Partner mit negativer Energie in das Schwarze Loch fallen und zu einem realen Teilchen beziehungsweise Antiteilchen werden. Nun ist es nicht mehr erforderlich, dass sich die beiden Teilchen vernichten. Das zurückgebliebene Teilchen kann entweder seinem Partner in das Schwarze Loch folgen oder als reales Teilchen bzw. Antiteilchen ins Unendliche entkommen. Dies ruft nun den Eindruck einer Strahlung - der so genannten *Hawking-Strahlung* - hervor, die vom Schwarzen Loch ausgeht. Durch diese Strahlung verliert das Schwarze Loch an Masse: Laut Einsteins Formel $E = mc^2$ ist Energie proportional zur Masse, das bedeutet also, wenn dem Schwarzen Loch negative Energie zugeführt wird, verringert sich seine Masse (siehe Kapitel 5.8).³⁸

³⁷ Stephen HAWKING: Einsteins Traum – Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit, S 104.
(nach alter Rechtschreibung zitiert; neue Rechtschreibung: dass)

³⁸ vgl. Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, S 136-137.

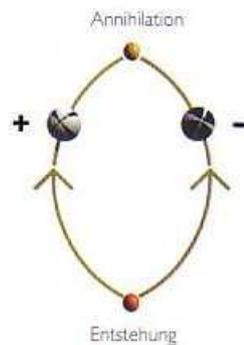


Abbildung 5.7.1: Teilchen-Antiteilchen-Fluktuation

Teilchen und Antiteilchen entstehen gemeinsam, entfernen sich von einander, treffen sich wieder, um sich schließlich zu vernichten.

Nach quantenmechanischen Prinzipien können also Teilchen die Barriere, die gemäß der klassischen Physik um ein Schwarzes Loch herum undurchdringlich wäre, durchtunneln, wobei die Barrieren-Dicke direkt proportional zur Größe des Schwarzen Loches ist. Große Löcher emittieren deshalb kaum Teilchen, aus kleineren Schwarzen Löchern entkommen diese allerdings sehr häufig. Die ausgesandten Teilchen haben weiters ein thermisches Spektrum mit einer entsprechenden Temperatur, die schnell ansteigt, wenn die Masse des Schwarzen Lochs geringer wird. Ein Schwarzes Loch mit einer Sonnenmasse hat demnach eine Temperatur von nur ungefähr 10^{-7} K, die allgemeine Hintergrundstrahlung des Weltalls würde eine Abstrahlung mit dieser Temperatur völlig überlagern. Ein urzeitliches Schwarzes Loch mit einer Masse von nur 10^{12} kg und etwa der Größe eines Protons hätte jedoch eine ungefähre Temperatur von $1,2 \cdot 10^{11}$ K, was einer Energie von rund 10^7 Elektronenvolt entspricht. Bei dieser Temperatur könnten dann möglicherweise Elektron-Positron-Paare und masselose Teilchen, wie beispielsweise Photonen, Neutrinos aber auch Gravitonen, die hypothetischen Träger der Gravitationsenergie, erschaffen werden.³⁹

Die Emission aus Schwarzen Löchern hat gegenüber der herkömmlichen Quantenmechanik einen höheren Grad von **Ungewissheit**. Das Unbestimmtheitsprinzip in der Quantenmechanik besagt, dass ein Beobachter entweder den Ort oder die Geschwindigkeit eines Teilchens vorhersagen kann - nicht aber beides, wodurch die Möglichkeiten zu definitiven Prognosen praktisch halbiert sind. Da die von einem Schwarzen Loch emittierten Teilchen aus einer Region stammen, über die der Beobachter nur sehr begrenzte Kenntnisse besitzt, ist die Situation in diesem Fall noch drastischer. Man kann definitiv weder Ort noch Geschwindigkeit eines Teilchens noch irgendeine Kombination der beiden vorhersagen, sondern nur die Wahrscheinlichkeit prognostizieren, dass bestimmte Teilchen emittiert werden.

Albert Einstein könnte sich also gleich doppelt geirrt haben, als er meinte: „Der liebe Gott würfeln nicht.“ Die Teilchenemission aus Schwarzen Löchern scheint durchaus eine andere Aussage nahelegen: *Gott verwendet nicht nur manchmal die Würfel, sondern er wirft sie gelegentlich auch an einen Ort, wo man sie nicht wahrnehmen kann.*⁴⁰

³⁹ vgl. Stephen HAWKING: Einsteins Traum – Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit, S 105-106.

⁴⁰ vgl. Stephen HAWKING: Einsteins Traum – Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit, S 110-111.

5.8 Verdampfung durch Teilchenemissionen

Ein Schwarzes Loch verliert durch **Teilchenemissionen** stetig an Masse und Größe. Diese Emission nimmt mit sinkender Masse des Schwarzen Lochs ständig an **Intensität** zu, da immer mehr Teilchen in der Lage sind, den Potentialwall zu durchtunneln. Auf lange Sicht wird sich jedes Schwarze Loch im Universum auf diese Weise **verflüchtigen**, wobei bei großen Schwarzen Löchern dieser Prozess sehr lange dauern kann. So könnte ein Schwarzes Loch von der Masse der Sonne eine Lebensdauer von rund 10^{66} Jahren haben. Ein urzeitliches Schwarzes Loch müsste sich dagegen in den 10^{10} Jahren seit dem Urknall, dem Beginn des uns bekannten Universums, fast vollständig verflüchtigt haben. Solche Löcher müssten gegenwärtig Gammastrahlung mit einer Energie von ungefähr 10^8 Elektronenvolt aussenden.⁴¹

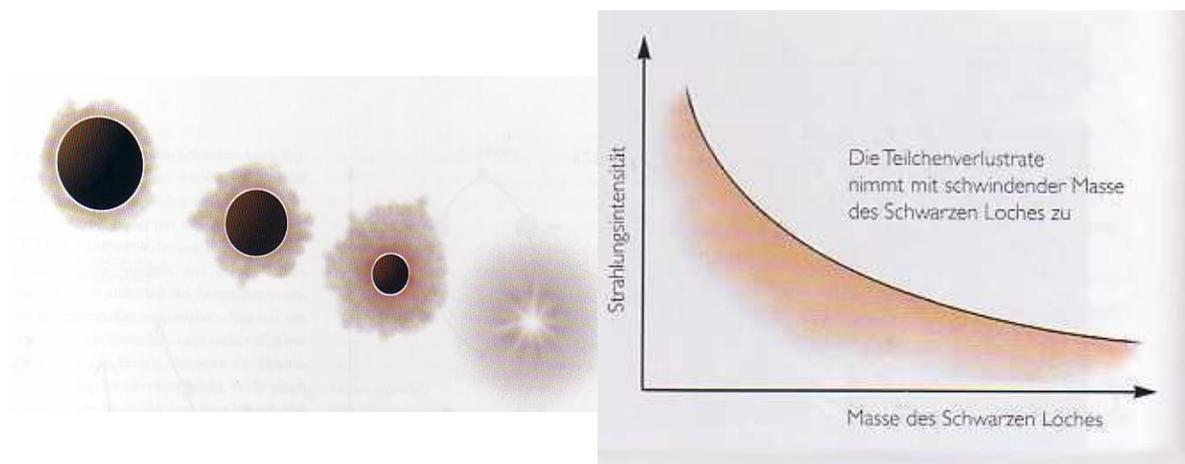


Abbildung 5.8.1: Strahlenemission und Energie-Masse-Verlust Schwarzer Löcher

Durch Strahlenemission verlieren Schwarze Löcher Energie und Masse, und zwar um so mehr, je kleiner das Schwarze Loch wird. Man nimmt an, dass Schwarze Loch schließlich in einer gewaltigen Explosion vollständig verschwindet.

Besitzt die zu einem Schwarzen Loch kollabierende Materie eine elektrische **Gesamtladung**, so wird das entstehende Schwarze Loch die gleiche Ladung aufweisen. Das Schwarze Loch hat also die Tendenz, diejenigen Partner der virtuellen Teilchen-Antiteilchen-Paare mit entgegengesetzter Ladung anzuziehen und Partner mit gleicher Ladung abzustößen. Das Schwarze Loch wird rasch seine Ladung verlieren, da es bevorzugt Teilchen aussendet, deren Ladung das gleiche Vorzeichen hat wie seine eigene. Ähnliches gilt, falls die kollabierende Materie einen **Gesamtdrehimpuls** besitzt - das entstehende Schwarze Loch wird dann rotieren und vorzugsweise Teilchen abstrahlen, die ihm seinen Drehimpuls entziehen.

Dem Schwarzen Loch bleiben die elektrische Ladung, der Drehimpuls und die Masse der zusammenstürzenden Materie erhalten, während jede andere Information verloren geht (siehe dazu auch das „Keine-Haare-Theorem“ in Kapitel 5.6). Diese drei Größen sind nämlich an fernwirkende Felder gebunden: Im Falle der Ladung besteht eine Kopplung mit dem elektromagnetischen Feld, im Falle des Drehimpulses und der Masse mit dem Gravitationsfeld. Experimente von Robert H. Dicke und Wladimir Braginskij legen nahe, dass

⁴¹ vgl. Stephen HAWKING: Einsteins Traum – Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit, S 106-107.

keine Verknüpfung eines fernwirkenden Feldes mit der Baryonenzahl besteht. Diese Zahl ist eine Quanteneigenschaft, wobei Baryonen selbst eine Familie von Teilchen darstellen, denen das Proton und das Neutron angehören. Ein vom Zusammensturz einer Ansammlung von Baryonen resultierendes Schwarzes Loch würde daher die Information über seine Baryonenzahl verlieren und gleiche Mengen von Baryonen und Antibaryonen emittieren. Das Verschwinden eines solchen Schwarzen Loches würde dann gegen eines der heiligsten Gesetze der Teilchenphysik verstoßen, nämlich gegen das Gesetz der Baryonenerhaltung.⁴²

5.9 Das Ende eines Schwarzen Lochs

Über das letzte Stadium der Verflüchtigung eines Schwarzen Loches gibt es **zwei** Theorien, die sich auf eine unterschiedliche Annahme der Anzahl der Elementarteilchen beziehen.

Wenn die Elementarteilchen, wie heute angenommen wird, aus **sechs verschiedenen Arten** von Quarks bestehen, würde das Schwarze Loch mit einer gewaltigen Explosion enden. Dabei würde ungefähr die gleiche Energie wie von ca. 10^7 Wasserstoffbomben von je einer Megatonne frei werden.

R. Hagedorn, ein Mitarbeiter der Europäischen Organisation für Kernforschung (CERN), hat eine Theorie aufgestellt, der zufolge eine **unendliche Zahl** von Elementarteilchen mit zunehmend größerer Masse existiert. Während das Schwarze Loch laufend immer kleiner würde, würde es eine immer größere Zahl verschiedenster Teilchenarten abstrahlen und schließlich in einer Explosion enden, die um den Faktor 10^5 gewaltiger wäre als jene, die man nach der Quarkhypothese erwarten würde. Die Beobachtung der Explosion eines Schwarzen Loches könnte daher äußerst wichtige Informationen über die Physik von Elementarteilchen liefern - Erkenntnisse, die möglicherweise auf keinem anderen Wege zu erhalten sind.

Die Explosion eines Schwarzen Loches würde vielleicht einen massiven Ausbruch energiereicher **Gammastrahlen** verursachen. Diese könnten zwar durch Gammastrahlendetektoren in Satelliten oder an Ballons beobachtet werden, was aber technisch sehr aufwändig wäre. Eine wesentlich billigere und elegantere Möglichkeit besteht darin, die obere Erdatmosphäre als Detektor zu verwenden. In die Atmosphäre eintauchende energiereiche Gammastrahlen würden einen Schauer von Elektron-Positron-Paaren auslösen. Diese Paare würden die Atmosphäre rascher durchqueren, als es das Licht vermag, denn dieses wird durch die Wechselwirkung mit Luftmolekülen verlangsamt. So produzieren die Elektronen und Positronen eine Art Überschallknall elektromagnetischer Wellen, genauer gesagt eine Stoßwelle im elektromagnetischen Feld. Eine solche Stoßwelle, die als *Cerenkov-Strahlung* bezeichnet wird, wäre von der Erde aus als Lichtblitz wahrnehmbar.

Der **Urknall** ist mit der Explosion eines Schwarzen Lochs vergleichbar, das Ausmaß war natürlich ungleich größer. Daraus schöpfen Wissenschaftler eine große Hoffnung: Wird verstanden, wie Schwarze Löcher Teilchen erzeugen, so kann vielleicht auch abgeleitet werden, wie durch den Urknall alle Dinge im Universum entstanden sind. In einem Schwarzen Loch kollabiert die Materie und ist für immer verloren, gleichzeitig aber wird an ihrer Stelle wieder neue Materie produziert. Eine frühere Phase des Universums ist daher

⁴² vgl. Stephen HAWKING: Einsteins Traum – Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit, S 109-110.

denkbar, in der die Materie zusammenstürzte, um dann durch den Urknall wieder neu geschaffen zu werden.⁴³

5.10 Der Nachweis Schwarzer Löcher

Es wird immer wieder die Frage nach der tatsächlichen Existenz Schwarzer Löcher gestellt: Sie senden keinerlei Strahlung aus, keine Information gelangt jemals aus ihnen heraus, und trotzdem sind sich die Astrophysiker sicher, dass es sie gibt.

Selbst wenn ein Schwarzes Loch hell leuchten würde, wäre es äußerst schwer auffindbar. Dennoch gibt es zahlreiche Hinweise für die Existenz sowohl „normaler“ als auch supermassiver Schwarzer Löcher.

Passiert ein Schwarzes Loch Bereiche mit Ansammlungen interstellarer Materie oder befindet es sich in der Nähe eines anderen Sterns, kann es durch die Wirkung der Gravitation langsam und stetig Materie anziehen. Dadurch nimmt deren kinetische Energie zu, und wird somit extrem aufgeheizt und verdichtet. Während das Gas immer heißer wird, gibt es Energie in Form von Strahlung aller Wellenlängen ab, am häufigsten im Bereich der **Röntgenstrahlung**. Kurz bevor die Materie den Ereignishorizont überschreitet, erreicht die Menge der Röntgenstrahlung ihr Maximum. Diese Strahlung kann von Astronomen verwendet werden, um die Bedingungen in der Umgebung eines Schwarzen Loches zu erforschen (siehe auch Kapitel 5.3).

In einem Doppelsternsystem kann ein Schwarzes Loch Materie von seinem Begleiter abziehen, wodurch in diesem Fall eine starke Emission von Röntgenstrahlung auftritt, durch die das Schwarze Loch nachgewiesen werden kann. Zusätzlich können Wissenschaftler beispielsweise durch Messung der **Umlaufzeiten** die Masse des Begleiters berechnen und so bestimmen, ob es sich um einen Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch handelt. 1966, kurz nach der Entdeckung der ersten Röntgenquellen im All, begannen Astrophysiker, in Doppelsternsystemen nach Röntgenstrahlung zu forschen. Seitdem wird nach einer Art Signatur gesucht, die eine Strahlungsquelle eindeutig als Schwarzes Loch klassifiziert.

Momentan geht man davon aus, dass die **Masse** eines kollabierenden Sterns mindestens drei Sonnenmassen überschreiten muss, damit ein Schwarzes Loch entstehen kann. Auch gewisse Muster im Spektrum der Röntgenstrahlung eines Schwarzen Lochs werden zur Erkennung verwendet. Es ist jedoch bis heute nicht ganz klar, ob diese Charakteristika ausreichen können, um ein unbekanntes Himmelsobjekt eindeutig als Schwarzes Loch zu identifizieren. Zahlreiche Objekte, allen voran Cygnus X-1 (siehe Abbildung 5.3.1), wurden bisher aufgrund solcher Merkmale vorläufig als Schwarze Löcher klassifiziert - es gibt jedoch Wissenschaftler, die immer noch auf endgültige, bestätigende Hinweise warten.

Da Röntgenstrahlung von der Erdatmosphäre absorbiert wird, benutzen Astrophysiker hochpräzise Röntgendetektoren, die auf Satelliten angebracht sind und so dem störenden Einfluss der Atmosphäre entgehen. Der modernste Röntgensatellit, der zur Zeit die Erde umkreist, wird *Chandra* genannt. Auf seiner stark elliptischen Umlaufbahn hält er sich zu 85

⁴³ vgl. Stephen HAWKING: Einsteins Traum – Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit, S 107-109.

Prozent seiner Umlaufzeit oberhalb der Strahlungsgürtel der Erde auf und kann auf diese Weise 55 Stunden lang ununterbrochen Röntgenquellen im All analysieren.⁴⁴



Abbildung 5.10.1: Der Röntgensatellit Chandra

Aus der Allgemeinen Relativitätstheorie folgt, dass schwere Objekte, die in Bewegung sind, eine Emission von **Gravitationswellen** hervorrufen - Kräuselungen in der Krümmung der Raumzeit, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Man kann sie beobachten, weil sie den Abstand zwischen benachbarten, frei beweglichen Gegenständen geringfügig verändern, doch sie sind sehr schwierig zu entdecken. In den Vereinigten Staaten, Europa und Japan sind zahlreiche Detektoren gebaut worden, die solche Ortsverlagerungen mit einer Genauigkeit messen können, die $1:10^{21}$ entspricht.⁴⁵

5.11 Verschiedene Typen von Schwarzen Löchern

Die Wissenschaftler unterscheiden im Prinzip vier verschiedene Arten von Schwarzen Löchern:

- Stellare Schwarze Löcher
- Mittelgroße Schwarze Löcher
- Galaktische oder Supermassive Schwarze Löcher
- Minilöcher oder Primordiale Schwarze Löcher

⁴⁴ vgl. Harald FRATER, Springer Verlag, Heidelberg – MMCD GmbH, Düsseldorf: *G.O. Wissen Online – FOCUS Schwarze Löcher*, März 2001. - URL: <http://www.g-o.de/kap4a/40cd0103.htm>, [Stand 14. 1. 2004].

⁴⁵ vgl. Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, S 117.

Am häufigsten kommen **Stellare Schwarze Löcher** vor. Das sind Kerne ausgebrannter, einst massereicher Sterne. Ihre Größe beträgt zwischen vier und etwa 20 Sonnenmassen.

Mittelgroße Schwarze Löcher entstehen, wenn Stellare Schwarze Löcher an Masse zunehmen oder verschmelzen. Im Herbst 2002 sichtete das Weltraumteleskop Hubble zwei bemerkenswerte Exemplare: eines mit 40 Sonnenmassen im Kugelsternhaufen M 15 (Sternbild Pegasus, Entfernung: 32000 Lichtjahre), das andere mit rund 20000 Sonnenmassen im Kugelsternhaufen G1 (Sternbild Andromeda-Galaxie, Entfernung: 2,2 Millionen Lichtjahre).

Der nächste Typ sind **Galaktische oder Supermassive Schwarze Löcher**. Im Zentrum junger, aktiver Galaxien befinden sich Quasare - gleißend helle Kernregionen mit einer enormen Energie-Abstrahlung. Ihre Leuchtkraft entspricht der von bis zu einer Billiarde Sonnen, was daran liegt, dass sich in ihrem Inneren riesige Schwarze Löcher als Energielieferanten verbergen.

Diese Schwarzen Löcher entstehen durch Ansammlungen stellarer Gase sowie durch Kollisionen und Fusionen von Sternen im Zentrum der Galaxien. Durch ständiges Ansaugen von Gas, Staub und gesamten Sternen werden sie immer größer. Dabei wird die angesaugte Materie auf Millionen von Grad erhitzt und strahlt Energie als elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Bereich ab. „Vermutlich haben die meisten Galaxien eine solche aktive Quasar-Phase durchlebt. Das zentrale Schwarze Loch der Andromeda-Galaxie hat zum Beispiel 30 Millionen Sonnenmassen und den Radius unseres Sonnensystems. Im Januar 2002 funkte das Weltraumteleskop Chandra die Röntgenbilder dreier Quasare zur Erde. Ihre Röntgensignale wurden vor 13 Milliarden Jahren abgestrahlt. Was wir heute sehen, sind also Quasare, wie sie kurz nach dem Urknall aussahen. Schätzungen zufolge wiegen die Schwarzen Löcher in ihren Zentren zwischen einer und zehn Milliarden Sonnenmassen. Das zentrale Loch unserer Milchstraße bringt es dagegen auf ‚nur‘ drei Millionen Sonnenmassen.“⁴⁶

Im Zusammenhang mit Supermassiven Schwarzen Löchern sei noch Folgendes erwähnt: Beinahe jede große Galaxie birgt in ihrem Kern ein massereiches Schwarzes Loch. Wissenschaftler spekulieren nun, dass dieses Faktum mit hell erleuchteten Gebieten, die eine besonders hohe Geburtenrate von Sternen haben, zusammenhängt. Da der gravitative Einfluss eines Schwarzen Lochs nur auf seine unmittelbare Umgebung beschränkt ist, ist in den meisten Regionen des Sternsystems kaum etwas davon zu bemerken. Darum wurde lange Zeit angenommen, dass die zentralen Schwarzen Löcher die Vorgänge im Außenbereich einer Galaxie nicht beeinflussen können. Doch in den letzten zehn Jahren stellten die Astronomen fest, dass die zentrale Aktivität einer Galaxie häufig mit einer stark erhöhten Sternbildung, einem so genannten *Starburst*, weiter außen einhergeht. Dieser Zusammenhang von aktiven Kernen mit einer erhöhten Sternentstehung ist heute ein bewegtes Forschungsgebiet. Die Wissenschaftler wollen nicht nur die Vorgänge in den untersuchten Galaxien verstehen, sondern auch einige bedeutende Fragen dabei lösen. So wird beispielsweise untersucht, wie im jungen Universum die erste Phase der Sternbildung verlief, ob extrem massereiche Schwarze Löcher dabei eine Rolle spielten und wann und wie schnell sich diese bildeten.

Zu den hellsten aktiven Kernen zählen die Quasare - sie können die milliarden- bis billionenfache Leuchtkraft der Sonne haben und somit auf astronomischen Aufnahmen das Sternenlicht ihrer Galaxien völlig überstrahlen. Als Energiequelle der Quasare und anderer

⁴⁶ Wolfgang GESSLER: Die Fressmonster des Universums. In: P.M. Perspektive – Das Magazin für kompaktes Wissen, *Geheimnisvoller Weltraum*, hrsg. v. Hans-Hermann Sprado. Bd. 1/2003. München: Gruner + Jahr AG & Co Druck- und Verlagshaus, 2003, S 92.

Typen von aktiven Galaxienkernen vermuten die Forscher Schwarze Löcher mit einer Masse, die um einen Faktor 10^6 bis 10^9 die Masse der Sonne überschreitet. Die gewaltige Strahlungsleistung dieser Objekte entsteht im inneren Bereich der Akkretionsscheibe, der kleiner ist als das Sonnensystem. Neben energiereicher Gamma- und Röntgenstrahlung setzen die aktiven Galaxienkerne auch alle Formen langwelligerer elektromagnetischer Strahlung frei: ultraviolettes, sichtbares und infrarotes Licht sowie Radiostrahlung. Einige aktive Galaxienkerne weisen auch Jets auf (siehe Kapitel 5.4), die sich durch die Existenz von Schwarzen Löchern in diesen Gebieten erklären lassen.

Wissenschaftler konnten einen Zusammenhang zwischen der Gesamtmasse der Sterne im Zentralbereich einer Galaxie und der Masse des zugehörigen Schwarzen Lochs nachweisen: Demnach umfasst das Loch etwa ein Tausendstel der Sternenmasse. Dieser Zusammenhang besteht auch für die meisten aktiven Galaxienkerne. Es muss also ein Mechanismus gewirkt haben, der die Masse des Schwarzen Lochs in eine feste Beziehung zum Ausmaß der Sternentstehung im Zentralbereich gesetzt hat. Doch es gibt noch offene Fragen, und bisher ist dieser Mechanismus nicht richtig verstanden worden.⁴⁷

Da Schwarze Löcher beliebig groß sein können, gibt es auch so genannte **Minilöcher**, die nur atomare Ausmaße haben. Die Gravitations- und Gezeitenkräfte sind bei den Minilöchern besonders groß - sie sind so stark, dass sie sogar einzelne Elektronen und Protonen beeinflussen.

Schwarze Löcher geben Strahlung ab (siehe Kapitel 5.7) und sind somit nicht vollständig schwarz. Zur Emission von Elektronen kann es allerdings nur bei Minilöchern kommen, die selbst nicht größer als ein Elektron sind. Strahlt ein Miniloch, schrumpft es, und die von ihm ausgesandte Strahlung wird heißer und immer stärker, bis es schließlich in einem Blitz von Gammastrahlen verschwindet.⁴⁸

Ob **Primordiale Schwarze Löcher** existieren, wird aktuell unter den Fachleuten heftig diskutiert. Es handelt sich dabei um verhältnismäßig kleine, „urzeitliche“ Schwarze Löcher - also Minilöcher, die beim Urknall aus lokalen Materieverdichtungen entstanden sein könnten. Eine Theorie besagt, dass sie unmittelbar nach dem Urknall entstanden, wo - zur besseren Vorstellung - die Masse des Mount Everest (10^9 Tonnen) auf die Größe eines Elementarteilchens zusammengepresst wurde. Eine andere Theorie geht davon aus, dass sich diese Schwarzen Löcher erst später aus den zentralen Gaswolken und den Sternhaufen junger Galaxien gebildet haben.⁴⁹

5.12 Häufigkeiten Schwarzer Löcher

Am California Institute of Technology wurden, basierend auf den Messungen des kosmischen Gammastrahlenhintergrunds durch den Satelliten SAS-2, Berechnungen von Don N. Page und Stephen Hawking durchgeführt. Diese ergaben, dass die **durchschnittliche Häufigkeit** urzeitlicher Schwarzer Löcher im Universum bei weniger als rund zweihundert pro Kubiklichtjahr liegen muss. Nimmt man anstatt einer gleichförmigen Verteilung an, dass sich

⁴⁷ vgl. Kimberly WEAVER: Galaxien im Ausnahmezustand. In: Spektrum der Wissenschaft, *Jagd auf neue Elementarteilchen*, hrsg. v. Dr. habil. Reinhard Breuer. Bd. September 2003. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, 2003, S 38-41.

⁴⁸ vgl. Martin REES: Vor dem Anfang – Eine Geschichte des Universums. ISBN 3-10-062913-2. Frankfurt/Main: S. Fischer Verlag GmbH, 1998, 2. Auflage, S 230.

⁴⁹ vgl. Wolfgang GESSLER: Die Fressmonster des Universums. In: P.M. Perspektive – Das Magazin für kompaktes Wissen, *Geheimnisvoller Weltraum*, S 92.

urzeitliche Schwarze Löcher in dünnen Wolken sich rasch bewegender Sterne (dem so genannten „Halo“, in das jede Galaxie eingebettet ist) konzentrieren, so könnte die lokale Dichte in unserer Galaxie um den Faktor 10^6 größer sein als diese Zahl. Demnach könnte das der Erde nächstgelegene Schwarze Loch mindestens so weit entfernt sein wie der Planet Pluto.⁵⁰

Experimente von Neil A. Porter und Trevor C. Weekes vom University College in Dublin legen nahe, dass weniger als zwei Explosionen von Schwarzen Löchern pro Kubiklichtjahr und Jahrhundert in unserem Galaxiengebiet erfolgen. Diese Untersuchungen beruhen auf der Annahme, dass Schwarze Löcher tatsächlich so explodieren, wie es Hagedorns Theorie vorhersagt. Daraus wäre zu folgern, dass die Dichte der urzeitlichen Schwarzen Löcher weniger als 10^8 Kilogramm pro Kubiklichtjahr beträgt. Es müsste zukünftig möglich sein, die Feinheit solcher Beobachtungen erheblich zu steigern. Auch wenn sich dadurch keine positiven Anhaltspunkte für urzeitliche Schwarze Löcher ergeben sollten, wären sie sehr nützlich, da sich daraus für die Dichte solcher Löcher eine niedrige Obergrenze ergeben würde. Außerdem liegt dann der Schluss nahe, dass das Universum in seiner Frühphase sehr glatt und frei von Turbulenzen gewesen ist.⁵¹

⁵⁰ vgl. Stephen HAWKING: Einsteins Traum – Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit, S 107.

⁵¹ vgl. Stephen HAWKING, Einsteins Traum – Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit, S 108-109.

6. Kollisionen Schwarzer Löcher

Da Kollisionen Schwarzer Löcher aktuell nicht beobachtbar sind, wird in diesem Abschnitt versucht, verstärkt auch durch Computersimulationen und der dahinterliegenden Theorien, die dabei auftretenden physikalischen Situationen darzustellen und die mittels Computer gewinnbaren Erkenntnisse näher zu erklären.

6.1 Die Simulation am Supercomputer

Die Computersimulation verschmelzender Schwarzer Löcher erfordert den Einsatz von Supercomputern und ausgefeilten Programmiertricks.

Im „Computing Applications Building“, dem zentralen Rechenraum des National Center for Supercomputing Applications (NCSA) der University of Illinois in Urbana / Champaign, steht den Wissenschaftlern eine derartige Rechenkapazität zur Verfügung. Im Juni 1999 führte dort eine Arbeitsgruppe des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik, auch Albert-Einstein-Institut (AEI) genannt, detaillierte, vollständig dreidimensionale Rechnungen allgemein-relativistischer Computersimulationen durch.

Die Berechnung der Kollisionen Schwarzer Löcher im Computer und die Untersuchung der dabei entstehenden Gravitationswellen erfolgte im Rahmen einer internationalen Arbeitsgemeinschaft.⁵²

6.2 Die Emission von Gravitationswellen

Aufgrund ihrer großen Masse gehören kollidierende Schwarze Löcher zu den stärksten Quellen von Gravitationswellen. Die moderne Astrophysik hofft, dass aktuell gebaute oder geplante Detektoren in der Lage sein werden, auch solche Wellen nachweisen zu können, insbesondere wenn sie aus Entfernungen von etlichen Millionen Lichtjahren die Erde erreichen.

Es ist aber nicht zu erwarten, dass sich dieser Nachweis problemlos gestalten wird, denn die von den Interferometern aufzuzeichnenden Längenänderungen betragen lediglich etwa 10^{-22} Zentimeter - das sind nur Bruchteile des Durchmessers eines Atomkerns. Um die Signale der Gravitationswellen vom Rauschen diverser Störquellen zu trennen, wird daher ein erheblicher technischer Aufwand nötig sein. Dieses Vorhaben wird umso leichter gelingen, je mehr über die signifikante Signalstruktur im Vorhinein bekannt ist, wofür Computersimulationen bestens geeignet sind.⁵³

⁵² vgl. Werner BENDER: Kollisionen Schwarzer Löcher. In: Sterne und Weltraum Special 6, *Gravitation – Urkraft des Kosmos*, hrsg. v. Prof. Dr. Hans Elsässer. Bd. Mai 2001. Heidelberg: Verlag Sterne und Weltraum, Hüthing GmbH & Co. KG, 2001, S 54.

⁵³ vgl. Werner BENDER: Kollisionen Schwarzer Löcher. In: Sterne und Weltraum Special 6, *Gravitation – Urkraft des Kosmos*, S 57.

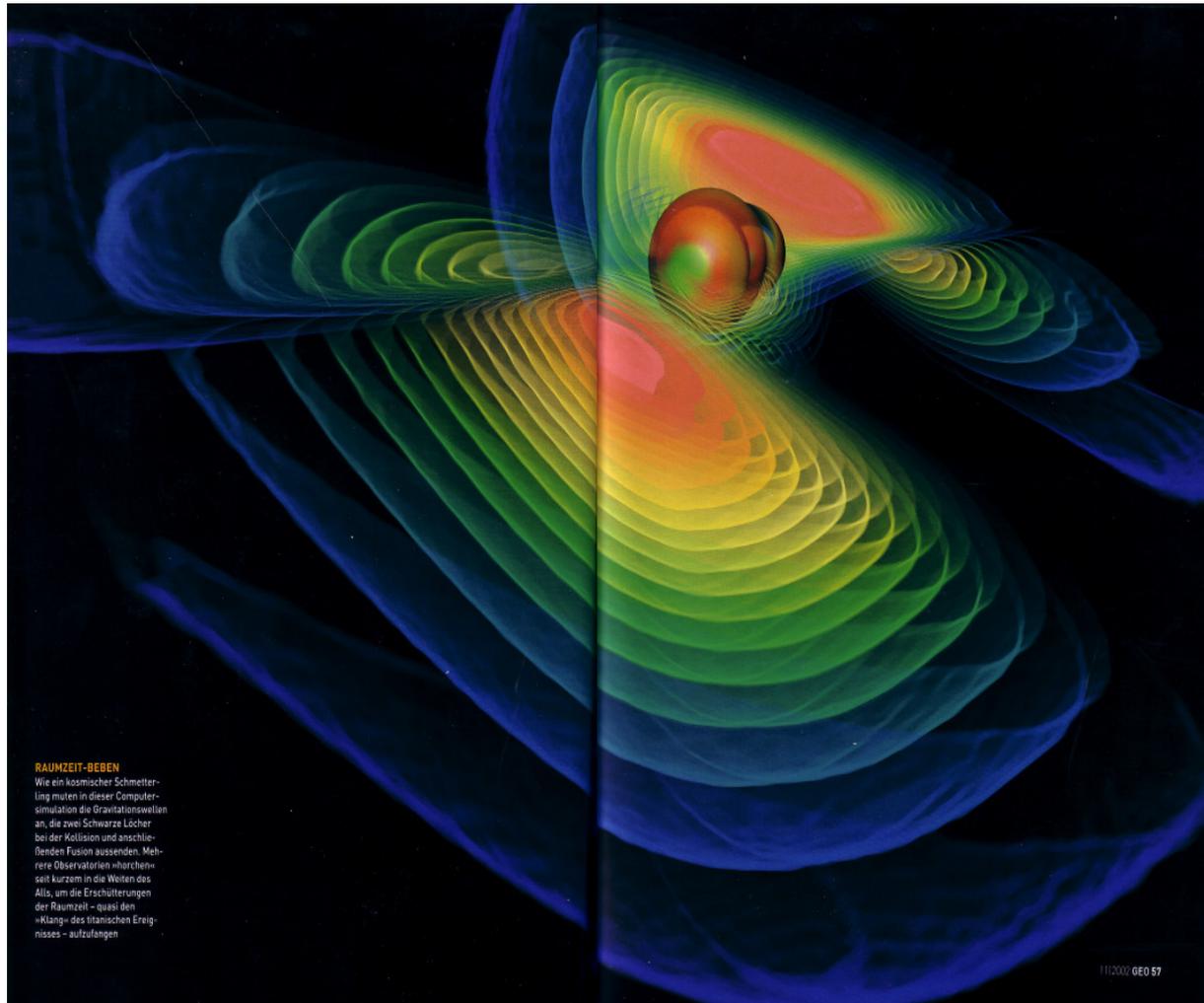


Abbildung 6.2.1: Kollision zweier Schwarzer Löcher - Ergebnis einer Computersimulation

Diese doppelte Darstellung der Resultate einer Computersimulation zeigt in grafischer Form, welche Art von Gravitationswellen bei der Kollision zweier Schwarzer Löcher entstehen könnte.

6.3 Das Zwei-Körper-Problem

Albert Einstein vermutete Schwarze Löcher nur aufgrund der möglichen mathematischen Lösungen seiner Gleichungen. Er glaubte jedoch nicht an ihre tatsächliche Existenz in der Natur.

Die beobachtende Astronomie der letzten Jahre konnte seinen Pessimismus aber widerlegen. Zwar sind Schwarze Löcher unsichtbar und daher nur indirekt nachweisbar - doch die modernen Teleskope auf der Erde und im Weltraum haben viele Objekte entdeckt, die mit ziemlicher Sicherheit Schwarze Löcher sind.

Zum Beispiel konnten im Jahre 2001 die räumlichen Bahnen und die Geschwindigkeiten bestimmt werden, mit denen sich Sterne um den unmittelbaren Kern der Milchstraße bewegen. Da die Bahnen so eng und die Geschwindigkeiten so hoch sind, liegt der Schluss

auf ein sehr kompaktes, massereiches Objekt im Kern - also auf ein Schwarzes Loch - sehr nahe.

Obwohl Albert Einstein die Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie bereits im Jahre 1915 veröffentlichte und seither einige Generationen von Wissenschaftlern die Theorie weiterentwickelt haben, bleiben nach wie vor sogar elementar erscheinende Probleme ungelöst. Dazu gehört das so genannte Zwei-Körper-Problem, also die Situation zweier kompakter, sich gegenseitig durch ihre Schwerkraft beeinflussender Massen.

Newton zeigte im Rahmen der klassischen Gravitationstheorie, dass sich die beiden Massen auf Ellipsen- oder Hyperbelbahnen umeinander bewegen, wodurch die von Kepler entdeckten Gesetze der Planetenbewegung aus dem Gravitationsgesetz ableitbar waren. Im allgemein-relativistischen Ansatz hat bisher allerdings jeder Lösungsversuch des Zwei-Körper-Problems ohne Computerhilfe nicht funktioniert.

Prinzipielle Überlegungen zeigen sofort, dass es im Gegensatz zu Newton in der Allgemeinen Relativitätstheorie keine statische Lösung mit zeitlich unveränderlichen Bahnen geben kann. Die beiden Massen führen, da sie gegenseitig Kräfte aufeinander ausüben, beschleunigte Bewegungen durch. Diese beschleunigten Massen geben gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie analog zur Elektrodynamik Strahlung ab und senden dann Gravitationswellen aus, falls es sich bei den beschleunigten Ladungen um elektromagnetische Wellen handelt.

Jedes Objekt, das sich also um ein anderes bewegt, strahlt dabei seine Bewegungsenergie als Gravitationsstrahlung sukzessive in den Kosmos ab, wobei sich im Laufe der Zeit die beiden Massen immer näher kommen und schließlich miteinander kollidieren. Wegen der Vernachlässigbarkeit bei kleinen, entfernten Objekten trifft dies jedoch nur auf sehr massereiche kompakte Körper wie Neutronensterne oder Schwarze Löcher, die sich sehr nahe umeinander bewegen, zu.

Doch nun zurück zu den Informatikern und Astrophysikern, deren Ziel es ist, mit Hilfe der schnellsten Computer die Details des Zwei-Körper-Problems, insbesondere aber die Emission von Gravitationswellen, zu berechnen. Da für den Augenblick des Verschmelzens zweier Schwarzer Löcher, bei dem besonders starke Gravitationsstrahlung emittiert wird, noch nicht einmal Näherungsverfahren wie bei der Berechnung für schwache Gravitationsfelder existierten, mussten erst geeignete numerische Methoden entwickelt und dann auf Supercomputern umgesetzt werden.

In der klassischen Theorie des Newton'schen Gravitationsgesetzes ist nur eine Gleichung zu lösen, in der Allgemeinen Relativitätstheorie ist ein ineinander verwobenes System aus zehn Gleichungen zu beachten. Zur Lösung unterteilen Wissenschaftler den Raum in einzelne Punkte und wenden Punkt für Punkt den Formalismus der Allgemeinen Relativitätstheorie darauf an, wobei die Genauigkeit der erzielten Ergebnisse mit der Anzahl der verwendeten Punkte zunimmt. Um wirklich aussagekräftige Resultate zu erzielen, müssen schnelle Hochleistungsrechner etliche Tage lang rechnen, wobei das Ergebnis dann hauptsächlich als hochkomplexes Tensorfeld vorliegt und dessen Werte an jedem Datenpunkt der berechneten Raumzeit unterschiedlich sind. Die dabei produzierte Datenmenge ist so enorm, dass sie weder auf eine Festplatte noch in den Hauptspeicher eines Rechners passt, weshalb auch Verfahren zur Datenreduktion eingesetzt werden, ohne die Informationen über die wichtigen Strukturen zu verlieren. Eine solche Struktur ist beispielsweise der „scheinbare

Ereignishorizont“, zusätzlich verwenden die Forscher auch den so genannten *Weyl-Skalar*, der die auslaufenden Gravitationswellen beschreibt.

Jede Simulationsrechnung basiert auf einer speziellen Parameterdatei, welche die Werte für die Anfangsdaten beinhaltet, aus denen der Computer eine numerische Raumzeit konstruiert und schließlich von einem Zeitschritt zum nächsten die Berechnungen, die oft etliche Wochen dauern können, durchführt. Die hohe Rechenleistung eines Supercomputers im Gegensatz zu einem einfachen PC ist deshalb notwendig, da oftmals eine wichtige Struktur erst bei sehr hoher Gitterauflösung erkennbar ist. Die Auswertung eines langen Simulationslaufes ergibt oft erwartete Strukturen, aber auch völlig unerwartete Ergebnisse sind möglich, was oft von Fehlern im Parametersatz herrührt. Bei erkennbaren Strukturen erfolgt schließlich eine Überprüfung der „Echtheit“, d. h. ob sie physikalisch real sind, oder ob es sich um Artefakte handelt, die durch Ungenauigkeiten in der Computer-Numerik entstanden sind.⁵⁴

6.4 Das Problem der Singularitäten

Ein Problem der Relativitätstheorie stellen die so genannten **Singularitäten** dar, die in folgende Klassen unterteilt werden können:

- numerische Singularitäten
- Koordinatensingularitäten
- physikalische Singularitäten

Eine **numerische** Singularität liegt vor, wenn bei Berechnungen in der numerischen Relativitätstheorie irgendein Wert unendlich und damit nicht mehr handhabbar wird, und entsteht meist durch begrenzte Rechengenauigkeiten. Zum Beispiel ergibt $(1 + 10^{-11}) - 1$ den Wert Null, wenn mit zehn Stellen Genauigkeit gerechnet wird. Eine Division durch Null ist nicht definiert und verhindert eine sinnvolle Weiterrechnung. Die Umordnung zu $(1 - 1) + 10^{-11}$ ergibt 10^{-11} . Durch sinnvolle Umformungen können numerische Singularitäten also vermieden werden.

Koordinatensingularitäten sind aus der von Karl Schwarzschild berechneten Metrik eines statischen Schwarzen Loches bekannt. Demnach ist am Ereignishorizont die Metrik singulär, d. h. gemessene radiale Abstände sind unendlich groß (Umfangsmessungen sind davon allerdings nicht tangiert). Bei unendlichen Daten können jedoch auch die besten numerischen Verfahren Unendlichkeiten in den Berechnungen nicht vermeiden, es hilft nur die Suche nach einem verbesserten Koordinatensystem. Es existiert noch kein geeignetes Standardverfahren hierfür - die Wahl eines guten Koordinatensystems ist noch immer ein wichtiges Forschungsgebiet.

Aber auch das beste Koordinatensystem hilft nichts, wenn man auf den heikelsten Punkt einer Raumzeit trifft: die **physikalische Singularität** im Zentrum eines Schwarzen Lochs. Dieser Punkt ist per definitionem nicht berechenbar, und es gibt keine Theorien oder Methodiken außer dem Ratschlag, diesen Punkt numerisch mit allen Mitteln zu umgehen. Obwohl das

⁵⁴ vgl. Werner BENDER: Kollisionen Schwarzer Löcher. In: Sterne und Weltraum Special 6, *Gravitation – Urkraft des Kosmos*, S 57, 59-60.

Zentrum eines Schwarzen Lochs höchst interessant ist, entzieht es sich schon rein theoretisch und daher auch numerisch jeder Möglichkeit einer Berechnung. Derartige Singulariätsvermeidungsverfahren sind ebenfalls Bestandteil der aktuellen Forschung.

Physikalische Singularitäten existieren nicht, wenn Neutronensterne, die wie Schwarze Löcher von einem extrem starken Gravitationsfeld umgeben sind, betrachtet werden, da die Feldstärke an keiner Stelle unendlich ist. Neutronensterne kann man sich als riesige Atomkerne von einigen Kilometern Durchmesser vorstellen, die allein aus Neutronen bestehen (siehe auch Kapitel 3.3). Im Gegensatz zu Schwarzen Löchern widerstehen die abstoßenden Kräfte zwischen den Neutronen jedoch noch der enormen Gravitation, und ein aus einer Supernova entstandener, einzelner Neutronenstern ist noch Milliarden Jahre danach stabil. Neutronensterne können auch gepaart auftreten. Solche Doppelsysteme geben allmählich Rotationsenergie durch Abstrahlung von Gravitationswellen ab, wodurch sich die Komponenten immer mehr nähern und schließlich kollidieren. Die abstoßenden Kräfte zwischen den Neutronen können wahrscheinlich den weiteren Kollaps nicht mehr abwenden, wodurch ein Schwarzes Loch aus der Verschmelzung der beiden Neutronensterne entsteht. Dabei wird ungefähr gleich viel Energie in Form von Gravitationswellen freigesetzt, wie dies bei der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher der Fall ist, weshalb die Untersuchung kollidierender Neutronensterne für den möglichen Einsatz von Gravitationswellendetektoren wichtige Erkenntnisse liefert.⁵⁵

6.5 Brillwellen

Der Physiker Dieter Brill konnte 1959 beweisen, dass auch reines Vakuum wie ein Schwarzes Loch wirken kann. Dieses Phänomen wird daher nach ihm als **Brillwellen** bezeichnet.

Brillwellen bestehen aus extrem stark geballter Gravitationsenergie, die - wie jede Form von Energie - ein Massenäquivalent besitzt, wodurch die Gravitationsenergie selbst genauso anziehend wirkt wie Materie. Das Massenäquivalent kann nach Einsteins Formel $E = mc^2$ bestimmt werden. Durch den Selbstziehungseffekt der Gravitationsenergie, der auf der Allgemeinen Relativitätstheorie basiert, wird der theoretische Umgang mit dieser Energieform zusätzlich erschwert. Gravitation kann eigentlich als gekrümmte Raumzeit verstanden werden, wobei in dieser Krümmung selbst die Gravitationsenergie gespeichert ist. Auch wenn der Raum keinerlei Materie aufweist, kann er trotzdem Gravitationsenergie beinhalten. Ist diese nun genügend groß, so ist es möglich, dass die entsprechende Krümmung keinen Verlauf nimmt, der dem einer Wasserwelle in einem Ozean ähnelt, sondern in sich zusammenstürzt, wodurch ein Schwarzes Loch aus reiner Gravitationsenergie entsteht.⁵⁶

Auch von diesen rein theoretischen Brillwellen stehen Astrophysikern aktuell Simulationsdaten an Computern zur Verfügung, aus denen Bilder erzeugt werden können, die zum weiteren Verständnis der Entstehung und Kollision Schwarzer Löcher wichtige Beiträge liefern.

⁵⁵ vgl. Werner BENDER: Kollisionen Schwarzer Löcher. In: *Sterne und Weltraum Special 6, Gravitation – Urkraft des Kosmos*, S 60-61.

⁵⁶ vgl. Werner BENDER: Kollisionen Schwarzer Löcher. In: *Sterne und Weltraum Special 6, Gravitation – Urkraft des Kosmos*, S 61.

7. Erklärung der Schwarzen Löcher durch die Relativitätstheorie

Wie die vorangegangenen Kapitel dieser Arbeit zeigen, spielt die Relativitätstheorie in der Physik der Schwarzen Löcher eine wesentliche Rolle. In diesem Abschnitt erfolgt deshalb eine kurze Zusammenstellung von Einsteins bahnbrechenden Entdeckungen, wobei besonders die Auswirkungen seiner Theorie auf die Erklärung der Eigenschaften Schwarzer Löcher näher erläutert werden.

7.1 Grundlagen der Relativitätstheorie

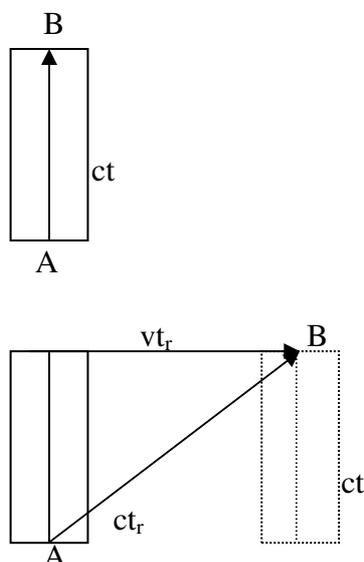
Im Jahre **1905** wurde Albert Einsteins **Spezielle Relativitätstheorie** in der Zeitschrift „Annalen der Physik“ veröffentlicht. Dies leitete eine neue Epoche in der Physik ein und veränderte die damaligen Vorstellungen von Raum und Zeit grundlegend.

Von der Gleichberechtigung aller Inertialsysteme ausgehend, postulierte Einstein das *Relativitätsprinzip*, nach dem die Naturgesetze in allen Inertialsystemen die gleiche Form annehmen müssen. Daraus ergibt sich die Folgerung, dass sich Licht in jedem dieser Systeme in allen Richtungen mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreiten muss. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit stand aber im Widerspruch zur Newton'schen Mechanik, die daher entsprechend erweitert werden musste.

Aus dem Relativitätsprinzip und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit erkannte Einstein die Schwächen des Begriffs der Zeit und zeigte, dass in einem bewegten System eine Zeitdilatation stattfindet.

Diese kann folgendermaßen erklärt werden:

Bewegt sich ein Lichtstrahl in einem ruhenden System von A nach B, so legt er in der Zeit t den Weg ct zurück.



Bewegt sich das System mit der Geschwindigkeit v (laut obiger Skizze), so legt das Licht vom Standpunkt eines ruhenden Beobachters einen wesentlich längeren Weg (ct_r) zurück. Die Zeit t in dem bewegten System kann mit Hilfe des Lehrsatzes des Pythagoras folgendermaßen berechnet werden:

$$(ct)^2 + (vt_r)^2 = (ct_r)^2. \quad (\text{F. 7.1.1})$$

Durch Umformung dieser Gleichung erhält man für die Zeitangabe in einem bewegten System:

$$t = t_r \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (\text{F. 7.1.2})$$

Analog zur Zeitrelativierung ergibt sich als weitere Konsequenz der konstanten Lichtgeschwindigkeit die Längenkontraktion nach folgender Formel:

$$l = l_r \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (\text{F. 7.1.3})$$

Bewegt sich ein Körper mit der Masse m mit der Geschwindigkeit v , so kann seine Massenzunahme folgendermaßen berechnet werden:

$$m' = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (\text{F. 7.1.4})$$

Die Spezielle Relativitätstheorie enthält auch die bekannte Gleichung der Äquivalenz von Masse und Energie:

$$E = mc^2. \quad (\text{F. 7.1.5})$$

Da die Spezielle Relativitätstheorie nur in Inertialsystemen gilt, die es aber in der Realität nicht gibt, erweiterte Albert Einstein seine Theorie. Die Ergebnisse präsentierte er erstmals im Jahre **1915** in der **Allgemeinen Relativitätstheorie**.

Einige Ergebnisse dieser Theorie werden in folgender Tabelle dargestellt.⁵⁷

Frequenzverschiebung	Uhren im Gravitationsfeld	Maßstäbe im Gravitationsfeld
$f' = f \left(1 - \frac{gH}{c^2} \right)$	$t_A = t_B \left(1 - \frac{gH}{c^2} \right)$	$l_A = l_B \left(1 - \frac{GM}{c^2 R} \right)$
Steigt ein Lichtstrahl in einem Gravitationsfeld empor (H...Höhe), so verringert sich seine Frequenz f auf f'.	Befindet sich eine Uhr B im Schwerfeld in der Höhe H oberhalb einer Uhr A, so gilt obige Gleichung für die Zeitangaben dieser Uhren.	Bringt man einen Maßstab A in die Nähe einer schweren Masse, so wird er kürzer als ein weit entfernter Vergleichsmaßstab B (R... Abstand des Maßstabes vom Mittelpunkt der Masse).

Tabelle 7.1.1: Auszüge einiger Erkenntnisse der Allgemeinen Relativitätstheorie

Mittels dieser revolutionären Theorie wurde ein völlig neues Verständnis von Raum und Zeit postuliert. Der euklidische Raumbegriff bzw. jener der Speziellen Relativitätstheorie wurde für beliebig gekrümmte Räume erweitert.

Die physikalische Raumzeit wird heute durch eine vierdimensionale, differenzierbare Mannigfaltigkeit und ein metrisches Tensorfeld, das eine Lorentz-Signatur aufweist, dargestellt.

„Durch die Lorentz-Signatur wird der Tatsache Rechnung getragen, dass genau drei Raumkoordinaten und eine Zeitkoordinate in der physikalischen Realität festgestellt werden können. Der Prototyp der Lorentz-Signatur ist die Metrik der Relativitätstheorie:

$$ds^2 = -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2. \quad (\text{F. 7.1.6})$$

Diese Metrik wird auch als Minkowski-Metrik bezeichnet.⁵⁸

Die Kernaussage der Allgemeinen Relativitätstheorie liegt in den Einstein'schen **Feldgleichungen**, welche die Geometrie der vierdimensionalen Raumzeit, beschrieben durch Riemann'sche Räume, mit dem Energieinhalt dieser Raumzeit über ein System von zehn unabhängigen, nichtlinearen, gekoppelten, partiellen Differentialgleichungen in Beziehung setzen.

Die genaue Erläuterung der Feldgleichungen ist äußerst komplex und umfangreich, weshalb auf weitere Ausführungen - um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen - verzichtet wird.

⁵⁷ vgl. SEXL: Physik, S 91-93.

⁵⁸ Florian SCHRACK: *Gravitation – Theorien, Effekte und Simulation am Computer*, 6. 6. 2002. – URL: <http://theory.gsi.de/~vanhees/faq/gravitation/node30.html>, [Stand 14. 1. 2004].

7.2 Anwendung der Allgemeinen Relativitätstheorie auf Schwarze Löcher

Bei Einsteins Auffassung ist Gravitation die Ursache für die Krümmung des Raums. Mittels der **Feldgleichungen** der Allgemeinen Relativitätstheorie können die **Eigenschaften der Schwarzen Löcher** besonders gut beschrieben werden.

Die einfachste analytische Lösung der Feldgleichungen wurde bereits ein Jahr nach der Aufstellung dieser Gleichungen von Karl Schwarzschild im Jahre 1916 gefunden. Sie gilt für den Außenraum einer sphärischen und statischen Ladungsverteilung - die zugehörige Metrik heißt nach ihrem Entdecker **Schwarzschild-Metrik**.

In Kugelkoordinaten (t, R, θ, ϕ) lautet sie:⁵⁹

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2M}{R}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{2M}{R}\right)^{-1} dR^2 + R^2 d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2. \quad (\text{F. 7.2.1})$$

Die Untersuchungen des Verhaltens einer Testmasse in einem von der Schwarzschild-Metrik beschriebenen Raum liefern eine Übereinstimmung mit der Bewegung dieser Masse in einem Newton'schen Gravitationsfeld.

Im Zentrum eines „Schwarzschild-Lochs“ ($R=0$) wird in jedem Koordinatensystem die Krümmung unendlich groß - dieses Phänomen wird als Singularität bezeichnet (siehe Kapitel 5.2). Bei der exakten mathematischen Definition der Singularität gelangt man daher zu einem Problem. Es müssen die entsprechenden Punkte aus der Mannigfaltigkeit entfernt werden, außerdem kann der Begriff des „Ortes einer Singularität“ nicht auf einfache Weise definiert werden.

Die Fortsetzung dieser Lösung für einen kleinen Radius, der dem Inneren eines Sternes entspricht, wurde im Jahre 1939 von Robert Oppenheimer ausgeführt, woraus sich schließlich die relativistische Gleichung für den Gravitationsdruck, die so genannte **Oppenheimer-Volkoff-Gleichung**, ergab⁶⁰:

$$\frac{dP}{dR} = -\frac{GM\rho}{R^2} \left(1 + \frac{P}{\rho c^2}\right) \left(1 + \frac{4\pi R^2 P}{Mc^2}\right) \left(1 - \frac{2GM}{Rc^2}\right)^{-1}. \quad (\text{F. 7.2.2})$$

Das Ergebnis der Untersuchungen, die Stephen Hawking und Roger Penrose in den Jahren 1965 bis 1970 anstellten, lautete, dass es nach der Allgemeinen Relativitätstheorie eine **Singularität** von unendlicher Dichte und Raumzeitkrümmung in einem Schwarzen Loch geben muss (siehe auch Kapitel 8.2).

⁵⁹ vgl. Florian SCHRACK: *Gravitation – Theorien, Effekte und Simulation am Computer*, 6. 6. 2002. – URL: <http://theory.gsi.de/~vanhees/faq/gravitation/node36.html>, [Stand 14. 1. 2004].

⁶⁰ vgl. Michael GRUPP: *Astrophysikalische Plasmen - Weiße Zwerge und Neutronensterne*, 18. 6. 2003. – URL: <http://www.wirtschaftsphysik.de/vorlessg/plasma/astrop1.pdf>, [Stand 14. 1. 2004].

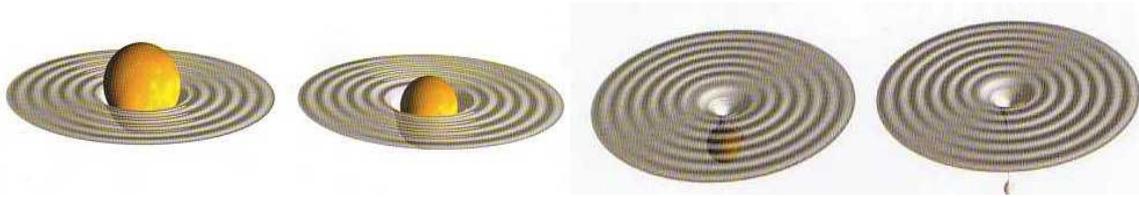


Abbildung 7.2.1: Die Gravitationsimplosion führt zur Singularität des Schwarzen Loches.

Der holländische Astronom *Willern de Sitter* entwickelte 1917 das **De-Sitter-Modell** als Lösung der Einstein'schen Gleichungen mit einer zusätzlichen abstoßenden Kraft, der kosmologischen Konstanten. Die De-Sitter-Raumzeit ist leer, hochgradig symmetrisch und dehnt sich beschleunigt aus. 1997 schlossen Astronomen aus der Untersuchung ferner Supernova-Explosionen, dass sich die Expansion unseres Universums beschleunigt. Wahrscheinlich wird unser Kosmos darum künftig immer mehr einem De-Sitter-Modell ähneln. Ersetzt man nun in den Einstein'schen Gleichungen die Abstoßung durch eine Anziehung, so erhält man die ebenso symmetrische Anti-de-Sitter-Raumzeit. In der Modellierung für das holografische Prinzip (siehe Kapitel 5.6) spielt dieser Ansatz eine wichtige Rolle, da die Raumzeit dadurch eine Begrenzung bekommt, die im Unendlichen liegt und große Ähnlichkeit mit unserer gewöhnlichen Raumzeit aufweist.⁶¹

Der neuseeländische Mathematiker Roy Kerr fand 1963 Lösungen der Einstein'schen Gleichungen, mit denen **rotierende Gasmassen** beschrieben werden können. Seine Lösungen eignen sich zur Beschreibung aller Schwarzen Löcher.

Die Anwendung der Kerr'schen Lösungen auf die Schwarzen Löcher wurde unter dem „*Keine-Haare-Theorem*“ bekannt. Dieses Theorem ist von großem Wert für die Praxis, da es die Zahl möglicher Arten von Schwarzen Löchern erheblich einschränkt. Es besagt, dass bei der Entstehung eines Schwarzen Lochs im Zuge des Gravitationskollapses eine beträchtliche Menge an Information verloren geht. Da sich danach nur noch dessen Masse, elektrische Ladung und Rotationsgeschwindigkeit bestimmen lassen, weiß man nicht, ob der kollabierende Körper aus Materie oder Antimaterie bestand.⁶²

In der Kerr-Lösung gibt es auch einen Ereignishorizont. Sobald ein Körper diesen überquert hat, steuert er nicht direkt auf die Singularität bei $R=0$ zu, sondern er findet einen weiteren, inneren Horizont. Nachdem er auch diesen überquert hat, stürzt er in die Singularität. Diese ist keine Punktsingularität, wie bei der Schwarzschild-Metrik, sondern eine Ringsingularität.⁶³

Stephen Hawking stellte im Jahre 1974 fest, dass Schwarze Löcher stetige Teilchenströme zu emittieren scheinen. Bei der Untersuchung dieses Phänomens, der nach ihm benannten **Hawking-Strahlung**, gelang es ihm auch, einen Zusammenhang zwischen der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie herzustellen.

⁶¹ vgl. Jakob D. BEKENSTEIN: Das holografische Universum. In: Spektrum der Wissenschaft, *Sind Sie ein Hologramm?*, S 34, 37, 39-40.

⁶² vgl. Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, S 120.

⁶³ vgl. Florian SCHRACK: *Gravitation – Theorien, Effekte und Simulation am Computer*, 6. 6. 2002. – URL: <http://theory.gsi.de/~vanhees/faq/gravitation/node37.html>, [Stand 14. 1. 2004].

7.3 Horizonterweiterung durch die Relativitätstheorie

Mittels der Einstein'schen Feldgleichungen konnten Forscher erst vor kurzem (im Jahre 2003) genau beschreiben, wie der Horizont Schwarzer Löcher größer wird.

Abhay Ashtekar, der Physik-Professor und Direktor am „Center for Gravitational Physics and Geometry“ der Pennsylvania State University und einer der führenden Spezialisten der Allgemeinen Relativitätstheorie ist, fand zusammen mit Badri Krishnan jene mathematische Lösung, die bereits seit Jahrzehnten gesucht wurde.

Die Anwendung dieser Lösung auf den Zusammenstoß Schwarzer Löcher und ihre Verschmelzung ist höchst faszinierend. Die Eigenschaften von isolierten Schwarzen Löchern sind zwar seit den siebziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts bekannt, doch in der Natur befinden sich diese selten im Gleichgewicht. Sie nehmen an Größe zu, indem sie Sterne und galaktische Gas- und Staubwolken aufnehmen sowie elektromagnetische Strahlung absorbieren.

Für diese dynamischen Schwarzen Löcher existiert eine von Stephen Hawking im Jahre 1971 veröffentlichte Ungleichung. Diese besagt, dass der Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs niemals kleiner wird. Er kann nur zunehmen - nämlich dann, wenn das Schwarze Loch etwas in sich aufnimmt (siehe Kapitel 5.1 und 5.3). Ein quantitatives Maß gibt Hawkings Theorem jedoch nicht an.

Bislang konnten nur kleine Änderungen zwischen statischen Zuständen Schwarzer Löcher beschrieben werden. Die Arbeiten von Ashtekar und Krishnan setzten nun erstmalig die drei einzigen Eigenschaften dynamischer Schwarzer Löcher - Drehimpuls, Masse und elektrische Ladung - mit dem Einfall von Materie und Strahlung in Verbindung. Den beiden Forschern gelang im Rahmen der vollständigen nichtlinearen Allgemeinen Relativitätstheorie ohne Verwendung von Näherungsverfahren die Herleitung dieser Ergebnisse, was wegen der Komplexität der Einstein'schen Feldgleichungen in Expertenkreisen große Anerkennung fand. Gemäß der Stellungnahme von Ashtekar existiert dadurch nun die Möglichkeit, exakte Aussagen über die Oberflächenzunahme von Schwarzen Löchern abhängig vom Einfall von Materie und gravitativer Strahlung zu treffen.

Ashtekar und Krishnan definierten den „Rand“ eines Schwarzen Loches nicht wie bisher als Ereignishorizont, sondern als **dynamischen Horizont**. Dieser kann lokal beschrieben werden und hat somit den Vorteil, dass die Raumzeit-Geometrie nur an einem Ort bekannt sein muss. Der Ereignishorizont lässt sich dagegen nur von einem übergeordneten Standpunkt oder am Ende der Zeit erkennen.⁶⁴

Ashtekar kommentierte sein Ergebnis folgendermaßen: „Es kann durchaus sein, dass sich dort, wo ich sitze, einmal ein Ereignishorizont bildet, weil sich in dieser Region der Milchstraße in einer Milliarde Jahren ein Gravitationskollaps ereignet. Würden wir ihn zurückverfolgen, kämen wir auch in diesem Zimmer an‘ - aber das können wir jetzt eben noch nicht wissen. Wenn irgendwo ein dynamischer Horizont existiert, dann gibt es auch einen Ereignishorizont - aber nicht umgekehrt. Daher entsprechen die dynamischen Horizonte besser unserer intuitiven Vorstellung von Schwarzen Löchern und sind enger damit

⁶⁴ vgl. Rüdiger VAAS: Wie Schwarze Löcher wachsen. In: bild der wissenschaft, *Die ersten Menschen in Europa*, hrsg. v. Katja Kohlhammer. Bd. 7/2003. Stuttgart: Konradin Medien GmbH, 2003, S 58.

verbunden, was Astronomen wirklich sehen - oder eben gerade nicht sehen -, wenn sie von Schwarzen Löchern berichten.“⁶⁵

Krishnan und Ashtekar leiteten eine Gleichung her, welche die Zunahme der Horizontoberfläche mit dem Betrag der einfallenden Energie in Beziehung setzte. Die Rechnungen wurden mehrmals durchgeführt, wobei auch der Einfluss angezogener Ladung berücksichtigt wurde. Die erhaltenen Daten zeigten, dass sich Schwarze Löcher mit wesentlich mehr Drehimpuls bilden können, als bislang angenommen wurde.

Die Zunahme von Masse und Drehimpuls Schwarzer Löcher, die der wichtigste Teil des Resultats war, wurde im führenden Fachblatt „*Physical Review Letters*“ veröffentlicht.

In Fachkreisen fand die Arbeit von Ashtekar und Krishnan bereits große Anerkennung. So wurde sie bei einem Arbeitskreis über mathematische Aspekte der Relativitätstheorie im Mathematischen Forschungsinstitut Oberwolfach im Schwarzwald begeistert aufgenommen. Im Sommer 2003 startete ein Forschungsprogramm über diese Thematik am „*Erwin Schrödinger International Institute for Mathematical Physics*“ in Wien.

Diese Horizonterweiterung trägt wesentlich zum Verständnis der Entstehung Schwarzer Löcher bei, und auch Anwendungen dieser Gleichungen sind bereits möglich. Bei numerischen Computersimulationen verschmelzender Schwarzer Löcher (siehe Kapitel 6) können nun aufgrund dieser Erkenntnisse genauere Ergebnisse erzielt werden. Außerdem können zukünftige Messungen neu gebauter Gravitationswellen-Detektoren schon vorhergesagt werden.⁶⁶

⁶⁵ Rüdiger VAAS: Wie Schwarze Löcher wachsen. In: bild der wissenschaft, *Die ersten Menschen in Europa*, S 58-59.

⁶⁶ vgl. Rüdiger VAAS: Wie Schwarze Löcher wachsen. In: bild der wissenschaft, *Die ersten Menschen in Europa*, S 58-59.

8. Der hypothetische Sturz in ein Schwarzes Loch

Einer der faszinierendsten Aspekte Schwarzer Löcher ist die Frage, was mit Objekten - vielleicht mit wagemutigen Astronauten - während und nach dem Sturz in ein solches Loch geschieht und was dabei aus sicherer Entfernung beobachtet werden kann. Die teilweise hypothetischen und sogar utopischen Erläuterungen illustrieren die bisherigen Ausführungen der vorliegenden Arbeit. Sie können in gewissem Sinne auch als Zusammenfassung der vorherigen Abschnitte und als Ausblicke auf zukünftige Möglichkeiten in der Praxis verstanden werden.

8.1 Gravitation, Raum und Zeit

Beim Sturz in ein Schwarzes Loch wird, so wie auf der Erde auch, die Wirkung der **Schwerkraft** mit abnehmender Entfernung zum Massenzentrum stärker, wobei die Auswirkungen der enormen Gravitation sofort am eigenen Körper spürbar wären.

Nähert man sich einem Schwarzen Loch mit den Füßen zuerst, so wirken auf diese stärkere Anziehungskräfte als auf den Kopf. Auf der Erde kann dies wegen der geringen Gravitation vernachlässigt werden. Bei Schwarzen Löchern ändert sich die Gravitationskraft wesentlich stärker, wodurch ein Gezeiteneffekt sogar innerhalb einer Körperlänge spürbar werden kann. Bei einem kleinen Schwarzen Loch mit ungefähr zehn Sonnenmassen kann ein Astronaut dies schon in einer Entfernung von 15000 Kilometern bemerken. Sein Körper wird gestreckt, wobei in 8000 Kilometern Entfernung bereits Kräfte mit der vierfachen Erdbeschleunigung an ihm ziehen. Ab einem Abstand von 3000 Kilometern wirken Kräfte mit 15 g, wodurch der Raumfahrer vor Erreichen des Ereignishorizontes in Stücke gerissen wird.⁶⁷



Abbildung 8.1.1: Die Dehnung eines Astronauten durch ein Schwarzes Loch

⁶⁷ vgl. Harald FRATER, Springer Verlag, Heidelberg – MMCD GmbH, Düsseldorf: *G.O. Wissen Online – FOCUS Schwarze Löcher*, März 2001. - URL: <http://www.g-o.de/kap4a/40cd0107.htm>, [Stand 14. 1. 2004].

Durch die Gezeitenkräfte eines kleinen Schwarzen Lochs mit einigen Sonnenmassen würde ein Astronaut lange vor dem Erreichen des Ereignishorizonts getötet werden. Da es aber auch extrem massereiche Schwarze Löcher mit millionenfacher Sonnenmasse gibt, die viel kleinere Gezeitenkräfte ausüben, könnte man den Ereignishorizont solcher Löcher wahrscheinlich gefahrlos überqueren. Beim freien Fall in Richtung Singularität bliebe dann durchaus noch etwas Zeit für Beobachtungen, bevor die zunehmenden Gezeitenkräfte den wissbegierigen Forscher schließlich zerreißen würden.

Wegen der äußerst starken **Krümmung des Raums** in die vierte Dimension, die **Zeit**, innerhalb eines Schwarzen Lochs ist die Entfernung zwischen Ereignishorizont und Singularität keine räumliche Entfernung mehr, sondern sie wird stattdessen zu einer zeitlichen Dimension. Dies ist kein Widerspruch zur Größenbestimmung eines Schwarzen Lochs mittels des Schwarzschild-Radius, da der Betrachter dabei außerhalb steht. Die Zeit, die benötigt wird, um vom Ereignishorizont die Singularität zu erreichen, ist direkt proportional zur Masse des Loches. Sie beträgt bei einem Loch mit der zehnfachen Sonnenmasse etwa eine zehntausendstel Sekunde und bei einem extrem massereichen Schwarzen Loch einige Minuten.

Nach der Meinung des russischen Astrophysikers Igor Novikov besteht eine weitere Merkwürdigkeit in der Physik von Schwarzen Löchern darin, dass der Versuch, durch gegensteuernde Kräfte den Fall in ein solches Loch zu stoppen, diesen sogar noch beschleunigt. Novikov erklärt dies dadurch, dass durch die Gegensteuerung nach dem Äquivalenzprinzip zwar ein Gravitationseffekt spürbar wäre, wegen der besonderen Vermischung von Raum und Zeit der Fall aber trotzdem mit derselben Geschwindigkeit fortgesetzt würde, nur mit dem Unterschied, dass die Zeit dabei jetzt langsamer verstreichen würde. Dieses Phänomen wird als **gravitative Zeitdilatation** bezeichnet.

Die Ersetzung des Raums durch die Zeit ist auch der Grund, warum sich in ein Schwarzes Loch gefallene Objekte immer weiter nach innen zur Singularität bewegen. Die Singularität selbst stellt dann wegen der Unaufhaltsamkeit der Teilchenbewegung das **Ende der Zeit** dar. Während der Urknall eine Singularität ist, die den Beginn der Zeit markiert, entsprechen die Zentren Schwarzer Löcher mehr Singularitäten eines Endknalls.⁶⁸

8.2 Die kosmische Zensur

Untersuchungen von Roger Penrose und Stephen Hawking zwischen 1965 und 1970 führten zu der Annahme, dass innerhalb der Schwarzen Löcher die Naturgesetze und somit unsere Möglichkeiten enden, die Zukunft vorherzusagen. Ein Beobachter außerhalb wäre allerdings von diesem Vorhersagbarkeitsverlust nicht betroffen, da keinerlei Signale und kein Licht aus der Singularität zu ihm gelangen.

Dies veranlasste Penrose, die Hypothese der **kosmischen Zensur** mit folgender Kernaussage aufzustellen:

„Gott verabscheut eine nackte Singularität.“⁶⁹

⁶⁸ vgl. Jim AL-KHALILI: Schwarze Löcher, Wurmlöcher und Zeitmaschinen, S 137-139.

⁶⁹ vgl. Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, S 115.

Dies besagt, dass durch einen Gravitationskollaps entstandene Singularitäten nur an Orten existieren, die sich - wie Schwarze Löcher - durch einen Ereignishorizont der Beobachtung entziehen. Gott selbst, so meint Hawking, habe hier eine Zensur ausgesprochen und Außenstehenden weitere Beobachtungen untersagt. Da keine Aussagen über die Situation des Astronauten im Loch gemacht werden können, ist diese Theorie als These der schwachen kosmischen Zensur bekannt.⁷⁰

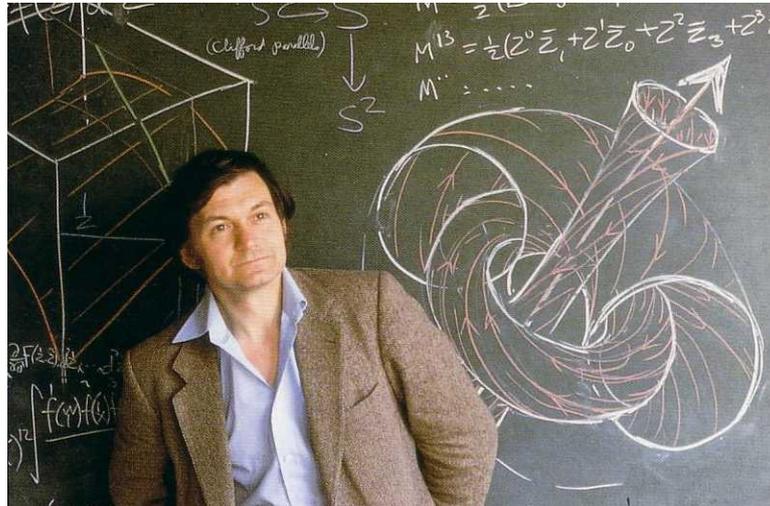


Abbildung 8.2.1: Roger Penrose

Der Wissenschaftler erklärt gerade an der Tafel eine seiner stark visuell geprägten mathematischen Theorien. Hier handelt es sich um seine „Twister-Theorie“.

Es existieren aber auch Lösungen der Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, die es einem Raumfahrer gestatten könnten, doch die nackte Singularität zu erblicken. So wäre das Zusammentreffen mit der Singularität vermeidbar, wenn der Astronaut beispielsweise statt dessen durch ein „Wormloch“ fiel und in einer anderen Region des Universums wieder auftauchte (siehe dazu auch Kapitel 8.4).

Diese möglichen Gleichungslösungen sind jedoch hochgradig instabil und kleinste Änderungen, wie beispielsweise die Anwesenheit eines Raumfahrers, können dazu führen, dass dieser die Singularität erst beim Zusammentreffen mit ihr erblickt und die Zeit dadurch endet. Die Singularität befindet sich also immer in der Zukunft und nie in der Vergangenheit, was die Hypothese der starken kosmischen Zensur postuliert. Nach ihr liegen bei einer realistischen Lösung die Singularitäten stets gänzlich in der Zukunft (wie die Singularitäten Schwarzer Löcher) oder gänzlich in der Vergangenheit (wie beim Urknall) und entziehen sich so stets der Beobachtung.⁷¹

⁷⁰ vgl. Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, S 114-115.

⁷¹ vgl. Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, S 115-117.

8.3 Innere und äußere Beobachtungen

Wegen der massiven Gravitation, die sogar Lichtstrahlen in ihren Bann zwingt, nimmt ein Astronaut im **Inneren** eines Schwarzen Loches seine Umgebung komplett anders wahr. Das Licht des umgebenden Universums strahlt weiterhin hinein, wird jedoch zu einem kleinen hellen Fleck gebeugt und gesammelt.

Wegen der Lichtablenkung um das Loch herum sieht der Raumfahrer jedes Objekt im All doppelt und kann den gesamten Himmel überschauen. Sterne, die hinter dem Loch liegen und sich genau auf einer Sichtlinie mit diesem befinden, werden vergrößert und heller dargestellt - das Schwarze Loch wirkt als Gravitationslinse. Liegen Stern und Schwarzes Loch - vom Astronauten aus gesehen - nicht in einer Linie, so werden durch den Gravitationslinseneffekt zwei verstärkte Bilder erzeugt. Da Photonen in einem Abstand von 1,5 Schwarzschild-Radien der Anziehung nicht entkommen können und auf einer stabilen Umlaufbahn um das Loch bleiben, sieht der Raumfahrer knapp über dem Ereignishorizont die gesamte Umgebung, er kann sich sogar selbst von hinten wahrnehmen.⁷²

Was ein weit entfernter Betrachter von **außen** registriert, wenn ein nicht rotierendes Objekt in ein Schwarzes Loch fällt, beschreibt am besten folgender Absatz, wo die von einem Raumschiff aus beim Sturz eines Astronauten in Richtung des Ereignishorizonts möglichen Beobachtungen erläutert werden.

„Nehmen wir an, Sie und Ihr Kollege hätten Ihre Uhren genau abgeglichen und ausgerechnet, dass er exakt um 12 Uhr den Ereignishorizont passieren wird. Wenn Sie nun mit Hilfe eines leistungsstarken Teleskops die während des Falls auf seiner Uhr angezeigte Zeit verfolgten, würden Sie sehen, dass sich die Zeiger seiner Uhr desto langsamer drehen, je näher er dem Horizont kommt, und dass sie genau um 12 Uhr stehen bleiben. Direkt am Horizont steht die Zeit in der Tat still. Manchmal wird - fälschlicherweise - angenommen, Sie würden den Astronauten für immer in Bewegungslosigkeit erstarrt vor dem Horizont schweben sehen. In Wirklichkeit wird er Ihren Blicken rasch entschwunden sein. Und zwar nicht deshalb, weil Sie ihn durch den Horizont haben durchfallen ‚sehen‘, sondern weil das Licht, das Sie von ihm erreicht, wegen der Rotverschiebung so langwellig geworden ist, dass es außerhalb des sichtbaren Spektrums liegt. Diese Rotverschiebung ist nicht ganz mit der Rotverschiebung sich entfernender Galaxien vergleichbar, deren Licht durch den Doppler-Effekt verschoben wird. Jetzt kommt durch die Verlangsamung der Zeit in Horizontnähe ein zusätzlicher Effekt zum Tragen, der dazu führt, dass das Licht für Sie eine niedrigere Frequenz und damit eine zum roten Bereich hin verschobene größere Wellenlänge zu haben scheint. Der fallende Astronaut dagegen nimmt die Geschwindigkeit, mit der die Zeit während des Falls vergeht, ganz anders wahr und stellt fest, dass er dem Loch schneller und schneller entgegenfällt.“⁷³

⁷² vgl. Harald FRATER, Springer Verlag, Heidelberg – MMCD GmbH, Düsseldorf: *G.O. Wissen Online – FOCUS Schwarze Löcher*, März 2001. - URL: <http://www.g-o.de/kap4a/40cd0108.htm>, [Stand 14. 1. 2004].

⁷³ Jim AL-KHALILI: *Schwarze Löcher, Wurmlöcher und Zeitmaschinen*, S 140-141.

8.4 Wurmlöcher und Zeitreisen

Bisher wurde davon ausgegangen, dass ein Mensch den Sturz in ein Schwarzes Loch nicht überleben würde. Es seien an dieser Stelle noch *Igor Novikovs Theorien* erwähnt, die Möglichkeiten aufzeigen, eine Reise durch ein Schwarzes Loch doch zu überstehen. Novikov berechnete, dass von supermassiven, rotierenden und ziemlich alten Schwarzen Löchern - wie beispielsweise bei Sagittarius A in der Milchstraße - nur geringe Gezeitenkräfte ausgeübt werden. Laut Novikov kommt es bedingt durch Alter und Rotation zu einer „schlaffen Stelle“, die als Schlupfloch durch die Singularität dienen kann. Dieser winzige Riss könnte als Tunnel zu einem „Weißen Loch“ (siehe Kapitel 8.5) führen, wobei sich bei solchen Reisen die Zeit verschiebt und man in einem anderen Universum mit gänzlich anderen Naturgesetzen landet - ohne Möglichkeit zur Rückkehr.⁷⁴

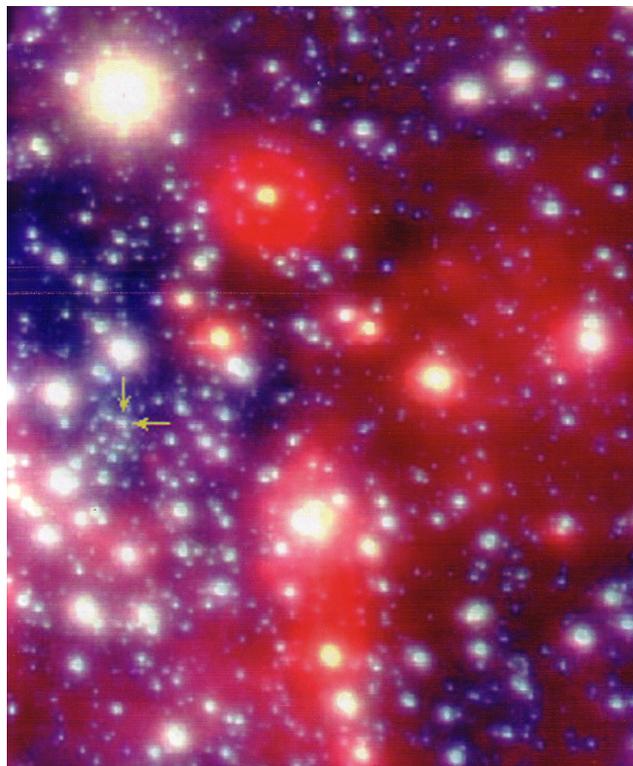


Abbildung 8.4.1: Das Schwarze Loch Sagittarius A

Es befindet sich in der Milchstraße und ist durch die beiden Pfeile gekennzeichnet.

Ein Raumschiff schwebt durch das All, plötzlich öffnet sich ein **Wurmloch** und befördert dieses in kurzer Zeit in einen Tausende von Lichtjahren entfernten Quadranten unserer Galaxie. Was in utopischen Filmen und Fernsehserien durchaus real erscheint, ist im wirklichen Universum mehr Fiktion denn Fakt.

⁷⁴ vgl. Joseph SCHEPPACH: Flug durch ein Schwarzes Loch. In: P.M. – Peter Moosleitners Magazin – Die moderne Welt des Wissens, *Flug durch ein SCHWARZES LOCH*, hrsg. v. Hans-Hermann Sprado. Bd. Dezember 2003. München: Gruner + Jahr AG & Co Druck- und Verlagshaus, 2003, S 26-32.



Abbildung 8.4.2: Ein Wurmloch vor der Raumstation Deep Space 9

Vor dem Raumschiff öffnet sich ein Wurmloch, das noch weiter in die Tiefen des Weltraums hineinführt (in den γ -Quadranten).

Ein Wurmloch kann als theoretische Öffnung in der Raumzeit betrachtet werden, durch die man sehr schnell zu weit entfernten Orten gelangen kann. Dies beruht auf einer starken Krümmung der Raumzeit, wodurch zwei ursprünglich sehr weit entfernt liegende Punkte durch eine Abkürzung plötzlich nahe zusammenrücken. Da die Relativitätstheorie die Geschwindigkeit des Lichtes als natürliche Schranke annimmt, wären Wurmlöcher, wenn sie denn existieren, die Lösung für das Problem der Einstein'schen Geschwindigkeitsbegrenzung im All.

Das Konzept dieser kosmischen Tunnel ist keine Utopie einiger realitätsfremder Astrophysiker, denn Albert Einstein hat zusammen mit Nathan Rosen die Möglichkeit der Existenz solcher Tunnel unter der Annahme einer starken Raumzeit-Krümmung bewiesen. Das Wurmloch besteht hierbei aus zwei Schwarzen Löchern, die durch die so genannte *Einstein-Rosen-Brücke* miteinander verbunden sind. Mathematische Lösungen der Relativitätsgleichungen lassen solche Raumzeit-Brücken durchaus zu, jedoch unter Annahmen, die vielleicht niemals im Universum existiert haben.

Die Einstein-Rosen-Brücken sind sehr instabil und haben nur eine äußerst kurze Lebensdauer. Ein Raumschiff könnte demnach solche Tunnel nur schwer benützen, denn die Brücken würden sich höchstwahrscheinlich in der Mitte zu Singularitäten verjüngen, was das Abreißen des Wurmloches bewirken würde. Es entstehen dabei zwei getrennte Singularitäten, weshalb die Trennung des Tunnels zur Vernichtung des Raumschiffs führen würde. Um das Wurmloch stabil offen zu halten, wäre eine Raumzeitregion mit negativer Krümmung erforderlich. Eine derartige Krümmung der Raumzeit würde allerdings Materie mit negativer Energiedichte erfordern.⁷⁵

⁷⁵ vgl. Harald FRATER: *G.O. Wissen Online – FOCUS Schwarze Löcher*,
URL: <http://www.g-o.de/kap4a/40cd0108.htm>.



Abbildung 8.4.3: Ein Wurmloch aus einem näheren Blickwinkel

Einstein-Rosen-Brücken, die über Schwarze Löcher verschiedene Raumzeitgebiete verbinden, könnten auch **Zeitreisen** ermöglichen. Ein Raumschiff, das in das eine Ende einer solchen Raumzeitröhre gesteuert wird, könnte sich beim Verlassen des anderen Endes an einem völlig anderen Ort und vielleicht sogar in einer anderen Zeit befinden.

Zeitreisen liefern auch Diskussionsstoff über Paradoxa, beispielsweise stellt das bekannte Großvaterparadoxon die Frage nach den Auswirkungen, wenn man in der Zeit zurückgeht und seinen Großvater ermordet, bevor dieser den eigenen Vater gezeugt hat. Natürlich ist das nur dann ein Paradoxon, wenn man annimmt, bei Zeitreisen sein eigenes Handeln frei bestimmen zu können.⁷⁶

8.5 Weiße Löcher

Manche, allerdings sehr instabile Lösungen der Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie ergeben, ausgehend vom Urknall, unter bestimmten Anfangsbedingungen **Weiße Löcher** als mögliche, hochspekulative Objekte, die das Gegenteil Schwarzer Löcher beziehungsweise deren „anderes Ende“ darstellen. Weiße Löcher wären demnach Objekte, aus denen Dinge entweichen, in die aber nichts hineinfallen kann. Sie nehmen also nicht Materie und Energie auf, sondern schleudern diese in das Universum hinaus. Auch die Singularitäten bilden nicht das Ende sondern den Anfang der Zeit, wodurch ein Weißes Loch dann ein in der Zeit zurücklaufendes Schwarzes Loch wäre. Diese Überlegungen entsprechen der Zeitsymmetrie der Physik, im Gegensatz zu Schwarzen Löchern gibt es jedoch bisher keine schlüssigen Beweise für Weiße Löcher. Dies liegt möglicherweise daran, dass die

⁷⁶ vgl. Stephen HAWKING: Das Universum in der Nußschale, S 141-147.

ausgestoßene Materie wieder zurückfallen könnte, wodurch das Weiße Loch sofort zu einem Schwarzen Loch würde.

Wurmlöcher und Weiße Löcher sind also mathematisch korrekte Ergebnisse der Relativitätsgleichungen Einsteins und könnten somit Möglichkeiten für schnelle Weltraumreisen liefern. Diese Lösungen sind aber äußerst instabil und daher wahrscheinlich auch nie in die Praxis umsetzbar. Dies ist auch der Grund, warum man aktuell annimmt, dass im Universum keine großen Weißen Löcher existieren. Auf subatomarer Ebene könnte es jedoch „Mini-Weiße-Löcher“ als Gegenpart zu Schwarzen Löchern geben, wovon auch Stephen Hawking in seinen Überlegungen ausgeht, die auf den Gesetzen der Quantenmechanik basieren.⁷⁷

⁷⁷ vgl. Jim AL-KHALILI: Schwarze Löcher, Wurmlöcher und Zeitmaschinen, S 149-150.

9. Schluss

Schwarze Löcher existieren überall und in allen Größen - auch in der Milchstraße gibt es ein Exemplar, das Sagittarius A genannt wird. Sie können uns bedeutende Aufschlüsse über die Vergangenheit des Universums, die Entstehung von Galaxien und vielleicht sogar über die Zukunft geben. Auch wenn einige Wissenschaftler wie Professor Klaus Werner ihre Möglichkeiten bescheiden sehen und meinen: „Ich glaube, wir können Schwarze Löcher zwar mit Formeln beschreiben, aber als Menschen niemals wirklich begreifen. Vielleicht sind wir dafür auch einfach nicht intelligent genug.“⁷⁸ - versuchen wir doch, die Grenzen unserer Vorstellung zu überschreiten und den Schwarzen Löchern noch das eine oder andere Geheimnis zu entlocken!



Abbildung 9.1: Ein humoristischer Ausblick

Welche Auswirkungen nur ein Bild eines Schwarzen Lochs auf unser Alltagsleben haben könnte.

⁷⁸ Wolfgang GESSLER: Die Fressmonster des Universums. In: P.M. Perspektive – Das Magazin für kompaktes Wissen, *Geheimnisvoller Weltraum*, S 92.

Abbildungsverzeichnis

Verzeichnis:

Titel-Abbildung: Eine künstlerische Darstellung eines Schwarzen Lochs.....	1
Abbildung 2.2.1: Das Hertzsprung-Russell-Diagramm	11
Abbildung 2.3.1: Eine künstlerische Darstellung eines Roten Riesen	13
Abbildung 2.4.1: Die nuklearen Brennphasen (Schalenbrennen) in massereichen Sternen.....	14
Abbildung 2.4.2: Die Supernova Cassiopeia A.....	14
Abbildung 3.1.1: Das Massen-Radien-Diagramm	15
Abbildung 3.2.1: Ein Weißer Zwerg inmitten des ringförmigen planetaren Nebels Shapley 1	16
Abbildung 3.3.1: Ein einzeln stehender Neutronenstern	17
Abbildung 3.3.2: Der Krebsnebel	18
Abbildung 4.2.1: Subrahmanyan Chandrasekhar.....	23
Abbildung 5.2.1: Der Aufbau eines Schwarzen Lochs – vereinfacht dargestellt	26
Abbildung 5.3.1: Eine lebhaft künstlerische Darstellung von Cygnus X-1	28
Abbildung 5.4.1: Materiejets bei einem Schwarzen Loch mit Begleitstern	29
Abbildung 5.6.1: Stephen Hawking	31
Abbildung 5.6.2: Ein holografisches Modell der Raumzeit	34
Abbildung 5.7.1: Teilchen-Antiteilchen-Fluktuation	36
Abbildung 5.8.1: Strahlenemission und Energie-Masse-Verlust Schwarzer Löcher	37
Abbildung 5.10.1: Der Röntgensatellit Chandra	40
Abbildung 6.2.1: Kollision zweier Schwarzer Löcher – Ergebnis einer Computersimulation	45
Abbildung 7.2.1: Die Gravitationsimplosion führt zur Singularität des Schwarzen Loches.....	53
Abbildung 8.1.1: Die Dehnung eines Astronauten durch ein Schwarzes Loch.....	56
Abbildung 8.2.1: Roger Penrose	58
Abbildung 8.4.1: Das Schwarze Loch Sagittarius A.....	60
Abbildung 8.4.2: Ein Wurmloch vor der Raumstation Deep Space 9.....	61
Abbildung 8.4.3: Ein Wurmloch aus einem näheren Blickwinkel	62
Abbildung 9.1: Ein humoristischer Ausblick.....	64

Bildquellen:

Titel-Abbildung: Harald FRATER, Springer Verlag, Heidelberg – MMCD GmbH, Düsseldorf:

G.O. Wissen Online – FOCUS Schwarze Löcher, März 2001.

- URL: <http://www.g-o.de/home04eu.htm>, [Stand 14. 1. 2004].

Abbildung 2.2.1: Reinhard FREUND: *Homepage von Dr. Reinhard Freund*, 10. 1. 2004.

- URL: http://drfreund.bei.t-online.de/mainframe.htm?main#http://drfreund.bei.t-online.de/astromy_hrd.htm, [Stand 14. 1. 2004].

Abbildung 2.3.1: Ralf SCHOOFs: *Ferne Welten – Roter Riese*, 15. 6. 2003.

- URL: http://home.t-online.de/home/ralf.schoofs/german/dwor14_d.htm, [Stand 14. 1. 2004].

Abbildung 2.4.1: Heinz OBERHUMMER: *Kerne und Sterne: Einführung in die nukleare Astrophysik*.

ISBN 3-335-00319-5. Leipzig: Barth, 1993, S 71.

Abbildung 2.4.2: Ernst WERNER: *Kosmologie*, 12. 3. 2002.

- URL: http://home.arcor.de/ernst_werner/diplom/astro/supernova.html, [Stand 14. 1. 2004].

Abbildung 3.1.1: Jürgen GIESEN: *Weißer Zwerg und Schwarzes Loch*, 4. 6. 2002.

- URL: <http://www.jgiesen.de/astro/stars/schwarzesLoch.htm>, [Stand 14. 1. 2004].

Abbildung 3.2.1: Ernst WERNER: *Kosmologie*, 12. 3. 2002.

- URL: http://home.arcor.de/ernst_werner/diplom/astro/weisser_zwergstern.html, [Stand 14. 1. 2004].

Abbildung 3.3.1: Ernst WERNER: *Kosmologie*, 12. 3. 2002.

- URL: http://home.arcor.de/ernst_werner/diplom/astro/neutronenstern.html, [Stand 14. 1. 2004].

- Abbildung 3.3.2: Ernst WERNER: *Kosmologie*, 12. 3. 2002.
- URL: http://home.arcor.de/ernst_werner/diplom/astro/supernova.html, [Stand 14. 1. 2004].
- Abbildung 4.2.1: Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit. ISBN 3-499-60924-X.
Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Mai 2000, S 108.
- Abbildung 5.2.1: DE BOER Klaas S.: *Physik des Monats, Astrophysik*, 30. 5. 2003.
- URL: <http://www.astro.uni-bonn.de/~deboer/pdm/pdmastrotxt.html>, [Stand 14. 1. 2004].
- Abbildung 5.3.1: David FILKIN: Stephen Hawkings Universum. ISBN 3-453-12929-6.
München: Wilhelm Heyne GmbH & Co. KG, 1997, S 202-203.
- Abbildung 5.4.1: DRIGANI Fulvio, ESA Web Portal Manager, ESA Communication Department,
Online Communication Section, European Space Agency:
ESA Portal – Focus On – The last cry of matter, 8. 12. 2003.
- URL: http://www.esa.int/export/esaCP/SEMPUMXLDMD_FeatureWeek_0.html,
[Stand 14. 1. 2004].
- Abbildung 5.6.1: Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, S 141.
- Abbildung 5.6.2: Jakob D. BEKENSTEIN: Das holografische Universum.
In: Spektrum der Wissenschaft, *Sind Sie ein Hologramm?*,
hrsg. v. Dr. habil. Reinhard Breuer. Bd. November 2003.
Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, 2003, S 40.
- Abbildung 5.7.1: Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, S 134.
- Abbildung 5.8.1: Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, S 136.
- Abbildung 5.10.1: Harald FRATER, Springer Verlag, Heidelberg – MMCD GmbH, Düsseldorf:
G.O. Wissen Online – FOCUS Schwarze Löcher, März 2001.
- URL: <http://www.g-o.de/kap4a/40cd0103.htm>, [Stand 14. 1. 2004].
- Abbildung 6.2.1: Henning ENGELN: Orte ohne Wiederkehr.
In: Geo - Das neue Bild der Erde, *Fantastische Welten*,
hrsg. v. Peter-Matthias Gaede. Bd. 11/November 2002.
Hamburg: Gruner + Jahr AG & Co Druck- und Verlagshaus, 2002, S 56-57.
- Abbildung 7.2.1: Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, S 114-115.
- Abbildung 8.1.1: Stephen HAWKING: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, S 113.
- Abbildung 8.2.1: David FILKIN: Stephen Hawkings Universum, S 198.
- Abbildung 8.3.1: Wolfgang GESSLER: Die Fressmonster des Universums.
In: P.M. Perspektive – Das Magazin für kompaktes Wissen, *Geheimnisvoller Weltraum*,
hrsg. v. Hans-Hermann Sprado. Bd. 1/2003.
München: Gruner + Jahr AG & Co Druck- und Verlagshaus, 2003, S 89.
- Abbildung 8.4.1: Peter ZUMSTEIN: *Star Trek: Zumstein's Trek Page – Galerie Wurmloch*, 9. 3. 2003.
- URL: <http://www.zumstein.org/trekpage/galerie/gale30.html>, [Stand 14. 1. 2004].
- Abbildung 8.4.2: Björn MARKUS: *Björn's HP - Wurmlöcher by bm&sz*, 18. 12. 2003.
- URL: <http://www.yourbestman.de/000/bnice/wurml/start.htm>, [Stand 14. 1. 2004].
- Abbildung 9.1: Kimberly WEAVER: Galaxien im Ausnahmezustand.
In: Spektrum der Wissenschaft, *Jagd auf neue Elementarteilchen*,
hrsg. v. Dr. habil. Reinhard Breuer. Bd. September 2003.
Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, 2003, S 40.

Literaturverzeichnis

Bücher:

AL-KHALILI, Jim: Schwarze Löcher, Wurmlöcher und Zeitmaschinen. ISBN 3-8274-1018-5. Heidelberg · Berlin: Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 2001, 334 S.

FILKIN, David: Stephen Hawkings Universum. ISBN 3-453-12929-6. München: Wilhelm Heyne GmbH & Co. KG, 1997, 257 S.

GREENE, Brian: Das elegante Universum. ISBN 3-88680-699-5. Berlin: Siedler Verlag, 2000, 511 S.

HAWKING, Stephen: Das Universum in der Nußschale. ISBN 3-455-09345-0. Hamburg: Hoffmann und Campe, 2001, 1. Auflage, 224 S.

HAWKING, Stephen: Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit. ISBN 3-499-60924-X. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Mai 2000, 247 S.

HAWKING, Stephen W.: Einsteins Traum – Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit. ISBN 3-498-02919-3. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Verlag GmbH, 1993, 190 S.

OBERHUMMER, Heinz: Kerne und Sterne: Einführung in die nukleare Astrophysik. ISBN 3-335-00319-5. Leipzig: Barth, 1993, 184 S.

REES, Martin: Vor dem Anfang – Eine Geschichte des Universums. ISBN 3-10-062913-2. Frankfurt / Main: S. Fischer Verlag GmbH, 1998, 2. Auflage, 352 S.

SEXL-RAAB-STREERUWITZ: PHYSIK Teil 3B. ISBN 3 8000 6242 9. Wien: Verlag Carl Ueberreuter, 1978, 112 S.

Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:

BEKENSTEIN, Jakob D.: Das holografische Universum. In: Spektrum der Wissenschaft, *Sind Sie ein Hologramm?*, hrsg. v. Dr. habil. Reinhard Breuer. Bd. November 2003. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, 2003, S 34-41.

BENGER, Werner: Kollisionen Schwarzer Löcher. In: Sterne und Weltraum Special 6, *Gravitation – Urkraft des Kosmos*, hrsg. v. Prof. Dr. Hans Elsässer. Bd. Mai 2001. Heidelberg: Verlag Sterne und Weltraum, Hüthing GmbH & Co. KG, 2001, S 52-61.

BORGEEST, Ulf: Einsteins Allgemeine Theorie der Relativität. In: Sterne und Weltraum Special 6, *Gravitation – Urkraft des Kosmos*, hrsg. v. Prof. Dr. Hans Elsässer. Bd. Mai 2001. Heidelberg: Verlag Sterne und Weltraum, Hüthing GmbH & Co. KG, 2001, S 62-69.

ENGELN, Henning: Orte ohne Wiederkehr. In: Geo - Das neue Bild der Erde, *Fantastische Welten*, hrsg. v. Peter-Matthias Gaede. Bd. 11/November 2002. Hamburg: Gruner + Jahr AG & Co Druck- und Verlagshaus, 2002, S 52-75.

GESSLER, Wolfgang: Die Fressmonster des Universums. In: P.M. Perspektive – Das Magazin für kompaktes Wissen, *Geheimnisvoller Weltraum*, hrsg. v. Hans-Hermann Sprado. Bd. 1/2003. München: Gruner + Jahr AG & Co Druck- und Verlagshaus, 2003, S 86-92.

NICOLAI, Hermann, PÖSSEL, Markus: Strings – Grundbausteine des Kosmos?. In: Sterne und Weltraum Special 6, *Gravitation – Urkraft des Kosmos*, hrsg. v. Prof. Dr. Hans Elsässer. Bd. Mai 2001. Heidelberg: Verlag Sterne und Weltraum, Hüthing GmbH & Co. KG, 2001, S 77-83.

RIPOTA, Peter: Der Kosmos – Ein Spiegelkabinett?. In: P.M. – Peter Moosleitners Magazin – Die moderne Welt des Wissens, *Unser Kosmos – eine Fata Morgana?*, hrsg. v. Hans-Hermann Sprado. Bd. Februar 2004. München: Gruner + Jahr AG & Co Druck- und Verlagshaus, 2004, S 22-28.

SCHEPPACH, Joseph: Flug durch ein Schwarzes Loch. In: P.M. – Peter Moosleitners Magazin – Die moderne Welt des Wissens, *Flug durch ein SCHWARZES LOCH*, hrsg. v. Hans-Hermann Sprado. Bd. Dezember 2003. München: Gruner + Jahr AG & Co Druck- und Verlagshaus, 2003, S 24-32.

VAAS, Rüdiger: Wie Schwarze Löcher wachsen. In: bild der wissenschaft, *Die ersten Menschen in Europa*, hrsg. v. Katja Kohlhammer. Bd. 7/2003. Stuttgart: Konradin Medien GmbH, 2003, S 58-59.

VASEK, Thomas: Reisen in „unmögliche“ Welten. In: Geo - Das neue Bild der Erde, *Fantastische Welten*, hrsg. v. Peter-Matthias Gaede. Bd. 11/November 2002. Hamburg: Gruner + Jahr AG & Co Druck- und Verlagshaus, 2002, S 76-92.

WEAVER, Kimberly: Galaxien im Ausnahmezustand. In: Spektrum der Wissenschaft, *Jagd auf neue Elementarteilchen*, hrsg. v. Dr. habil. Reinhard Breuer. Bd. September 2003. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, 2003, S 38-45.

Computer-Software:

Microsoft(R) Encarta(R) 97 Enzyklopädie. (c) 1993-1996 Microsoft Corporation.

Internet:

DE BOER, Klaas S.: *Physik des Monats, Astrophysik*, 30. 5. 2003.

- URL: <http://www.astro.uni-bonn.de/~deboer/pdm/pdmastrotxt.html>, [Stand 14. 1. 2004].

DRIGANI, Fulvio, ESA Web Portal Manager, ESA Communication Department, Online Communication Section, European Space Agency:

ESA Portal – Focus On – The last cry of matter, 8. 12. 2003.

- URL: http://www.esa.int/export/esaCP/SEMPUMXLDMD_FeatureWeek_0.html, [Stand 14. 1. 2004].

FRATER, Harald, Springer Verlag, Heidelberg – MMCD GmbH, Düsseldorf:

G.O. Wissen Online – FOCUS Schwarze Löcher, März 2001.

- URL: <http://www.g-o.de/home04eu.htm>, [Stand 14. 1. 2004].

- URL: <http://www.g-o.de/kap4a/40cd0102.htm>, [Stand 14. 1. 2004].
- URL: <http://www.g-o.de/kap4a/40cd0103.htm>, [Stand 14. 1. 2004].
- URL: <http://www.g-o.de/kap4a/40cd0106.htm>, [Stand 14. 1. 2004].
- URL: <http://www.g-o.de/kap4a/40cd0107.htm>, [Stand 14. 1. 2004].
- URL: <http://www.g-o.de/kap4a/40cd0108.htm>, [Stand 14. 1. 2004].

FREUND, Reinhard: *Homepage von Dr. Reinhard Freund*, 10. 1. 2004.

- URL: http://drfreund.bei.t-online.de/mainframe.htm?main#http://drfreund.bei.t-online.de/astronomy_hrd.htm, [Stand 14. 1. 2004].

GIESEN, Jürgen: *Weißer Zwerg und Schwarzes Loch*, 4. 6. 2002.

- URL: <http://www.jgiesen.de/astro/stars/schwarzesLoch.htm>, [Stand 14. 1. 2004].

GRUPP, Michael: *Astrophysikalische Plasmen - Weiße Zwerge und Neutronensterne*, 18. 6. 2003.

- URL: <http://www.wirtschaftsphysik.de/vorlesg/plasma/astrop1.pdf>, [Stand 14. 1. 2004].

MARKUS, Björn: *Björn's HP - Wurmlöcher by bm&sz*, 18. 12. 2003.

- URL: <http://www.yourbestman.de/000/bnice/wurml/start.htm>, [Stand 14. 1. 2004].

RAMSEBNER, Gerhard: *licht*, 23. 9. 2003.

- URL: <http://www.ramsebner.com/txt/licht/licht.html>, [Stand 14. 1. 2004].

SCHOOFS, Ralf: *Ferne Welten – Roter Riese*, 15. 6. 2003.

- URL: http://home.t-online.de/home/ralf.schoofs/german/dwor14_d.htm, [Stand 14. 1. 2004].

SCHRACK, Florian: *Gravitation – Theorien, Effekte und Simulation am Computer*, 6. 6. 2002.

- URL: <http://theory.gsi.de/~vanhees/faq/gravitation/node30.html>, [Stand 14. 1. 2004].
- URL: <http://theory.gsi.de/~vanhees/faq/gravitation/node36.html>, [Stand 14. 1. 2004].
- URL: <http://theory.gsi.de/~vanhees/faq/gravitation/node37.html>, [Stand 14. 1. 2004].

WALES, Jim, Wikipedia Foundation Inc.: *WIKIPEDIA, die freie Enzyklopädie – Stringtheorie*, 4. 1. 2004.

- URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Stringtheorie>, [Stand 14. 1. 2004].

WERNER, Ernst: *Kosmologie*, 12. 3. 2002.

- URL: http://home.arcor.de/ernst_werner/diplom/astro/neutronenstern.html, [Stand 14. 1. 2004].
- URL: http://home.arcor.de/ernst_werner/diplom/astro/sternentstehung.html, [Stand 14. 1. 2004].
- URL: http://home.arcor.de/ernst_werner/diplom/astro/supernova.html, [Stand 14. 1. 2004].
- URL: http://home.arcor.de/ernst_werner/diplom/astro/weisser_zwergstern.html, [Stand 14. 1. 2004].

ZUMSTEIN, Peter: *Star Trek: Zumstein's Trek Page – Galerie Wurmloch*, 9. 3. 2003.

- URL: <http://www.zumstein.org/trekpage/galerie/gale30.html>, [Stand 14. 1. 2004].

Anhang A

Eine Zusammenstellung der häufig verwendeten Formelzeichen und Konstanten:

A	Fläche des Ereignishorizonts
α	Heliumkern
c ($c \approx 2,998 \cdot 10^8$ m/s)	Lichtgeschwindigkeit
d	Deuteron
E	Energie
e^-	Elektron
e^+	Positron
f	Frequenz
g ($g \approx 9,81$ m/s ²)	Erdbeschleunigung
G ($G = 6,67259 \cdot 10^{-11}$ Nm ² /kg ²)	Gravitationskonstante
γ	Gamma-Quant
H	Höhe
\hbar ($\hbar = 6,6260755 \cdot 10^{-34}$ J · s)	Planck'sches Wirkungsquantum
J	Joule
K	Kelvin
k ($k = 1,380658 \cdot 10^{-23}$ J/K)	Boltzmann-Konstante
l	Länge
m	Molekülmasse in chem. Reaktionsgleichungen, sonst Meter
M	Masse der Gaswolke
M_{\otimes} ($1 M_{\otimes} = 333000$ Erdmassen)	Sonnenmasse
MeV	Megaelektronenvolt
N	Anzahl der Gasmoleküle
Nm	Newtonmeter
ν	Neutrino
p	Proton
P	Druck
Q	Wärme
R	Radius bzw. Schwarzschild-Radius
ρ	Dichte
S	Entropie
s	Weg
T	Temperatur
t	Zeit
U	innere Energie
V	Volumen
v	Geschwindigkeit
W	Arbeit

Anhang B

Zum Abschluss dieser Arbeit ist noch eine CD beigelegt, auf welcher interessante Audio- bzw. Video-Dateien (abspielbar unter *Windows*-Betriebssystemen ab der *Version 95* mit dem *Windows Media Player*) mit folgenden Titeln enthalten sind:

- Der Lebenszyklus eines Sterns - von der Geburt über einen Hauptreihenstern und Roten Riesen bis zu einem Neutronenstern
Datei: „Lebenszyklus eines Sterns.mpeg“.
Quelle: Ernst WERNER: *Kosmologie*, 12. 3. 2002.
- URL: http://home.arcor.de/ernst_werner/diplom/astro/sternentstehung.html, [Stand 14. 1. 2004].
- Die Reise in ein Schwarzes Loch
Datei: „Reise in ein Schwarzes Loch.avi“.
Quelle: Harald FRATER, Springer Verlag, Heidelberg – MMCD GmbH, Düsseldorf:
G.O. Wissen Online – FOCUS Schwarze Löcher, März 2001.
- URL: <http://www.g-o.de/home04eu.htm>, [Stand 14. 1. 2004].
- Die Umkreisung eines Schwarzen Lochs
Datei: „Umkreisung eines Schwarzen Lochs.mpeg“
Quelle: URL: <http://www.g-o.de/home04eu.htm> (siehe oben)
- Der Himmel nahe am Ereignishorizont
Datei: „Himmel nahe am Ereignishorizont.mpeg“
Quelle: URL: <http://www.g-o.de/home04eu.htm> (siehe oben)
- Eine Umsetzung der Röntgensignale eines Schwarzen Lochs in Audiosignale
Datei: „Umsetzung der Röntgensignale in Audiosignale.wav“
Quelle: URL: <http://www.g-o.de/home04eu.htm> (siehe oben)

Erklärung

Ich erkläre, dass die vorliegende Fachbereichsarbeit von mir selbst verfasst wurde, und dass ich dazu nur die angeführten Quellen verwendet habe. Außerdem habe ich die Arbeit einer Korrektur unterzogen.

Wiener Neustadt, am 13. 2. 2004

.....

Cornelia Faustmann