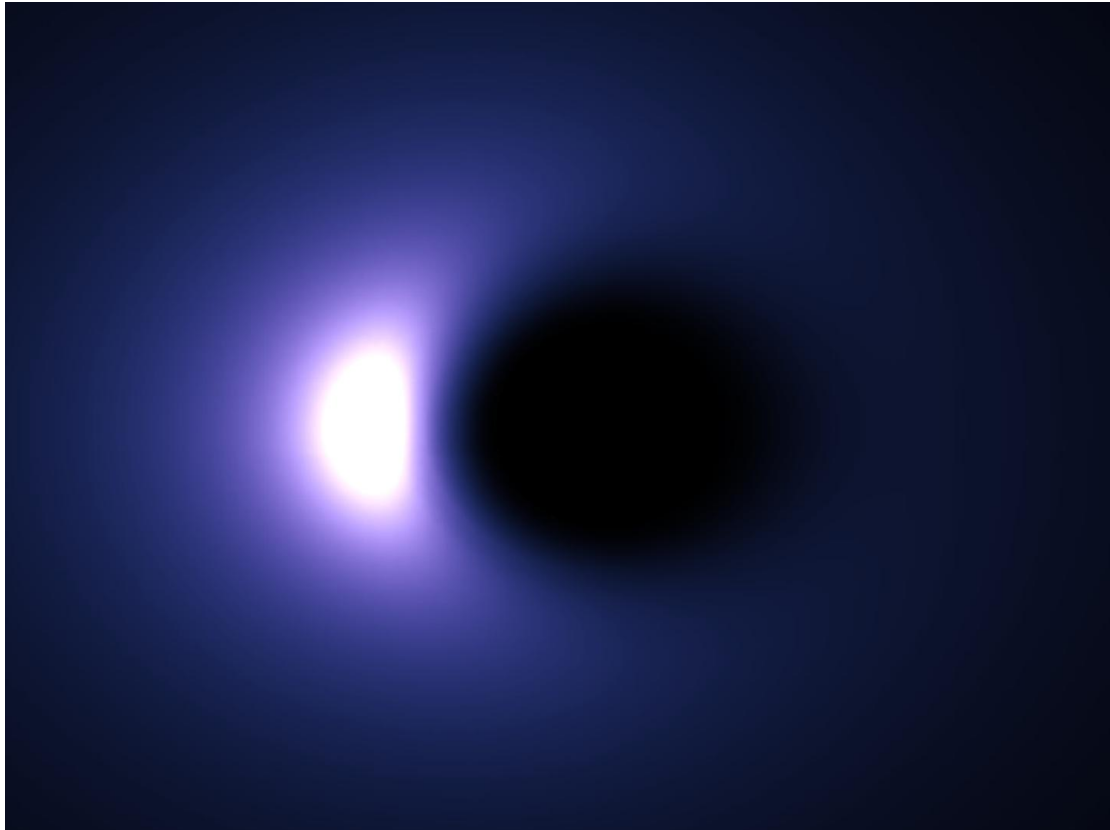


Schwarze Löcher

Das dunkelste Geheimnis der Gravitation



von

Dr. Andreas Müller

Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching

April 2007

Das, was die Welt im Innersten zusammenhält, ist die Welt selbst.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Verbiegen von Raum und Zeit	2
1.2	Zum Begriff <i>Schwarzes Loch</i>	3
1.3	Schwarze Löcher in der Astronomie	3
1.4	Gibt es klassische Schwarze Löcher?	3
1.5	Übersicht zum Artikel	4
2	Historie Schwarzer Löcher	7
2.1	1750	7
2.2	1900	7
2.3	1950	9
2.4	1960	9
2.5	1970	10
2.6	1980	12
2.7	1990	12
2.8	2000	14
2.9	2001	14
2.10	2002	15
2.11	2003	16
2.12	2004	17
2.13	2005	17
2.14	2006	19
2.15	2007	19
3	Relativitätstheorie und Raumzeit	21
3.1	Bezugssysteme - Alles eine Frage des Standorts	21
3.2	Das Wesen der Relativität	22
3.3	'E gleich m c Quadrat'	23
3.4	Tensoren	23
3.5	Revolutionäre Ansichten: Gravitation geometrisch betrachtet	24
3.6	Was die Welt im Innersten zusammenhält	26
3.7	Was tun mit der Feldgleichung?	26
3.8	Triviale Raumzeit der SRT	27
3.9	Schwarze Löcher sind relativistische Objekte	28
3.10	p.s.	29

4	Die Schwarzschild-Lösung	31
4.1	äußere Schwarzschild-Lösung	31
4.2	innere Schwarzschild-Lösung	31
4.3	Schwarzschilds Raumzeit in der Astronomie	32
4.4	Neue Einsichten durch geeignete Koordinatensysteme	33
4.5	Wurmloch	34
4.6	Anti-Frame-Drag	34
5	Die Kerr-Lösung	37
5.1	Kerrs Raumzeit in der Astronomie	37
5.2	Symmetrien des Kerr-Vakuums	37
5.3	Eine rotierende Raumzeit	38
5.4	Boyer-Lindquist-Koordinaten - Die Standarddarstellung	39
5.5	Im Schlepptau des rotierenden Lochs	41
5.6	Kerr-Löcher als Materieschleuder	42
5.7	Bewegungen um den rotierenden Raumzeit-Schlund	44
5.8	Licht in der Kerr-Metrik	45
5.9	Ringsingularität und Ergosphäre - Neue Strukturen in der Kerr-Lösung . . .	47
5.10	Ein Plädoyer für Löcher ohne Ladung	51
6	Eigenschaften Schwarzer Löcher	53
6.1	Horizonte und Kerr-Parameter	53
6.2	Entwicklung Schwarzer Löcher	56
6.3	Im Würgegriff des Schwarzen Lochs	57
6.4	Singularitäten - Orte unendlicher Krümmung	57
7	Massenskala Schwarzer Löcher	61
7.1	Primordiale Schwarze Löcher	61
7.2	Stellare Schwarze Löcher	62
7.3	Wenn Sterne explodieren	63
7.4	Das Hellste im Universum!	65
7.5	Mittelschwere Schwarze Löcher	66
7.6	Supermassereiche Schwarze Löcher	68
7.7	Das AGN-Standardmodell	68
7.8	Das Leuchten der AGN	69
8	Akkretion - Materie am Abgrund	71
8.1	Kosmische Davids und Goliaths	71
8.2	Eine Mahlzeit für das Loch	71
8.3	Karussellfahrt ins Loch	72
8.4	Magnetische Effekte	73
8.5	Einstein-Effekte	74
8.6	Die numerische Herausforderung	74
8.7	Akkretionsflüsse - Wege ins Loch sind vielfältig	75
8.8	SSD und ADAF	75
8.9	NRAF	76
8.10	NRAF auf Kerr!	77

8.11	Status und Ausblick	79
8.12	Und die Natur?	79
9	Beobachtung Schwarzer Löcher	81
9.1	Ein Foto vom Stecknadelkopf	81
9.2	Spektro-relativistische Verifikation	81
9.3	Eruptive Verifikation	82
9.4	Kinematische Verifikation	83
9.5	Aberrative Verifikation	83
9.6	Obskurative Verifikation	85
9.7	Akkretive Verifikation	87
9.8	Temporale Verifikation	88
9.9	Gravitationswelleninduzierte Verifikation	88
10	Schwarze Löcher und Kosmologie	91
10.1	Wachstum supermassereicher Schwarzer Löcher	91
10.2	Huhn oder Ei?	92
10.3	Woher kam das Ei?	93
11	Thermodynamik und Hawking-Strahlung	95
11.1	Wiederentdeckung der klassischen Wärmelehre	95
11.2	Der 2. Hauptsatz	95
11.3	Zahlenbeispiele für Entropien	96
11.4	Paradox!	97
11.5	Der neue Temperaturbegriff	97
11.6	Der 0. Hauptsatz	98
11.7	Der 3. Hauptsatz	98
11.8	Der 1. Hauptsatz	98
11.9	Strahlung aus der Quantenwelt	99
11.10	Skizzierung in Quantensprache	99
11.11	Bitte im Klartext?	100
11.12	Hawking-Strahlung in der Natur	100
11.13	Ausblick	101
12	Schwarze Löcher in Teilchenbeschleunigern	103
12.1	Extradimensionen und reduzierte Planck-Skala	103
12.2	Gefahr durch Mini-Löcher?	105
12.3	So verschwindet ein Mini-Loch	106
12.4	Moment – Und wenn die Planck-Skala nicht reduziert ist?	107
12.5	Vertrauen Sie Hawking?	108
12.6	Bedeutung von Mini-Löchern	109
13	Zukunft Schwarzer Löcher	111
13.1	Löcher bald im Labor?	111
13.2	Moderne Alternativen	111
13.3	Die kosmologische Bedeutung	112
13.4	Masse ohne Materie?	113

13.5	Schlussworte	113
13.6	Hinweis	114
13.7	Ein dickes Dankeschön!	114
14	Literatur	117
14.1	vom Autor	117
14.2	andere Autoren	118
14.2.1	wissenschaftliche Veröffentlichungen	118
14.2.2	Bücher	124
14.2.3	Skripte	125

Abbildungsverzeichnis

1.1	HST-Foto von durch Gravitationslinsen verzerrten Galaxien.	2
1.2	Was ist die Natur Schwarzer Löcher?	4
4.1	Das äußere Schwarzschild Linienelement.	31
4.2	Karl Schwarzschild.	32
4.3	innere Schwarzschild-Lösung: Gravitationsfeld einer idealen Flüssigkeitskugel.	33
5.1	Roy Patrick Kerr.	38
5.2	Das Kerr Linienelement.	38
5.3	Radiales Verhalten der Boyer-Lindquist-Funktionen bei Maximum Kerr $a = M$	39
5.4	Radiales Verhalten der Boyer-Lindquist-Funktionen bei Schwarzschild $a = 0$	42
5.5	HST-Foto der aktiven Galaxie M87 mit Jet.	43
5.6	Winkelgeschwindigkeit in der Kerr-Metrik.	46
5.7	prograde und retrograde Winkelgeschwindigkeit für Maximum Kerr.	47
5.8	Morphologie eines rotierenden Schwarzen Lochs: Orbits, Horizont, Ergosphäre und Singularität.	48
5.9	Charakteristische Radien eines Schwarzen Lochs in Abhängigkeit vom Kerr-Parameter a	49
6.1	Schwarze Löcher: statische Schwarzschild-Raumzeit und rotierende Kerr-Raumzeit.	54
6.2	Simulation einer leuchtenden Akkretionsscheibe um ein Kerr-Loch.	55
6.3	Innerer (grün) und äußerer (rot) Horizont eines Kerr-Lochs in Abhängigkeit vom Drehimpuls des Loches.	56
6.4	Gezeitenkräfte auf eine fallende Kugel.	57
6.5	Krümmungsrelief eines rotierenden Schwarzen Loches mit $a = 0.998$	58
7.1	Massenhierarchie Schwarzer Löcher.	62
7.2	Supernovaüberrest Cassiopeia A.	63
7.3	fünf Lagrange-Punkte in einem Doppelsternsystem.	64
7.4	Integral-Foto des Gammastrahlenausbruch GRB030227.	65
7.5	HST-Foto des Kugelsternhaufens M80.	67
7.6	Tomographie eines Aktiven Galaktischen Kerns bis zur pc-Skala.	69
7.7	optisches Erscheinungsbild des Quasars 3C273.	70
8.1	Simulierte Emission eines um 80 Grad geneigten Materierings direkt am rotierenden Schwarzen Loch.	72
8.2	Simulierte Emission einer hoch inklinierten Akkretionsscheibe um ein Kerr Loch.	73
8.3	Sandwich aus SSD und ADAF.	75

9.1	Prototyp eines Emissionslinienprofils, ausgesandt nahe einem Schwarzen Loch.	82
9.2	Gelinste kreisförmige Umlaufbahnen um ein Schwarzes Loch unter verschiedenen Blickwinkeln.	84
9.3	Erscheinungsbild einer dünnen Gasscheibe und eines Kerr-Loch bei verschiedenen Neigungen.	86
9.4	Illustration eines Mikroquasars.	87
9.5	ULIRG NGC 6240 – der doppelte AGN.	89
10.1	Wachstum Schwarzer Löcher: erst Quasare, viel später Seyferts.	91
11.1	Hawking-Strahlung.	99
12.1	Dimensionale Beschränkung und Unbeschränkung in der Branen-Welt.	104

1 Einführung

Schwarze Löcher sind wohl die bizarrsten Objekte der Astrophysik. Es handelt sich um besonders kompakte Objekte, die so dicht sind, dass nicht einmal das Licht ihnen zu entkommen vermag. Kann es so etwas Merkwürdiges in der Natur geben? Die aktuellen, astronomischen Beobachtungen legen genau das nahe! Verstehen lassen sich Schwarze Löcher, wenn man die Gravitation geometrisch deutet. Dies gelang zum ersten Mal niemand Geringerem als *Albert Einstein* (1879 - 1955), der in seinem Wunderjahr 1905 die Relativitätstheorie begründete. Ihre Erweiterung als Gravitationstheorie, als Allgemeine Relativitätstheorie (ART), gelang ihm jedoch erst viel später, im Jahre 1916.

Wie deutet man Gravitation geometrisch? Wir wissen aus Erfahrung, dass Körper im Schwerfeld einer Masse wie der Erde fallen. Newton erklärte dies erfolgreich mit einer Gravitationskraft, die umso größer ist, je massereicher die beteiligten Körper sind und je näher sie sich sind. Einstein hingegen sah in der Gravitation etwas, das mit der Struktur von Raum und Zeit selbst zusammenhängt. Er verknüpfte Raum und Zeit zur Raumzeit, einem vierdimensionalen Gebilde, das Krümmungseigenschaften aufweisen kann wie ein zerklüftetes Gebirge. Keine Krümmung heißt, dass es kein Gebirge gibt. Die flache Raumzeit ist wie eine Prärie - strukturlos und eben. Im Gegensatz dazu ist die gekrümmte Raumzeit reich an Struktur: sie hat Berge und Täler. Einsteins ART besagt, dass jede Form von Energie äquivalent ist zu **Masse** und Krümmungen in der Raumzeit erzeugt.

Eine wichtige Konsequenz von Einsteins Theorie ist, dass Massen Lichtstrahlen ablenken können. Eine Masse kann wie eine optische Linse wirken und wird deshalb auch Gravitationslinse genannt. Dass dieser merkwürdige Sachverhalt tatsächlich in der Natur geschieht, zeigt das optische Bild 1.1 einer Ansammlung von Galaxien, das mit dem Weltraumteleskop Hubble fotografiert wurde (Credit: *Kneib & Ellis*, 2004, ESA/NASA). Durch die lange Belichtungszeit dieser so genannten Tiefenfeldbeobachtung ist ein besonders tiefer Blick ins Universum gelungen: Der Betrachter sieht hier keine Einzelsterne mehr, sondern nur Galaxien, die sich in unterschiedlichen, sehr hohen Entfernungen befinden! Das Besondere an diesem Foto ist aber, dass einige Galaxien eine merkwürdige Form haben. Sie sind in lange Bögen gestreckt worden. Eine aufmerksame Betrachtung zeigt, dass die Bögen sich konzentrisch um einen gemeinsamen Mittelpunkt zu formieren scheinen. Das ist kein Zufall! Die Fadenform einiger Galaxien ist nicht ihre echte, physische Gestalt; es sieht nur so aus. Zwischen diesen verzerrten Galaxien und uns als Beobachter befindet sich nämlich eine sehr große, kompakte Masse, der Galaxienhaufen mit der Katalogbezeichnung Abell 2218, der vor allem aus Dunkler Materie besteht. Diese schwere Massenansammlung wirkt nun wie eine Linse auf das Licht, das von den dahinter liegenden Galaxien kommt. Die Konsequenz ist, dass das Licht auf extrem krummen Wegen zu uns gelangt. Es wird um die kompakte Linse herum gebogen, und somit wird die optische Gestalt der Galaxien stark verzerrt. Das Resultat ist eine 'kosmische Fata Morgana', ein Trugbild, das nur mit Einsteins Theorie verstanden und berechnet werden kann. Dieses wunderbare Bild dokumentiert auf unmittelbar einsichtige Weise die Richtigkeit der ART.

Nun ist es denkbar, dass diese Ablenkung so stark ist, weil die Masse so kompakt ist, dass

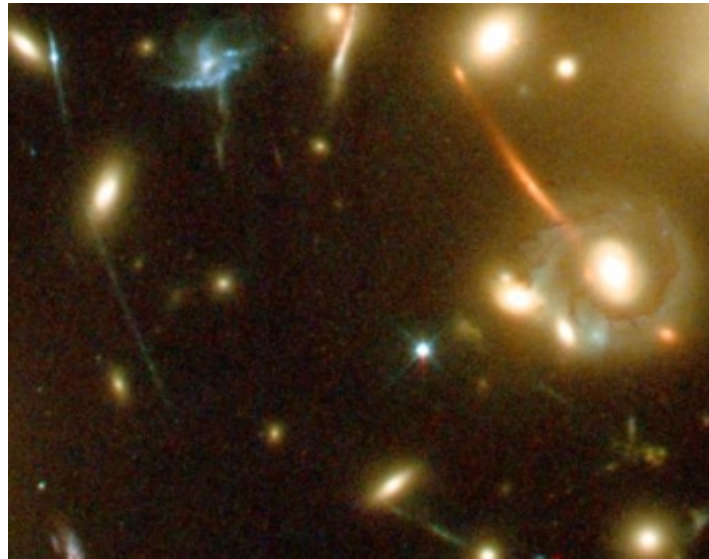


Abbildung 1.1: HST-Foto von durch Gravitationslinsen verzerrten Galaxien.

das Licht eingefangen wird. Genau das ist ein Schwarzes Loch: die **extremste Form einer Gravitationslinse**. Tatsächlich gab es - wie wir sehen werden - diese Überlegung schon lange vor Einstein im 18. Jahrhundert, angestellt von Pfarrer *John Michell*.

1.1 Verbiegen von Raum und Zeit

Die Dunkelheit der Schwarzen Löcher ist allerdings nur eine ihrer seltsamen Eigenschaften. Daneben haben sie erstaunliche Auswirkungen auf Raum und Zeit in ihrer Umgebung. Es stellt sich in einer relativistischen Behandlung heraus, dass diese Effekte eng miteinander zusammenhängen. Die physikalische Ursache dafür ist die enorme **Krümmung von Raum und Zeit**, die kompakte Massen im Allgemeinen und Schwarze Löcher im Besonderen hervorrufen. Diese Krümmung ist so gigantisch, dass Strahlung und Teilchen, die dem Schwarzen Loch zu nahe kommen für immer verloren sind. Das Schwarze Loch 'verschluckt' diese Strahlung und erscheint dem entfernten Beobachter schwarz.

Eine leuchtende Uhr, die in ein Schwarzes Loch fällt, wird aus der Sicht eines entfernten Außenbeobachters mit der Annäherung röter sowie schwächer leuchten und auch langsamer ticken. An einer kritischen Grenze um das Schwarze Loch, dem **Ereignishorizont**, wird die Uhr stehen bleiben, was der Beobachter jedoch nicht mehr sehen wird, weil auch ihr Leuchten vollständig verdunkelt.

Das Verbiegen des Raums macht sich dadurch bemerkbar, dass Testkörper, die in der Nähe des Loches einfallen, zwingend auf das Loch beschleunigt werden. Das Loch lenkt die Fallrichtung auf sich - ein Entkommen ist nur in wenigen Ausnahmefällen möglich.

1.2 Zum Begriff Schwarzes Loch

Der Relativist *John Archibald Wheeler* erfand den Begriff *Black Hole*, also *Schwarzes Loch*, im Jahr 1967. Tatsächlich gibt es die Löcher schon viel länger: Der deutsche Astronom *Karl Schwarzschild* löste Einsteins kompliziertes Formelwerk der Allgemeinen Relativitätstheorie und fand bereits 1916 eine kugelsymmetrische Lösung, die das Gravitationsfeld einer Punktmasse beschreibt: die Schwarzschild-Lösung.

Heute zählt diese Lösung zur Familie der klassischen Schwarzen Löcher, von denen es noch drei weitere Formen (Reissner-Nordstrøm-Lösung, Kerr-Lösung und Kerr-Newman-Lösung) gibt, wie wir sehen werden.

In diesem Artikel sollen die Begriffe *Schwarzes Loch* und *kompaktes, dunkles Objekt* streng unterschieden werden. Ein Schwarzes Loch soll ein klassisches Objekt sein, das Ereignishorizont und Singularität haben muss - was diese beiden Eigenschaften sind, wird im Weiteren klar werden. Im Gegensatz dazu soll ein kompaktes, dunkles Objekt etwas sein, das viel Masse auf wenig Raum vereint und deshalb aufgrund der ART dunkel wird. Es muss aber *nicht* notwendig Ereignishorizont und Singularität haben

1.3 Schwarze Löcher in der Astronomie

Die Astronomen haben am Himmel Objekte gefunden, die sehr gute Kandidaten für Schwarze Löcher sind. Sie haben verschiedene Größen (d. h. Massen) und sie rotieren sogar wie die Sterne.

Schwarze Löcher haben einen festen Platz im Weltbild der modernen Physik. Die theoretische Astrophysik benötigt solche kompakten Objekte, weil sie sonst in ernsthafte Erklärungsnot gerät:

- ◇ Wie könnte man sonst die beobachteten **hohen, dunklen, kompakten Massen** in den Kernen der Galaxien (wie der Milchstraße) erklären?
- ◇ Woher sonst könnten hell leuchtende, aktive Galaxienkerne, wie die Quasare, ihre **enormen Leuchtkräfte** beziehen, als aus den Strahlungsprozessen, die mit der Materieaufsammlung eines Schwarzen Loches zusammenhängen?
- ◇ Wie sollte man die Entstehung von riesigen, gebündelten, fast lichtschnellen Materieströmen, den Jets, verstehen, die aus dem Innern aktiver Galaxien herausgeschleudert werden und schließlich die Galaxie selbst in ihrer Ausdehnung übertreffen?
- ◇ Wie wenn nicht unter der tragenden Rolle eines superschweren Schwarzen Loches können sich Galaxien im Kosmos entwickeln?

1.4 Gibt es klassische Schwarze Löcher?

Die Existenz von kompakten, dunklen Objekten ist nicht mehr strittig, sehr wohl aber ihre Natur. Die klassischen Schwarzen Löcher vom Schwarzschild-, Reissner-Nordstrøm-, Kerr- und Kerr-Newman-Typus bieten ein paar Eigenschaften, die nicht in Konzepte der modernen Physik passen. Wie verträgt sich z. B. ein punktförmiges Objekt wie eine Punktsingularität

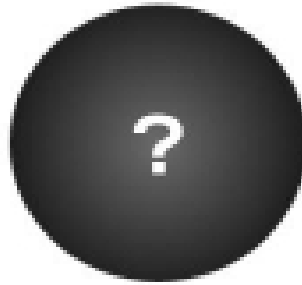


Abbildung 1.2: Was ist die Natur Schwarzer Löcher?

mit der Unschärferelation der Quantentheorie? Erlaubt die Natur die Existenz von Punkten? Gibt es in der Natur Unendlichkeiten?

Die moderne Physik hält nun ein paar Überraschungen bereit: Neue Zweige der Physik wie die Quantengravitation in ihrer Ausprägungsform als Stringtheorien oder Loop-Quantengravitation bieten Alternativen zum klassischen Schwarzen Loch an. Die Forscher wollen daher die unterschiedlichen Modelle an der Natur testen. Ziel ist es, durch astronomische Beobachtungen zu entscheiden, um was es sich genau bei dem kompakten, dunklen Objekt handelt.

Bei aller Fürsprache zu klassischen Schwarzen Löchern und bei all ihrer Mächtigkeit plausible Erklärungen für astronomische Beobachtungen liefern zu können: ein endgültiger Beweis für ihre Existenz steht noch aus! Aus der Sicht so manchen Theoretikers wäre dieser Beweis sogar sehr verwunderlich. Man könnte es salopp so umreißen, dass bisher etwas sehr Kompaktes, Massereiches, Dunkles am Himmel entdeckt wurde. Aber es wurden weder der **Ereignishorizont**, noch die **Singularität** exakt bestätigt. Das spornt natürlich die Astronomen an, die räumliche Auflösung ihrer Teleskope zu erhöhen. Aber vielleicht finden sie auch etwas Neues, etwas Unbekanntes. Schwarze Löcher sind das dunkelste Geheimnis der Gravitation.

1.5 Übersicht zum Artikel

Dieser Artikel über Schwarze Löcher ist so aufgebaut, dass wir uns zunächst einen historischen Überblick verschaffen. Wir werden feststellen, dass die ersten relevanten Überlegungen zu dieser mysteriösen Himmelsobjekten bereits vor fast 250 Jahren angestellt wurden. Vor fast hundert Jahren wurde eine Theorie entwickelt, die Schwarze Löcher erstmals auf eine vernünftige, mathematische Basis stellte. In den 1960er und 1970er Jahren wurden Berechnungen durchgeführt, die wichtige theoretische Erkenntnisse über Schwarze Löcher brachten. Vor allem in den letzten Jahren wurden astronomische Beobachtungen gemacht, die unser Wissen über Schwarze Löcher enorm vorangebracht haben.

Danach widmen wir uns der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) und prüfen inwiefern Schwarze Löcher in diese Theorie eingebettet sind. Die wichtigsten Lösungen der ART, die mit Schwarzen Löchern in Verbindung stehen, werden vorgestellt: die Schwarzschild-Lösung und die Kerr-Lösung. Anhand dieser Raumzeiten wird klar werden, welche Eigenschaften

Schwarze Löcher haben.

In der Mitte dieses Aufsatzes betrachten wir die Astrophysik der Schwarzen Löcher. Thema wird sein, welche Massen die kosmischen Schwarzen Löcher haben und wie sie Materie aus der Umgebung aufsammeln. Dann werden die Beobachtungsmethoden der Astronomen vorgestellt, um Schwarze Löcher zu entdecken. Wir betrachten im Anschluss, welche kosmologische Rolle Schwarze Löcher haben und werden feststellen, dass die schwersten Löcher einen direkten Zusammenhang mit Galaxien haben.

Nach dem astrophysikalischen Teil widmen wir uns einem Bereich der Quanten- und Teilchenphysik, in dem Schwarze Löcher eine Rolle spielen. Wir werden einen engen Bezug der Löcher zur klassischen Wärmelehre erkennen, der letztendlich auf die Erkenntnis führt, dass Schwarze Löcher gar nicht so schwarz seien: diese Hypothese besagt, dass sie die so genannte Hawking-Strahlung abgeben. Diese Strahlungsform ist bedeutsam für die kleinsten Schwarzen Löcher. Unter bestimmten Voraussetzungen könnte es möglich sein, Schwarze Löcher im 'Teilchenformat' in modernen Beschleunigeranlagen herzustellen. Wie das möglich ist und was dabei zu erwarten ist, wird der letzte Diskussionspunkt sein.

Schließlich folgen eine Zusammenfassung der wichtigsten Aspekte dieses Artikels und ein Ausblick auf die Erforschung Schwarzer Löcher in naher Zukunft.

2 Historie Schwarzer Löcher

2.1 1750

- ◇ Die erste geschichtlich nachweisbare Spekulation über Schwarze Löcher, wenn sie auch noch nicht so genannt wurden, unternimmt der Pfarrer, Geologe und Astronom *John Michell* (1724 - 1793) in seiner Rede vor der *Royal Society* aus dem Jahr 1783. Dort sagt er: '*If the semi-diameter of a sphere of the same density as the Sun in the proportion of five hundred to one, and by supposing light to be attracted by the same force in proportion to its mass with other bodies, all light emitted from such a body would be made to return towards it, by its own proper gravity.*' Damit weist er darauf hin, dass es besonders dichte Körper im Kosmos geben könnte, deren Fluchtgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ist. Dann könnte Licht von diesen Körpern nicht entkommen und sie müssten schwarz sein.
- ◇ Im Jahre 1795 mutmaßt auch *Pierre Simon de Laplace* (1749 - 1827) in seiner Veröffentlichung *Exposition du Système du Monde* auf der Basis der Newtonschen Gravitationstheorie und Korpuskulartheorie des Lichts, dass es genügend schwere Sterne geben könnte, von denen korpuskulares (teilchenartiges) Licht nicht entkommen könnte.

2.2 1900

- ◇ *Albert Einstein* (1879 - 1955) entwickelt die Relativitätstheorie. Die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) veröffentlicht er in seinem Wunderjahr 1905. Diese erste Relativitätstheorie beschreibt die Physik gleichförmig bewegter Bezugssysteme und hat als wesentliche Grundannahmen die Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit c in allen Inertialsystemen und die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme (spezielles Relativitätsprinzip). Schon mit der SRT vollzieht sich ein neues Verständnis von Raum und Zeit sowie den Begriffen Gleichzeitigkeit und Länge. Raum und Zeit verschmelzen zu einer Einheit: zum **Raum-Zeit-Kontinuum** oder kurz zur Raumzeit. Der von *Aristoteles* (384 - 322 v.Chr.) und *Sir Isaac Newton* (1643 - 1727) geschaffene Begriff der absoluten Zeit wird schlagartig unhaltbar. Zeit und Länge sind relative Größen, die vom Bezugsrahmen abhängen.

Die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) begründet Einstein erst 1915. Diese mathematisch deutlich kompliziertere Theorie stellt die Verallgemeinerung der Speziellen Relativitätstheorie auf beschleunigte Bezugssysteme dar. Weil die Gravitation Bezugssysteme beschleunigt, handelt es sich um eine **Theorie der Gravitation**, die die Newtonsche Gravitationsphysik ablöst.

Bis zum heutigen Tag werden die Einsteinschen Postulate, auf denen seine Relativitätstheorie fußt (Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit, Relativitätsprinzip,

Äquivalenzprinzip, Kovarianzprinzip) bestätigt, so dass seine Theorie erfolgreich die Natur beschreibt.

- ◇ Der deutsche Astronom *Karl Schwarzschild* (1873 - 1916) findet bald nach Veröffentlichung der ART die erste Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen im Jahr 1916: Diese heute **äußere Schwarzschild-Lösung** genannte Metrik beschreibt nicht rotierende, statische Schwarze Löcher, die jedoch schon alle wesentlichen Eigenschaften Schwarzer Löcher aufweist. So gibt es einen Ereignishorizont und eine zentrale Singularität.

Im gleichen Jahr entdeckt Schwarzschild die **innere Schwarzschild-Lösung**. Sie ist nicht mehr statisch, keine Vakuumraumzeit mehr und wird von einer inkompressiblen Flüssigkeit erzeugt, die Kugelform besitzt. Die Schwarzschild-Lösungen werden in einem separaten Kapitel ausführlich besprochen.

- ◇ Eine erste Verallgemeinerung erfährt diese nicht rotierende Lösung durch die Arbeiten von *Hans Jacob Reissner* (1874 - 1967) (*Über die Eigengravitation des elektrischen Feldes nach der Einsteinschen Theorie*, 1916) und *G. Nordström* (*On the energy of the gravitational field in Einstein's theory*, 1918). Die ebenfalls kugelsymmetrische Metrik enthält in dem zeitlichen und radialen Term eine elektrische Ladung. Ableiten lässt sich diese Reissner-Nordström-Lösung aus den Einstein-Maxwell-Gleichungen. Der Energie-Impuls-Tensor ist hier nicht null, sondern entspricht dem Maxwell-Tensor.
- ◇ Der indische Astrophysiker *Subrahmanyan Chandrasekhar* (1910 - 1995) entdeckt 1930, dass es für eine Ansammlung entarteter, relativistischer Materie (beschrieben als *ideales Fermigas*) eine kritische Grenzmasse gibt (Papier: *The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs*, 1931). Objekte unterhalb dieser so genannten Chandrasekhar-Grenze von etwa 1.46 Sonnenmassen heißen Weiße Zwerge. Es gibt sie tatsächlich: Astronomen entdecken bis heute Weiße Zwerge - in großer Zahl vor allem in Kugelsternhaufen. Oberhalb der Chandrasekhar-Masse führt der Gravitationskollaps zu noch kompakteren Objekten: Neutronensternen. Auch diese kompakten Sterne sind vermutlich bis maximal drei Sonnenmassen (neuere Arbeiten gehen eher von kleineren Maximalmassen der Neutronensterne aus) stabil und kollabieren dann zu stellaren Schwarzen Löchern.
- ◇ *Chandrasekhars* Veröffentlichung inspiriert den besonders angesehenen, englischen Astrophysiker *Sir Arthur S. Eddington* (1882 - 1944) 1935 zu der Spekulation, dass - gäbe es dieses Massenlimit - relativistische Sterne so sehr kollabieren könnten, dass ihr Gravitationsfeld die Strahlung 'einfangen' würde. Freilich nennt er diese Objekte nicht *Schwarze Löcher*; er empfindet sogar diese Vorstellung als absurd und würde eher Naturgesetze erwarten, die diese **Absurdität** verhindern.
- ◇ *Julius Robert Oppenheimer* (1904 - 1967) und *Hartland Snyder* (1913 - 1962) veröffentlichen 1939 das Papier *On continued gravitational contraction* über den **relativistischen Gravitationskollaps einer homogenen Flüssigkeitskugel**. Dies ist die erste Berechnung, wie sich ein kollabierendes Objekt während des Kollapses von der Außenwelt durch die Ausbildung eines Ereignishorizontes abschirmt. Es ist ebenfalls die erste Rechnung, die zeigt, wie dramatisch unterschiedlich die Sichtweise aus verschiedenen Bezugssystemen sein kann: ein Beobachter auf der implodierenden Sternoberfläche würde in endlicher Zeit den Kollaps des Sterns beobachten (was

er vermutlich keinem mehr berichten könnte), während für einen Beobachter im Unendlichen die Implosionsbewegung ab einem kritischen Punkt 'eingefroren' würde.

- ◇ Im gleichen Jahr, 1939, berechnen *Oppenheimer* und *George Michael Volkoff* (1914 - 2000) die relativistischen Grundgleichungen eines kompakten Neutronensterns in dem Papier *On massive neutron cores*. Sie nehmen Bezug auf die analytische Vorarbeit von *Richard Chase Tolman* (1881 - 1948), der ebenfalls 1939 in dem Papier *Static solutions of Einstein's field equations for spheres of fluid* das Thema behandelt. Das Fluidum aus Neutronen, das sich durch inversen Betazerfall ausbildet, wird dabei als Fermi-Gas und relativistisch beschrieben. Ausfluss dieser Berechnungen sind die vier so genannten **TOV-Gleichungen** (TOV für Tolman-Oppenheimer-Volkoff), die die Newtonschen Gleichungen eines Sterns verallgemeinern. Die TOV-Gleichungen gehen im asymptotischen Außenraum-Limit in die Schwarzschild-Lösung über.

2.3 1950

- ◇ Es folgen Jahrzehnte der **Ignoranz des Problems** *Gravitationskollaps auf ein punktförmiges, dunkles Objekt*. Dies liegt einerseits daran, dass keine neuen, wichtigen Erkenntnisse gewonnen wurden, aber auch sicherlich an der Ablehnung dieser möglichen, stellaren Konfiguration durch anerkannte Physiker wie *Eddington* und *L.D. Landau*.
- ◇ Die Schwarzschild-Singularität der Schwarzschild-Lösung bei zwei Gravitationsradien (einem so genannten Schwarzschild-Radius) wird in den 50er Jahren durch ein neues Koordinatensystem von *David Finkelstein* als Koordinatensingularität entlarvt. Diese lässt sich mit den Eddington-Finkelstein-Koordinaten vermeiden. *Wolfgang Rindler* schlägt daher den Namen Horizont für diese kritische Fläche vor.
- ◇ 1957 zeigen *Tullio Regge* und *John A. Wheeler*, dass die **Schwarzschild-Lösung stabil** ist gegenüber nicht kugelsymmetrischen Störungen der Metrik.

2.4 1960

- ◇ *Roy Patrick Kerr* (* 1934) findet 1963 eine Verallgemeinerung der Schwarzschild-Lösung auf *rotierende Schwarze Löcher*. Die Raumzeit dieser Vakuumlösungen der Einsteinschen Feldgleichungen ist axialsymmetrisch und stationär. Fortan nennt man diese Form rotierender Schwarzer Löcher Kerr-Lösung. Die historische Kerr-Form war kartesisch und ist für die Anwendung unhandlich. Mehr Details zur Kerr-Metrik folgen in einem nächsten Kapitel.
- ◇ Der Physiker *Roger Penrose* vermutet 1964 die Existenz von Singularitäten im Innern Schwarzer Löcher. 1965 folgt die Veröffentlichung *Gravitational collapse and space-time singularities*. In der Folgezeit entwickelt er zusammen mit *Stephen W. Hawking* die **Singularitätentheoreme**, die die Existenz einer Singularität zwingend erfordern.
- ◇ Auch die Kerr-Metrik erhält eine Verallgemeinerung, nämlich in der Form, dass das Schwarze Loch neben Masse und Drehimpuls eine elektrische Ladung besitzen kann. Dann nennt man diese Schwarzen Löcher Kerr-Newman-Lösungen. Sie werden 1965 von *E. T. Newman*, *E. Couch*, *K. Chinnapared*, *A. Exton*, *A. Prakash* und *R. Torrence*

gefunden (Papier: *Metric of a rotating, charged mass*) und später als geladenes, rotierendes Schwarzes Loch identifiziert.

Dieser Typus ist für astrophysikalische Anwendungen zu akademisch, weil Ladungsunterschiede zwischen Loch und Umgebung immer durch elektrische Ströme (Plasmaströme, z. B. im Akkretionsfluss) ausgeglichen werden sollten. Kerr-Newman-Löcher sind also nur in völliger Isolation denkbar. Nichtsdestotrotz sind Kerr-Newman-Löcher interessante Studienobjekte für Relativisten.

- ◇ *R. H. Boyer* und *R. W. Lindquist* finden 1967 die heutige Standardschreibweise für rotierende, ungeladene Schwarze Löcher, die Boyer-Lindquist-Form, die sie in der Veröffentlichung *Maximal analytic extension of the Kerr metric* darlegen. Die Boyer-Lindquist-Form weist eine ungünstige Eigenschaft auf: Neben der (unvermeidbaren) intrinsischen Singularität hat sie auch (vermeidbare) Koordinatensingularitäten an den beiden Horizonten des rotierenden Loches. Diese 'pathologischen' Eigenschaften werden durch Kerr-Schild-Koordinaten ausgeräumt.
- ◇ Mit den Satelliten VELA 4A und B, die eigentlich militärischen Zwecken dienen, entdecken Forscher 1967 kurzzeitige Strahlungsausbrüche am Himmel im Bereich höchster Strahlungsenergien: diese **Gammastrahlungsausbrüche** werden unter dem Namen Gamma Ray Bursts (GRBs) bekannt. Sie sind das Leuchtkräftigste, was es im Kosmos gibt! Was sie mit Schwarzen Löchern zu tun haben, wird erst etwa dreißig Jahre später klar (siehe unten).
- ◇ Der Relativist und Astronom *John Archibald Wheeler* (* 1911) erfindet 1967 den **Begriff Schwarzes Loch** (engl. *black hole*). Dieser neue Begriff löst die bis dato gebräuchlichen Namen *gefrorener Stern* der östlichen Hemisphäre und *kollabierter Stern* der westlichen Hemisphäre ab. 51 Jahre nach deren Entdeckung in der Theorie erhalten Schwarze Löcher ihren Namen: Kein Kind war wohl jemals so alt, als es einen Namen erhielt.
Auf *Wheeler* geht auch das Keine-Haare-Theorem (engl. *No-hair theorem*) zurück, das besagt, dass Schwarze Löcher nur maximal drei Eigenschaften haben: Masse, Drehimpuls und Ladung. *Wheeler* umschreibt das so: '*Ein Schwarzes Loch hat keine Haare.*'
- ◇ *Penrose* entdeckt im Jahr der Mondlandung 1969 die **kosmische Zensur** (engl. *cosmic censorship*). Sie besagt, dass intrinsische (*echte*) Singularitäten hinter einem Ereignishorizont versteckt sind. Es gibt keine sichtbaren (*nackten*) Singularitäten in der Natur. Dieses plausible Theorem ist bis heute unbewiesen.
- ◇ In den ausklingenden 'Goldenen Sechziger der Astronomie' wird auch das **AGN-Paradigma** geboren. Die Astrophysiker *D. Lynden-Bell* und *Martin J. Rees* etablieren in Veröffentlichungen in den Jahren 1969 und 1971 die gängige Vorstellung, dass ein akkretierendes, supermassereiches Schwarzes Loch die Aktivität und enorme Leuchtkraft der aktiven Galaxienkerne (AGN) wie die der Quasare hervorruft.

2.5 1970

- ◇ *James Bardeen* definiert 1970 ein neues Koordinatensystem für rotierende Raumzeiten: das **lokale nicht rotierende Beobachtersystem** (*local non-rotating frame*, LNRF). Dieser Beobachter rotiert lokal mit der Raumzeit (z. B. in der Kerr-Metrik), so dass

Effekte wie Frame-Dragging lokal aufgehoben werden. Der Beobachter heißt dann auch Bardeen-Beobachter oder ZAMO (*zero angular momentum observer*, Beobachter verschwindenden Drehimpulses) in der Literatur. In der Folgezeit bewährte sich dieses Beobachtersystem in der theoretischen Beschreibung sowie in Computersimulationen von Schwarzen Löchern außerordentlich.

- ◇ Der bekannte Kosmologe *Stephen W. Hawking* (* 1942) entdeckt 1970, dass die 'Oberfläche' eines Schwarzen Loches, der Horizont, immer weiter zunimmt (z. B. durch Akkretion). Später wird er das in ein **thermodynamisches Konzept Schwarzer Löcher** einbetten.
- ◇ Der amerikanische Relativist *Robert M. Wald* (*1947) beschreibt mit *J.M. Cohen* elektrische Punktladungen in der Nähe Schwarzer Löcher (1971). 1974 findet er eine Raumzeit, die man heute nach ihm **Wald-Lösung** nennt: Es wird interpretiert als ein rotierendes Schwarzes Loch, das in ein uniformes Magnetfeld eingetaucht ist.
- ◇ Der kanadische Astronom *Tom Bolton* identifiziert 1972 Cygnus X-1 aufgrund der Röntgenemission als **ersten Kandidaten für ein stellares Schwarzes Loch**. Gemäß der Terminologie der Astronomen kennzeichnet *Cygnus X-1* die hellste Röntgenquelle (X-1) im Sternbild *Schwan* (*Cygnus*). Das Loch wiegt etwa zehn Sonnenmassen.
- ◇ Die Astrophysiker *Nikolai Ivanovich Shakura* und *Rashid Alievich Sunyaev* entdecken 1973 eine neue Akkretionslösung, also eine neue Form eines Materiestroms, der von einer Masse aufgesammelt wird. Diese flache, durch Strahlung effizient gekühlte Materiescheibe heißt Standardakkretionsscheibe oder **SSD** für *Shakura-Sunyaev Disk*. Für Schwarze Löcher (aber auch für viele andere Materie aufsammelnde Objekte) ist dieser Akkretionsfluss von großer Bedeutung, weil er viele astronomische Beobachtungen (Spektren) erklärt.
- ◇ *Hawking* leitet 1974 die dann nach ihm benannte Hawking-Strahlung theoretisch ab: Schwarze Löcher können Teilchen emittieren, wenn der quantentheoretische Prozess der Paarbildung nahe am Ereignishorizont stattfindet. Gemäß der Quantentheorie entstehen und vergehen im Vakuum ständig virtuelle Teilchenpaare, dadurch dass aufgrund der *Heisenbergschen Unschärferelation* für sehr kurze Zeiten Energiebeträge zur Verfügung stehen, aus denen Teilchen materialisieren können. Sehr leichte Schwarze Löcher von etwa 10^{18} g können durch diese Teilchenemission am Horizont 'verdampfen'. Die hypothetischen, so genannten primordialen Schwarzen Löcher waren vielleicht in der Frühphase des Universums von Relevanz.

Außerdem entwickelt *Hawking* eine Thermodynamik Schwarzer Löcher mit analogen Hauptsätzen zur klassischen Thermodynamik.

- ◇ *D.C. Robinson* entdeckt 1975 den Eindeutigkeitssatz für stationäre und axialsymmetrische Raumzeiten. Diese seither **Robinson-Theorem** genannte Regel besagt, dass eine achsensymmetrische, asymptotisch flache, reguläre Raumzeit mit konvexem Horizont eindeutig durch zwei Parameter bestimmt ist: **Masse und Drehimpuls**.
- ◇ Die Astrophysikern *R.D. Blandford* und *R.L. Znajek* schlagen 1977 einen Prozess vor, der es erlaubt, auf elektromagnetischem Wege einem rotierenden Schwarzen Loch

Rotationsenergie zu entnehmen. Dieser Vorgang ist heute bekannt als Blandford-Znajek-Mechanismus. Der Mechanismus ermöglicht es, die Jets aktiver Galaxien mit relativistischen Elektronen und Positronen zu 'füttern'.

2.6 1980

- ◇ Der Relativist *William G. Unruh* findet 1984 zusammen mit *Robert M. Wald* in einer theoretischen Arbeit das Pendant zur Hawking-Strahlung: **Beschleunigungsstrahlung**. Sie entsteht im Unruh-Effekt, wenn ein beschleunigter Beobachter die flache Raumzeit (Minkowski-Vakuum) durchfliegt und dieses Vakuum als thermisches Teilchenbad (die Beschleunigungsstrahlung) wahrnimmt. Diese Erkenntnis mündet in eine **Relativität des Teilchenbegriffes**: Es hängt vom Bezugssystem ab, ob ein Teilchen real oder virtuell ist!
- ◇ In den 1980er Jahren werden **Röntgenquellen extrem hoher Leuchtkraft** mit dem Hochenergiesatelliten Einstein beobachtet (*Fabbiano* 1989). Ihre Leuchtkraft übersteigt im Röntgenband zwischen 0.2 und 3.5 keV den Wert von 10^{39} erg/s! Die Astronomen sind sich sicher, dass es sich bei den Objekten weder um aktive Galaxien, noch um Supernovaremnants handelt.

2.7 1990

- ◇ Im Juni 1990 startet der deutsch-britische Röntgensatellit **ROSAT** eine äußerst erfolgreiche Dekade von Röntgenbeobachtungen. Zum ersten Mal wird beim ROSAT all-sky survey der gesamte Himmel im Bereich der Röntgenstrahlung zwischen 0.1 und 2.4 keV abgelichtet. Das Ergebnis ist beeindruckend: Heute wissen die Astronomen, dass sich der kosmische Röntgenhintergrund aus diskreten Quellen zusammensetzt - vor allem aktive Galaxien, wie Quasare und Seyfert-Galaxien (*Hasinger et al.* 1993, 1998). Der heutige Anblick der Röntgenhintergrundstrahlung zeigt einen Schnappschuss von vielen akkretierenden, supermassereichen Schwarzen Löchern über eine lange kosmische Zeitspanne!
- ◇ Die Astrophysiker *Ramesh Narayan* und *Insu Yi* entdecken 1994 eine weitere, wichtige (analytische) Akkretionslösung, den ADAF, ein Akronym für *Advection Dominated Accretion Flow*, was sich als **advektionsdominierter Akkretionsfluss** übersetzen lässt. Dieser räumlich ausgedehnte, durch Strahlung ineffizient gekühlte Materiestrom hatte das Potenzial, um die beobachteten, harten Röntgenspektren, z. B. von Cyg X-1 zu erklären.
- ◇ Das optische Weltraumteleskop Hubble (*Hubble Space Telescope*, HST) findet 1994 eine starke Evidenz für ein supermassereiches Schwarzes Loch in M87, einer riesigen, elliptischen Radiogalaxie im Sternbild *Virgo* (Jungfrau). Spätestens jetzt ist das Paradigma Aktiver Galaktischer Kerne (siehe 1960er) voll etabliert: im Zentrum aktiver Galaxien, wie Quasaren, Blazaren, Seyfert-Galaxien und Radiogalaxien befindet sich ein akkretierendes, supermassereiches Schwarzes Loch, das Ursache für die enorme Leuchtkraft ist.

- ◇ Japanische Röntgenastronomen entdecken 1995 mit dem erfolgreichen, japanischen Röntgensatellit ASCA eine relativistisch verbreiterte Eisenlinie in der Seyfert-Galaxie *MCG-6-30-15* (*Tanaka et al.* 1995). Mit dieser speziellen Röntgenlinie lässt sich die unmittelbare Umgebung eines Schwarzen Loches analysieren, weil sie meist vom inneren Rand der Standardakkretionsscheibe emittiert wird. Der Scheibeninnenrand ist bei *MCG-6-30-15* kleiner als die marginal stabile Bahn eines Schwarzschild-Loches. Damit weist diese Beobachtung erstmals darauf hin, **dass ein kosmisches Schwarzes Loch rotiert!**
- ◇ Astronomen des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik (MPE) in Garching (*Genzel, Eckart & Krabbe* 1995; *Eckart & Genzel* 1996) beobachten mit Infrarotteleskopen die Bewegung von Sternen um das Zentrum der Milchstraße. Indirekt lassen diese Beobachtungen den Schluss zu, dass die kompakte Radioquelle Sgr A* mit einem sehr kompakten, dunklen Objekt von etwa 2.4 Mio. Sonnenmassen assoziiert ist. Die Spekulationen um ein **supermassereiches Schwarzes Loch im Herzen unserer Heimatgalaxie** werden laut.
- ◇ 1997 wird erstmals ein **optisches Nachleuchten eines Gamma Ray Bursts** beobachtet! Die Entwicklungen in der Beobachtungstechnologie zur schnellen, exakten Ortung der Blitze machen sich endlich bezahlt.

Im gleichen Jahr gibt es auch einen Durchbruch in der Theorie der GRBs: Der Gammablitz und das Nachleuchten in anderen Wellenlängenbereichen wird erfolgreich mit den **anisotropen Feuerball-Modell** erklärt (*Meszaros & Rees* 1997). Nach diesem Szenario breitet sich ein ultrarelativistischer Jet im interstellaren Medium aus. Dabei wird Synchrotronstrahlung frei, die vom Bereich der Gammastrahlung abnimmt zu kleineren Strahlungsenergien (Nachleuchten, engl. *afterglow*). Ursache für den Feuerball/die Explosion ist entweder die Verschmelzung kompakter Objekte oder der Kollaps eines massereichen Sterns.

- ◇ Die Spekulationen über die Möglichkeit, Schwarze Löcher in Teilchenbeschleunigern zu erzeugen, werden 1999 ernst zu nehmende, wissenschaftliche Thesen. Die Voraussetzung ist allerdings eine reduzierte Planck-Skala, wie sie im ADD-Szenario (*Arkani-Hamed et al.*, 1998) vorgeschlagen wird. Mit dieser Prämisse wird eine Quantengravitation schon im TeV-Bereich relevant und liegt damit in der Reichweite modernen Teilchenbeschleuniger. *Banks & Fischler* (1999) beginnen Abschätzungen zu machen für die Wirkungsquerschnitte zur Erzeugung Schwarzer Mini-Löcher aus der Streuung hochenergetischer Teilchen.

Räumliche Extradimensionen, die noch hypothetisch sind und deren Anzahl man nicht kennt, spielen dabei eine gewichtige Rolle: sie beeinflussen die die Bildung Schwarzer Mini-Löcher.

- ◇ Die Astrophysiker *Stone, Pringle & Begelman* etablieren 1999 einen neuen Typus von Akkretionsflüssen, die **NRAFs**, was für *non-radiative accretion flows*, also nicht-radiative Akkretionsflüsse steht. Bei diesen Materieströmen spielt die Kühlung oder Heizung durch Strahlung keine Rolle oder wird von Anfang an in numerischen Simulationen vernachlässigt. Diese ersten NRAF-Simulationen basieren auf der reinen Hydrodynamik.

- ◇ Japanische Astrophysiker präsentieren erstmals die Ergebnisse einer aufwendigen Computersimulation, bei der die Dynamik von NRAF-Lösungen unter Berücksichtigung der Magnetohydrodynamik auf der gekrümmten Kerr-Raumzeit eines rotierenden Schwarzen Loches untersucht werden kann (*Koide et al.*, 1999). Schon nach kurzer Zeit bilden sich magnetisch getriebene Ausflüsse, was die Forscher so deuten, dass das rotierende Loch einen relativistischen Jet treibt. Leider stellt sich heraus, dass der Code instabil läuft und numerische Probleme hat. Dennoch ist diese Pionierarbeit bedeutend, weil sie die grundsätzliche Annäherung an das herausfordernde Problem aufzeigt.

2.8 2000

- ◇ Im Jahr 2000 erhalten die vielfach beobachteten Röntgenquellen extrem hoher Leuchtkraft einen Namen: Die Fachwelt spricht nun von *ultraluminous X-ray sources*, **ULXs**, was sich als ultraleuchtkräftige Röntgenquellen übersetzen lässt (*Makishima et al.* 2000). Definitionsgemäß hat ein ULX eine größere Röntgenleuchtkraft als 10^{39} erg/s. Die beobachtete Zahl von ULXs ist mittlerweile angestiegen. Astronomen beobachten merkwürdigerweise eine Häufung in Spiralgalaxien. Man weiß nun auch, dass die Spektren gut mit einer Standardakkretionsscheibe erklärt werden können, die Wärmestrahlung abgibt (*multi-color disk blackbody*). Mit dem Eddington-Argument folgt, dass der Akkretor Massen von mindestens hundert Sonnenmassen haben muss. Damit sind es gute Kandidaten für ein stellares Schwarzes Loch, vielleicht sogar eines größerer Masse, ein *intermediate-mass black hole*. Rätselhaft ist, dass zu diesen Massen nicht die Temperaturen der Innenränder der Scheiben passen. Eventuell weist diese Inkompatibilität darauf hin, dass die Schwarzen Löcher in ULXs rotieren! Denn dann rückt die der stabile Innenrand der Scheibe näher an das Loch heran und wird heißer (siehe marginal stabile Bahn).
- ◇ *G. Chapline, E. Hohlfeld, R.B. Laughlin* und *D.I. Santiago* verbinden Ende 2000 Konzepte der Quantentheorie mit der Theorie Schwarzer Löcher. Sie verwenden dazu ähnliche Formalismen, wie in der Beschreibung von **Bose-Einstein-Kondensaten** und erwarten einen **Quantenphasenübergang** am Horizont Schwarzer Löcher. Wesentliche Folgen dieses Konzepts sind eine neue Beschreibung des Inneren Schwarzer Löcher, das eher einer de-Sitter-Blase (ein Vakuum mit positiver kosmologische Konstante) gleicht und eine Reflexionseigenschaft am Horizont für harte Gammastrahlung besitzt.

2.9 2001

- ◇ Gravitationsforschern am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (dem Albert-Einstein-Institut, AEI) in Golm gelingt erstmals die **Simulation einer Kollision zweier Schwarzer Löcher** (*Alcubierre et al.* 2001). Dieses Projekt basiert auf einem internationalen Netzwerk von Supercomputern und der Verwendung des Cactus Codes. Die aufwendige Simulation zeigt, dass das kollabierende Binärsystem Gravitationswellen emittiert. Die Schwarzen Löcher umkreisen sich auf immer enger werdenden Bahnen und verschmelzen schließlich in einer finalen Kollision zu einem einzigen Loch. Mit dieser Simulation weisen die Theoretiker der Gravitationswellenastronomie den Weg, denn noch sind diese 'Erschütterungen der Raumzeit' nie direkt beobachtet worden.

- ◇ *Pawel O. Mazur* und *Emil Mottola* greifen die Ideen von *Chapline et al.* auf, erweitern sie und finden Ende 2001 eine Alternative zu den klassischen Schwarzen Löchern: *ohne Singularität und ohne Horizont*: Sie nennen diese Objekte Gravasterne. Die Gravastern-Metrik ist in bisheriger Form noch kugelsymmetrisch und entspricht im Außenraum der Schwarzschild-Lösung. Der Innenraum ist materiefrei, entspricht jedoch einer de-Sitter-Blase, also einer Ansammlung Dunkler Energie (Diese Substanz ist verwandt mit der kosmischen Dunklen Energie, die für die beschleunigte Expansion des Universums sorgt). In der Übergangsregion zwischen Schwarzschild-Vakuum und Blase aus Dunkler Energie befindet sich eine dünne Schale aus einem Bose-Einstein-Kondensat. Dies und hauptsächlich das Reservoir Dunkler Energie ist die Quelle des Gravitationsfeldes eines Gravasterns. Der ästhetische Reiz dieser Lösung besteht darin, dass sie **ohne zentrale Singularität** auskommt. Eine Verallgemeinerung der Gravastern-Lösung auf rotierende, d. h. axialsymmetrische Formen steht noch aus.

2.10 2002

- ◇ Das Instrument BATSE auf dem Hochenergiesatellit *Compton Gamma Ray Observatory* (CGRO) sammelt große Datenmengen vieler Gammastrahlenausbrüche. Trägt man die Anzahl beobachteter Gammablitze über ihre Dauer auf, zeigt sich überraschenderweise eine bimodale Verteilung (*Dermer et al.* 2002). Es gibt **zwei Arten von Bursts**: kurzzeitige, die kürzer sind als etwa zwei Sekunden und sogar nur wenige Millisekunden dauern können und langzeitige Ausbrüche, die deutlich länger dauern, typischerweise bis zu etwa 1000 Sekunden. Die Astrophysiker spekulieren über unterschiedliche, physikalische Entstehungsmechanismen. Bei den kurzzeitigen GRBs nimmt man an, dass kompakte Objekte (z. B. die Komponenten eines Doppelsterns) miteinander verschmelzen. Bei den langzeitigen GRBs, auch Hypernovae genannt, favorisieren die Astronomen den Gravitationskollaps eines besonders massereichen Sterns, der eine noch gewaltigere Explosion verursacht, als eine Supernova. In beiden Szenarien bildet sich höchstwahrscheinlich ein stellares Schwarzes Loch. Mit anderen Worten: Bei der Beobachtung eines GRBs wohnt man der Entstehung eines Schwarzen Loches bei!
- ◇ Die Simulationen der Akkretionsflüsse namens NRAF erreichen durch die Forschungsarbeiten von *Steven A. Balbus* und *James Hawley* ein neues theoretisches Regime: Nun ist es möglich die resultierenden Ströme unter den Einflüssen der Magnetohydrodynamik und eines *Paczynski-Wiita-Potentials* zu studieren. Beide Erweiterungen kommen den Verhältnissen bei realen Akkretionsflüssen um Schwarze Löcher deutlich näher.
- ◇ Es gibt 2002 eine schwache Evidenz für **massereiche Schwarze Löcher** in den Zentren von Kugelsternhaufen. Sie sollen gerade Massen zwischen stellaren und supermassereichen Schwarzen Löchern aufweisen und damit die bisher beobachtete 'große Massenlücke' füllen. Weitere Untersuchungen müssen folgen.
- ◇ Ende 2002 entdecken Röntgenastronomen des MPE Garching im ULIRG NGC 6240 zum ersten Mal ein **doppeltes supermassereiches Schwarzes Loch** (*Komossa et al.* 2002). Dieses doppelte Schwarze Loch (engl. *binary black hole*) speist einen doppelten AGN (engl. *binary AGN*).

2.11 2003

- ◇ Die Infrarotastronomen des MPE Garching beobachten weiterhin das Zentrum der Milchstraße, diesmal allerdings mit dem leistungsfähigen Very Large Telescope (VLT). Die Sternbewegungen deuten nun auf ein schwereres Schwarzes Loch von etwa 3 Mio. Sonnenmassen hin (*Genzel et al.*, 2003). Blitze im Nahinfrarotbereich (*NIR flares*) legen sogar den Verdacht nahe, dass das **superschwere Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße rotiert** (Kerr-Parameter von etwa $a \sim 0.52$). Diese Beobachtung ist die bis dato beste gefundene Evidenz für die Rotation eines Schwarzen Loches! Hinweise auf die Loch-Rotation bei anderen Quellen, z. B. im Rahmen der Röntgenemissionsliniendiagnostik bei aktiven Galaxien und Röntgendoppelsternen sind deutlich weniger evident und schwächer zu bewerten.
- ◇ Die theoretischen Astrophysiker *Jean-Pierre De Villiers* und *John Hawley* schaffen 2003 einen Durchbruch in der Akkretionsphysik Schwarzer Löcher: Sie stellen die ersten Resultate einer längeren, stabilen Simulation eines **strahlungslosen Akkretionsflusses (NRAF) im Regime der idealen Magnetohydrodynamik auf der Kerr-Geometrie** vor! Sie lösen damit die Frage, wie eine magnetisierte Flüssigkeit in ein rotierendes Schwarzes Loch fällt auf dem Computer. Im gleichen Jahr gelingt das auch einer anderen Forschergruppe um *Charles F. Gammie*.
- ◇ Der deutsche Physiker *Michael Petri* stellt 2003 eine weitere neue Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen vor, die eine **Alternative zum klassischen Schwarzschild-Loch** ist: den Holostern. Die Außenzone der Raumzeit ist wiederum identisch mit der Schwarzschild-Lösung; im Unterschied zum Gravastern ist das Innere eines Holosterns angefüllt mit radialen Strings! Die Strings sind allerdings nur eine mögliche Interpretation des Holosterninnern von vielen. Mit anderen Worten: Sollten die Stringtheorien falsifiziert werden, ist nicht automatisch das Holostern-Modell falsifiziert. Holosterne haben keinen Horizont und keine Singularität - das rückt sie in das Interesse der modernen Physik, denn vielleicht kann so das Innere Schwarzer Löcher unter dem Blickwinkel der modernen Physik verstanden werden.

Zusammenfassend stehen nun drei nicht rotierende Varianten eines Schwarzen Loches zur Verfügung: Schwarzschild-Loch, Gravastern und Holostern. Sie sind mit den heute verfügbaren technischen Mitteln der beobachtenden Astronomie nicht unterscheidbar!

- ◇ Röntgenastronomen des MPE Garching nutzen den europäischen Röntgensatellit XMM-Newton, um den guten Kandidaten für ein supermassereiches Schwarzes Loch bei Sgr A* zu untersuchen (*Aschenbach et al.*, 2004). Das Resultat im hochenergetischen Bereich der Strahlung bestätigt die Masse von etwa 3 Mio. Sonnenmassen, weist aber auf eine deutlich höhere **Lochrotation am theoretischen Limit**, $a = 0.99$, hin. Diese Interpretation folgt aus der Analyse der Spektren von Röntgenblitzen, die sich in unmittelbarer Nähe zum Loch ereignen. Was da blitzt, ist bislang unklar (Instabilitäten im Akkretionsfluss? Sterne?).
- ◇ Der Astrophysiker *Andrea Merloni* und Kollegen entdecken eine **Fundamentalebene der Aktivität Schwarzer Löcher**, die eine Korrelation zwischen Lochmasse, Röntgen- und Radioleuchtkraft offen legt. Die Fundamentalebene eignet sich zur Abschätzung

unbekannter Parameter, vor allem der Lochmasse und der Akkretionsrate auf das Loch, aus Beobachtungsgrößen.

2.12 2004

- ◇ Röntgenastronomen des MPE Garching machen erneut eine spektakuläre Entdeckung in Verbindung mit Schwarzen Löchern: Im Februar 2004 ist klar, dass der **Zerriss eines Sterns** unter der verheerenden Wirkung von Gezeitenkräften eines supermassereichen Schwarzen Loches beobachtet wurde (*Komossa et al.*, 2004). Dieses Szenario macht sich als charakteristischer **Röntgenflare** bemerkbar, der mindestens einige Monate andauert. Das Objekt, in dem das entdeckt wurde, ist eine elliptische Galaxie mit der Bezeichnung RX J1242-1119 in einer Entfernung von etwa 210 Mpc (kosmologische Rotverschiebung von $z = 0.05$).
- ◇ *Stephen W. Hawking* gibt auf der Konferenz GR17 in Dublin im Sommer 2004 bekannt, dass er eine vor 30 Jahren abgeschlossene Wette für verloren gibt. In der Wette ging es um die Frage, ob die **Information**, die mit der Materie in ein Schwarzes Loch fällt, vernichtet wird oder Bestand hat. *John Preskill*, Quantenphysiker und Freund von Hawking, geht von einem **Erhaltungssatz der Information** aus, d. h. auch in einem Schwarzen Loch bleibt die Information erhalten und kann möglicherweise bei der Zerstrahlung des Loches über Hawking-Strahlung wieder ins beobachtbare Universum gelangen. Hawking und sein langjähriger Freund und Kollege, der Relativist *Kip Thorne* hielten dagegen und plädierten für eine Vernichtung der Information im Loch. Wie gesagt, hat Hawking mittlerweile seine Meinung revidiert und die Wettschuld, eine Enzyklopädie zum Thema Baseball, eingelöst. Thorne hält die Wette noch. Hawking hat zwar in seinem Vortrag in Dublin erläutert, wie er physikalisch dieses **Informationsverlustparadoxons** (engl. *information loss paradox*) löst und was ihn zum Eingeständnis seines Fehlers bewogen hat - jedoch wurde zum einen diese Erklärung nur von wenigen Physikern verstanden und zum anderen enthält seine Beweisführung Punkte, die unter Experten umstritten sind. Eine präzise Darstellung des Sachverhalts in Form einer Publikation steht noch aus.
- ◇ Der Satellit Swift wird im November 2004 gestartet. Er wird die Beobachtungen und die Erforschung von Gamma Ray Bursts entscheidend voranbringen.
- ◇ *A. Merloni* erklärt das **antihierarchische Wachstum supermassereicher Schwarzer Löcher** durch ein Akkretionsmodell, in dem zunächst (bei hoher Rotverschiebung) effiziente Akkretoren (wie die Standardscheibe in Quasaren) dominieren und zu kleiner kosmologischer Rotverschiebung hin, die weniger effizienten Akkretoren (ADAFs in Seyfert-Galaxien) herausragen.

2.13 2005

- ◇ Die Röntgenastronomen verfügen über eine große Datenmenge aus Beobachtungen mit den Röntgensatelliten ROSAT, ASCA, XMM-Newton und Chandra, um eine Analyse der aktiven Galaxienkerne (AGN) durchzuführen. Sehr lang belichtete Aufnahmen, so genannte *Deep Fields*, erlauben auch die Beobachtung sehr weit

entfernter AGN bis zu einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 4$ (deren Strahlung bis zu uns etwa 12 Mrd. Jahre unterwegs war!). Diese Quellen können zum Teil auch optisch identifiziert und ihre kosmologische Rotverschiebung bestimmt werden. Sortiert man die Quellen nach ihrer Leuchtkraft und trägt ihre Anzahl in einem mitbewegten Volumen bestimmter Größe gegen die Rotverschiebung auf (Analyse der *Raumdichtenentwicklung*), so kann man Folgendes konstatieren: Die AGN hoher Leuchtkraft ('Quasare') haben ein Maximum in der Anzahldichte bei $z \sim 2$, wohingegen die AGN geringer Leuchtkraft ('Seyferts') erst bei z etwas kleiner als 1 ein Maximum aufweisen (*Hasinger, Miyaji & Schmidt* 2005). Offensichtlich sind die AGN hoher Leuchtkraft entwicklungsgeschichtlich früher entstanden als die AGN geringer Leuchtkraft!

Nun weiß man seit den 1960er Jahren, dass der Motor für die enorme AGN-Leuchtkraft Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch ist. Die Leuchtkraft ist wiederum über die Eddington-Relation mit der Masse des Schwarzen Loches verbunden. Das heißt: Der Befund einer deutlich früheren Entwicklung der leuchtkräftigsten AGN und damit schwereren Schwarzen Löcher spricht für ein **antihierarchisches Wachstum der supermassereichen Schwarzen Löcher** im Universum! Salopp formuliert: 'Erst waren die Großen da, dann kamen die Kleinen.' Ein Biologe würde sich über diese Aussage weniger wundern, als ein Astrophysiker...

- ◇ *Martin Bojowald* vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (alias AEI) in Golm publiziert im Jahr 2005 Arbeiten, die auf ein **Verschwinden von klassischen, echten Singularitäten der ART** hindeuten, wenn man die Methoden der Loop-Quantengravitation (LQG) verwendet. Diese quantisierte Gravitationstheorie vermeidet vermutlich nicht nur die Singularitäten der klassischen Schwarzen Löcher, sondern auch die des Urknalls!
- ◇ Die **Existenz von mittelschweren Schwarzen Löchern** (*intermediate mass black holes*) mit Massen zwischen 100 und einer Million Sonnenmassen ist auch im Sommer 2005 in der Fachwelt umstritten. Der Kugelsternhaufen G1 in der Andromedagalaxie scheint allerdings der beste Kandidat für ein Schwarzes Loch von 17000 Sonnenmassen im Zentrum des Haufens zu sein, wie kinematische Methoden ergeben haben (*Gebhardt et al.* 2005). Wenn dort tatsächlich ein massereiches Schwarzes Loch existiert, schließt sich die Frage an, wie es erzeugt wurde und sich entwickelt hat.
- ◇ Im August 2005 tagen etwa 120 Astronomen aus vierzig Ländern auf dem Symposium der Internationalen Astronomischen Union (IAU230) in Dublin zum Thema *Populationen hochenergetischer Quellen in Galaxien*. Nach wie vor ist die **Natur der ULXs** unklar und die Experten streiten darüber, ob es sich um stellare oder massereiche Schwarze Löcher handelt. Es ist durchaus denkbar, dass die recht einfache Definition eines ULXs, nämlich nur anhand eines Parameters, der Röntgenleuchtkraft, eine Klasse mit ganz unterschiedlichen Objekten enthält. So kann ein ULX ein stellares Loch in einem exotischen Akkretionszustand sein oder ein massereiches Loch, das mit etwa 10% der Eddingtonrate akkretiert - vielleicht auch etwas anderes? Die ULX-Forschung geht weiter, um diese seltsame neue Klasse hochenergetischer und leuchtkräftiger Quellen zu verstehen.

2.14 2006

- ◇ Astronomen entdecken immer mehr ULX-Kandidaten. Doch es bleibt unklar, ob ULXs stellare oder mittelschwere Schwarze Löcher oder beides sind.
- ◇ Das japanische Röntgenteleskop *SUZAKU* bereichert die Röntgenastronomie mit hochaufgelösten Spektren. Der Detektor erlaubt eine sehr hochaufgelöste Messung z. B. der Profile von Eisenlinien, die in unmittelbarer Nähe zu Schwarzen Löchern entstehen.
- ◇ Das Großprojekt COSMOS liefert eine Flut von Beobachtungsdaten eines kleinen Himmelsausschnitts in verschiedenen Wellenlängenbereichen: von Radio- bis Röntgenstrahlung. Es handelt sich um Tiefenfeldbeobachtungen oder Deep Fields. Vor allem die mit dem europäischen Teleskop XMM-Newton gemessene Röntgenstrahlung bildet direkt extrem weit entfernte, aktive, supermassereiche Schwarze Löcher ab.
- ◇ Das Infrarot-Weltraumteleskop Spitzer macht bei einer Tiefenfeldbeobachtung ein Foto der ersten Quellen - entweder die ersten, supermassereichen Sterne oder die ersten Schwarzen Löcher oder beides. Die Entfernung dieser Objekte beträgt etwa 13 Milliarden Lichtjahre!
- ◇ Die Zeitskalen in Röntgenlichtvariationen bezeugen Verwandtschaft von kleinen (stellaren) und großen (supermassereichen) Schwarzen Löchern (*McHardy et al.*, Nature 2006).

2.15 2007

- ◇ Bei der Auswertung von optischen und Röntgenbeobachtungen gelingt erstmals die **3D-Kartierung der Dunklen Materie** in einem Himmelsausschnitt (*Massey et al.*, Nature 2007). Die Bildung dieser Strukturen durch die Wirkung der Gravitation ist auch wesentlich für das Verständnis der kosmologischen Entwicklung supermassereicher Schwarzer Löcher.

3 Relativitätstheorie und Raumzeit

Eine erste adäquate mathematische Beschreibung Schwarzer Löcher gelingt mit der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) (engl. *General Relativity*, GR). Diese Theorie geht auf den vermutlich bekanntesten Physiker überhaupt zurück: *Albert Einstein* (1879 - 1955). Er entwickelte die berühmte Relativitätstheorie in zwei Teilen: der Speziellen und der Allgemeinen Relativitätstheorie. Einstein war nach seinem Physikstudium ab 1901 Patentbeamter in Bern und fand neben dieser Arbeit viel Zeit, um sich mit der theoretischen Physik zu beschäftigen. Ein wesentliches Interessengebiet war das Licht und so z. B. die Frage, was man bei einem gedanklichen 'Ritt auf einem Lichtstrahl' wahrnehmen würde. Diese harmlos anmutende Frage, konnte kein Physiker der damaligen Zeit angemessen beantworten. Die Suche nach einer Antwort dieses **Gedankenexperiments** mündete in die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) (engl. *Special Relativity*, SR). Die Grundpfeiler dieser Theorie veröffentlichte Einstein in der wissenschaftlichen Zeitschrift *Annalen der Physik* mit dem Titel *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* im Jahre 1905.

3.1 Bezugssysteme - Alles eine Frage des Standorts

Die SRT vergleicht die Messung von Ereignissen, die durch Orts- und Zeitkoordinaten festgelegt sind, in verschiedenen Bezugssystemen. Ein Bezugssystem ist ein Ort, von dem aus Beobachtungen beschrieben werden. Es ist jedoch nicht nur ein Bezugs- oder Referenzpunkt im Raum, sondern auch in der Zeit.

In der Relativitätstheorie sind sowohl räumliche, als auch zeitliche Angaben wichtig. Um ein Ereignis eindeutig festzulegen gibt man vier Werte an: drei Raumkoordinaten und eine Zeitkoordinate. Ein anschauliches Beispiel für diese vier Zahlen ist ein Termin: Sie gehen in eine bestimmte Straße (erste Raumkoordinate), zu einer bestimmten Hausnummer (zweite Raumkoordinate), in eine bestimmte Etage des Gebäudes (dritte Raumkoordinate) zu einer bestimmten Uhrzeit (die Zeitkoordinate). Diese 'Termine' heißen in der Relativitätstheorie *Ereignisse* oder *Weltpunkte*. Sie sind vierdimensional, weil sie durch vier voneinander unabhängige Zahlen eindeutig festgelegt werden können.

Findet nun ein Ereignis statt, so kann es von unterschiedlichen Beobachtern beschrieben werden. Wichtig ist in der Relativitätstheorie, wie sich der Beobachter relativ zum Ereignis bewegt. Es gibt einen ausgezeichneten Beobachter, der sich relativ zum Ereignis *nicht* bewegt. Dieser Beobachter befindet sich im so genannten **Ruhsystem**. Ein Beobachter, der sich relativ zum beobachteten Ereignis bewegt (was im Allgemeinen der Fall ist) hat zum Ereignis eine (möglicherweise konstante) Relativgeschwindigkeit oder eine Relativbeschleunigung. Diese *relativ bewegten Beobachter* befinden sich in einem so genannten **Laborsystem**.

Ein Beispiel, um die unterschiedlichen Bezugssysteme klar zu machen ist ein Flugzeug. Aus der Sicht eines Beobachters am Boden bewegt sich das Flugzeug. Dieser bodengestützte Beobachter ist also in einem Laborsystem. Die Besatzung und die Passagiere an Bord hingegen bewegen sich relativ zum Flugzeug *nicht*, weil sie ja mitfliegen. Sie befinden sich im Ruhsystem des Flugzeugs.

Einstein hat sich nun gefragt, wie man physikalische Beobachtungen aus der Sicht der verschiedenen Beobachter miteinander vereinen kann. Er hat erkannt, dass es mathematische Beziehungen zwischen den verschiedenen Beobachter gibt (die Lorentz-Transformationen), die es ermöglichen, die Beobachtungen zu vergleichen. Bleiben wir bei dem Beispiel des Flugzeugs, das deutlich langsamer fliegt, als sich das Licht durch das Vakuum bewegt. Die Beobachter können ihre Beobachtungen im Rahmen der klassischen Mechanik sehr gut vergleichen. Bei Geschwindigkeiten, die allerdings ähnlich groß sind, wie die Vakuumlichtgeschwindigkeit, funktioniert das nicht mehr. Dann benötigt man Einsteins Theorie und stellt mit Erstaunen fest:

Raum und Zeit sind relativ.

Verschiedene Bezugssysteme bewegen sich in der SRT relativ zueinander mit einer gleichförmig geradlinigen Geschwindigkeit. Dabei zeigt sich, dass in allen diesen Bezugssystemen (Inertialsystemen) die **Vakuumlichtgeschwindigkeit eine Konstante** ist. Die Vakuumlichtgeschwindigkeit oder Lichtgeschwindigkeit im leeren Raum wird in der Physik mit dem Buchstaben c symbolisiert, was schlicht auf die Tatsache zurückgeht, dass sie konstant (engl. *constant*) ist. Der Zahlenwert von c im Système Internationale ist laut *Committee on Data for Science and Technology CODATA* (2002)

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist eine (nach allem, was die Physiker heute wissen) universelle Naturkonstante. Zunächst war diese Konstanz ein Postulat Einsteins, d. h. eine Annahme oder Arbeitshypothese, mit der er versuchte eine konsistente, physikalische Theorie zu konstruieren. Mittlerweile ist diese Annahme vielfach in Experimenten bestätigt worden. Somit ist klar: Nicht alles ist relativ in der Relativitätstheorie - die Lichtgeschwindigkeit ist absolut!

3.2 Das Wesen der Relativität

Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit hat weitreichende Konsequenzen: Nehmen wir an, zwei Beobachter betrachten einen bewegten Gegenstand aus verschiedenen Bezugssystemen. Wenn die Lichtgeschwindigkeit eine Konstante ist, so müssen andere Größen variieren, damit beide Beobachter die Beobachtung korrekt physikalisch beschreiben. Es stellt sich heraus, dass das Postulat von der Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit in eine **Relativität der Zeit** (auch der Gleichzeitigkeit) und eine **Relativität der Länge** mündet. Die klassisch unverständlichen Effekte Zeitdilatation und Längenkontraktion sind Belege für die Relativität von Zeit und Länge. Dieses Wesen der Relativität gab der Relativitätstheorie ihren Namen. Die Zeit verlor damit ihren absoluten Charakter, den schon *Aristoteles* und später *Sir Isaac Newton* postulierten: Zeit ist eine relative Größe. Außerdem verlor die Zeit ihre Eigenständigkeit: Zeit und Raum hängen eng miteinander zusammen und bilden in der Relativitätstheorie ein Kontinuum, das so genannte **Raum-Zeit-Kontinuum**. Dieses Gebilde heißt auch einfach nur kurz Raumzeit. In der SRT ist dieses Kontinuum *flach*, d. h. ungekrümmt, und wird durch die Minkowski-Metrik beschrieben. Die Flachheit ist gerade eine Folge davon, weil die SRT eine Theorie im relativistischen Vakuum ist (d. h. der Energie-Impuls-Tensor verschwindet).

3.3 'E gleich m c Quadrat'

Die zentrale Gleichung der SRT und die wohl berühmteste Gleichung der Physik ist das **Masse-Energie-Äquivalent**. Als mathematische Gleichung lapidar geschrieben als

$$E = mc^2$$

Diese Gleichung findet sich in dem Papier *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*, ebenfalls publiziert in den *Annalen der Physik* im Jahr 1905 - in Einsteins Wunderjahr (*annus mirabilis*). Die Masse ist also eine Energieform, so wie Strahlungsenergie, Wärmeenergie oder kinetische Energie auch. Aber neben dieser Aussage gibt es eine weitere, wichtige Folgerung; aufgrund der Gültigkeit dieser Gleichung besitzt auch eine relativ in Ruhe befindliche Masse (Relativgeschwindigkeit null) eine nicht verschwindende **Ruheenergie**. Man liest ab, dass bereits sehr kleine Massen durch die enorme Zahl 'Lichtgeschwindigkeit im Quadrat' (etwa $10^{17} \text{ m}^2/\text{s}^2$) eine außerordentlich hohe Ruheenergie haben.

Der Begriff der Raumzeit wurde in der Allgemeinen Relativitätstheorie erweitert. Hier kann die vierdimensionale Mannigfaltigkeit, bestehend aus drei Raumdimensionen (Länge, Breite, Höhe) und einer Zeitdimension, *gekrümmt* sein. Das geschieht genau dann, wenn eine Form von Energie (Masse, elektromagnetische Strahlung, Staub etc.) vorhanden ist. Sie erzeugt eine gekrümmte Raumzeit. Physiker sagen: Energie (Masse) ist die Quelle der Gravitation. Die Krümmung wird gerade dort besonders groß, wo sich die Energie befindet. Die Einsteinschen Feldgleichungen geben nun einerseits Auskunft darüber, wo die Raumzeit Krümmungen aufweist und wie stark diese sind. Andererseits sagen die Gleichungen auch, wie sich die Krümmungen auf die Energie auswirken. Diese komplizierte, gegenseitige Kopplung von Raumzeit an Energie und Energie an Raumzeit steckt gerade im **komplizierten, nicht-linearen Charakter der Feldgleichungen**.

3.4 Tensoren

Die Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie kostete Einstein enorme Anstrengungen, wie man anhand des viel späteren Publikationsjahrs 1916 erahnen kann. Dies liegt am mathematischen Formalismus der Relativitätstheorie, der **Tensor-Rechnung**. Zwar findet dieser bereits in der SRT Anwendung, wird jedoch in der ART komplizierter und auch umfangreicher. Der Mathematiker *Marcel Grossmann* (1878 - 1936), Einsteins Freund und Kommilitone zur Zeit seines Physikstudiums an der ETH Zürich, lehrte ihn den Umgang mit Tensoren. Grossmann muss als wichtiger Mitbegründer der ART angesehen werden, denn er kannte die Arbeiten der folgenden Mathematiker:

- ◇ Die deutschen Mathematiker *Johann Carl Friedrich Gauß* (1777 - 1855) und *Georg Friedrich Bernhard Riemann* (1826 - 1866) entwickelten die Grundlagen der Differentialgeometrie.
- ◇ Ebenso kannte Grossmann die Literatur des deutschen Physikers und Mathematikers *Elwin Bruno Christoffel* (1829 - 1900), der die Tensoranalysis begründete und die nach ihm benannten Christoffel-Symbole einführte. Auf Basis seiner Arbeit entwickelten *Ricci-Curbastro* und *Levi-Civita* einen koordinatenfreien Zugang der Differentialrechnung.

- ◇ Der italienische Mathematiker *Gregorio Ricci-Curbastro* (1853 - 1925) arbeitete u. a. auf dem Gebiet der Differentialgeometrie, die er hauptsächlich zwischen 1884 und 1894 entwickelte.
- ◇ Sein Student, der italienische Mathematiker *Tullio Levi-Civita* (1873 - 1941) erweiterte die Tensorrechnung, behandelte 1887 die kovariante Ableitung (*Christoffel* folgend) und mit *Ricci* um 1900 die Differentialrechnung.

Tensoren sind Größen der Differentialgeometrie, die auf einer vierdimensionalen Mannigfaltigkeit definiert werden und bestimmten Transformationsgesetzen genügen. Die Skalare, Vektoren und Matrizen der Linearen Algebra sind ebenfalls Tensoren, allerdings niedriger Stufe. Die Differentialgeometrie kennt weit kompliziertere Tensoren, die immer als eine wohl definierte Anordnung von Zahlen und Funktionen geschrieben werden können. Die Tensoren der ART sind recht anschauliche Objekte, die mit einer physikalischen Größe, wie der Energie (Energie-Impuls-Tensor), der Raumkrümmung (Riemannscher Krümmungstensor) oder dem elektromagnetischen Feld (Maxwell-Tensor bzw. *Faraday-Tensor*) in Verbindung stehen. Die Raumzeit selbst, die Metrik, wird durch den *metrischen Tensor* beschrieben.

Die Schlüsseleigenschaft von Tensoren ist ihre **Koordinatenunabhängigkeit**, d. h. egal in welchem Koordinatensystem man sie formuliert: die physikalische Aussage, die sie machen, ist immer gleich.

Oft handelt es sich bei den physikalischen Größen der ART um Tensoren 2. Stufe, die man als 4×4 - Matrix (eine Anordnung von 16 Zahlen oder Funktionen in vier Spalten und vier Zeilen) schreiben kann und damit eine vertraute Gestalt bekommen. Physikalische Tensoren sind in der Regel symmetrisch. Für eine 4×4 - Matrix heißt das, dass nur 10 Komponenten (obere oder untere Dreiecksform) unabhängig sind, weil die anderen durch die Symmetrieeigenschaften festgelegt sind. Dies gilt auch für den **metrischen Tensor**, der alternativ auch durch das Linienelement beschrieben werden kann.

Die Allgemeine Relativitätstheorie ist in dem Sinne als *allgemein* zu verstehen, weil die relative Bewegung der Bezugssysteme zueinander (verglichen mit der SRT) verallgemeinert wird: die Inertialsysteme können gegeneinander **beschleunigt** werden. Ein fundamentales Postulat der ART ist das Äquivalenzprinzip. Es besagt, dass träge und schwere Masse äquivalent sind, d. h. dass es keinen Unterschied in der Bewegung macht, ob eine Masse beschleunigt wird (Trägheit) oder im Schwerfeld eines Körpers fällt (Schwere). Das *Eötvös-Experiment*, ein Aufbau einer Drehwaage mit beweglichen Massen an einem Torsionspendel, bestätigte dieses Prinzip im Rahmen der experimentellen Genauigkeit. Eine weitere glänzende Bestätigung des Äquivalenzprinzips, aber auch der ART an sich, ist die beobachtete Ablenkung von Strahlung im Schwerfeld von der Sonne und Planeten.

3.5 Revolutionäre Ansichten: Gravitation geometrisch betrachtet

Das Konzept der Allgemeinen Relativitätstheorie löste die alte, Newtonsche Sicht der Dinge ab, dass Gravitation die instantane (d. h. ohne Zeitverlust einhergehende) Vermittlung von Kräften zwischen Massen ist. Nach der ART ist die Gravitation eine **geometrische Eigenschaft der Raumzeit**, deren Vermittlung sich mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit ausbreitet. Die fundamentale Erkenntnis der ART lautet:

Energie krümmt die Raumzeit

oder als Tensor-Gleichung geschrieben

$$\mathbf{G}_{\mu\nu} = 8\pi \mathbf{T}_{\mu\nu}$$

Das ist die so genannte **Einsteinsche Feldgleichung** oder kurz **Einstein-Gleichung** in der Sprache der Physiker (Nicht etwa die zweifellos berühmtere Formel $E = mc^2$ ist unter Physikern mit 'Einstein-Gleichung' gemeint!) Die Einstein-Gleichung ist auch die wichtigere Gleichung.

Die Einstein-Gleichung steht hier sehr kompakt als eine einzige Gleichung, doch eigentlich sind das zehn! Die Einsteinschen Feldgleichungen sind aufgrund der Symmetrie der Metrik ein **System von zehn nicht-linearen, gekoppelten, partiellen Differentialgleichungen**.

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R$$

Auf der linken Seite steht der Einstein-Tensor $\mathbf{G}$, der gerade zweite Ableitungen der Metrik enthält; auf der rechten Seite steht der **Energie-Impuls-Tensor $\mathbf{T}$** , der die Materie beschreibt, z. B. Staub

$$\mathbf{T}^{\mu\nu} = \rho_0 u^\mu u^\nu,$$

ein ideales Fluidum,

$$\mathbf{T}^{\mu\nu} = (\rho_0 + p)u^\mu u^\nu - pg^{\mu\nu},$$

oder das elektromagnetische Feld

$$\mathbf{T}_{\mu\nu} = \frac{1}{4\pi}(-\mathbf{g}^{\kappa\lambda}\mathbf{F}_{\mu\kappa}\mathbf{F}_{\nu\lambda} + \frac{1}{4}\mathbf{g}^{\mu\nu}\mathbf{F}_{\kappa\lambda}\mathbf{F}^{\kappa\lambda}).$$

Im Vakuumfall, also in Abwesenheit von Materie, verschwindet der Energie-Impuls-Tensor

$$T_{\mu\nu} = 0.$$

Dies ist gerade für elektrisch ungeladene Schwarze Löcher realisiert. Daher nennt man sie **Vakuumlösungen der Einsteinschen Feldgleichungen**.

Es bleibt also das Problem, den Einstein-Tensor zum Verschwinden zu bringen. Es gibt bei dieser Aufgabe aus gekoppelten nicht-linearen, partiellen Differentialgleichungen keine direkte Lösungsmethode, die sofort **alle** Lösungen des Problems liefern könnte. Das unterscheidet partielle Differentialgleichungen von gewöhnlichen Differentialgleichungen. Aus diesem Grund wurden die Vakuumlösungen historisch nach und nach und eher zufällig und manchmal sogar mehrfach gefunden. In der **Numerischen Relativitätstheorie** gibt es mittlerweile Verfahren, um das Wiederentdecken einer bereits bekannten Lösung in möglicherweise anderen Koordinaten zu verhindern. So werden Anstrengungen unternommen die Lösungen der Feldgleichungen der Gravitation zu systematisieren. Im **Äquivalenzproblem** geht es darum zu entscheiden, ob zwei Metriken g und g' übereinstimmen. *A. Karlhede* hat diese Problematik entscheidend vorangebracht, indem er die Geometrien mit Basissystemen, dem sog. **Vierbein** (Tetrade), systematisierte. Heutzutage gehen diese theoretischen Forschungen an den Einstein-Gleichungen z. B. am Albert-Einstein-Institut (AEI) in Golm weiter. Solche Anstrengungen vermeiden, dass bereits bekannte Lösungen 'wiederentdeckt' werden, wie es bei der Schwarzschild-Lösung nachweislich mindestens zwanzigmal geschehen ist!

Die **Kopplungskonstante** entspricht im Système Internationale dem Produkt aus dem Achtfachen der Kreiszahl π ('Pi') mit der Gravitationskonstante G , geteilt durch

die Lichtgeschwindigkeit c in vierter Potenz. In den hier verwendeten geometrisierten Einheiten ($G = c = 1$) vereinfacht sich das zu 8π . Die Kopplungskonstante folgt notwendigerweise aus einem Korrespondenzprinzip: Im Grenzfall schwacher Gravitationsfelder und kleiner Geschwindigkeiten gegenüber der Lichtgeschwindigkeit muss die Einsteinsche in die Newtonsche Theorie übergehen. Dann kann man die Kopplungskonstante ableiten, indem man Einsteinsche Feldgleichungen mit der **Poisson-Gleichung** der Newtonschen Gravitationsphysik vergleicht.

3.6 Was die Welt im Innersten zusammenhält

Da schon die SRT zeigen konnte, dass Masse der Energie äquivalent ist, krümmt auch die Masse die Raumzeit. Mit dieser Erkenntnis lässt sich auch die zentrale Frage des Protagonisten in *Goethes Faust* beantworten:

Das, was die Welt im Innersten zusammenhält, ist die Welt selbst.

Denn die Begründung lautet, dass gemäß der ART die Materie der Erde selbst (repräsentiert durch den *Energie-Impuls-Tensor* $\mathbf{T}$, der rechten Seite der Feldgleichungen) Raum und Zeit (die Raumzeit oder Metrik, eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit, die in Form von Ableitungen im *Einstein-Tensor* $\mathbf{G}$ steckt, der linken Seite der Feldgleichungen) in der Umgebung der Erde so krümmt, dass ein selbstgravitierendes Objekt, die kugelige Erdmasse, resultiert. Alle irdische Energie bestimmt die Geometrie und zwar im relativistischen, aber auch direkten wörtlichen Sinn (*geos*, grch.: Erde, *metros*, grch.: Maß)!

3.7 Was tun mit der Feldgleichung?

Möchte man sich die Einsteinschen Feldgleichungen für den Vakuumfall in eine mehr einsehbare bzw. praktische Form bringen, so muss man lediglich die Definition des Einstein-Tensors kennen:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R.$$

Er ist nämlich gerade die Differenz aus Riemannschen Krümmungstensor

$$R^\kappa_{\lambda\mu\nu} = \partial_\mu \Gamma^\kappa_{\lambda\nu} - \partial_\nu \Gamma^\kappa_{\lambda\mu} + \Gamma^\sigma_{\lambda\nu} \Gamma^\kappa_{\sigma\mu} - \Gamma^\sigma_{\lambda\mu} \Gamma^\kappa_{\sigma\nu}$$

und dessen Verjüngung, der **skalaren Krümmung**, dem Ricci-Skalar

$$R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}.$$

Den Riemannschen Krümmungstensor erhält man wiederum aus einer Summe von partiellen Ableitungen der Christoffel-Symbole

$$\Gamma^\kappa_{\lambda\mu} = \left\{ \begin{matrix} \kappa \\ \lambda\mu \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2}g^{\kappa\nu}(\partial_\lambda g_{\nu\mu} + \partial_\mu g_{\nu\lambda} - \partial_\nu g_{\lambda\mu}).$$

Hier kommt nun die Verknüpfung zur Metrik, die eindeutig durch den **metrischen Tensor** oder dem Linienelement

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

festgelegt wird: die Christoffel-Symbole sind wiederum Summen aus Ableitungen von Komponenten des metrischen Tensors.

Die Konsequenz ist offensichtlich: der Einstein-Tensor ist grob gesagt eine Summe aus partiellen, zweiten Ableitungen des metrischen Tensors. Daher ist der metrische Tensor fundamental und legt alle Eigenschaften einer gekrümmten, vierdimensionalen **Raumzeit** fest.

3.8 Triviale Raumzeit der SRT

Der metrische Tensor in der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) wird durch die Minkowski-Metrik

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} = \text{diag}(+, -, -, -)$$

festgelegt und hat eine denkbar einfache Gestalt: die nicht-diagonalen Elemente des metrischen Tensors geschrieben als 4×4 - Matrix sind alle null. Auf der Diagonale stehen wiederum nur konstante Zahlen und keine koordinatenabhängigen Funktionen. In einer möglichen Konvention (+ - - -) steht zum Beispiel als zeitliche Komponente +1 und bei allen räumlichen Diagonalelementen -1 (man sagt auch die **Signatur der Metrik** sei -2). Das bedeutet demnach: alle Ableitungen (nach Zeit- und Raumkoordinaten) dieser konstanten Einträge sind null. Nach den obigen Ausführungen verschwinden damit zunächst die Christoffel-Symbole. Dann ist aber auch der Riemannschen Krümmungstensor null, und dessen Verjüngung, die skalare Krümmung auch. Die Relativisten umschreiben das so: **Die Raumzeit der SRT, der Minkowski-Raum, ist flach.**

Bei Schwarzen Löchern gilt das nur im asymptotischen Limit, d. h. wenn man sehr weit entfernt ist vom Schwarzen Loch. Die Schwarzschild-Lösung lautet in kontravarianter Form

$$g^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g^{tt} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g^{rr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g^{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g^{\phi\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/(1 - 2M/r) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1 - 2M/r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/(r \sin \theta)^2 \end{pmatrix},$$

und in kovarianter Form

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{tt} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{\phi\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(1 - 2M/r) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/(1 - 2M/r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix}.$$

Der kontravariante metrische Tensor der Kerr-Lösung lautet in Boyer-Lindquist-Form

$$g^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g^{tt} & 0 & 0 & g^{t\phi} \\ 0 & g^{rr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g^{\theta\theta} & 0 \\ g^{\phi t} & 0 & 0 & g^{\phi\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/\alpha^2 & 0 & 0 & -\omega/\alpha^2 \\ 0 & \Delta/\rho^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\rho^2 & 0 \\ -\omega/\alpha^2 & 0 & 0 & \frac{\alpha^2 - \omega^2 \tilde{\omega}^2}{\alpha^2 \tilde{\omega}^2} \end{pmatrix}$$

und kovariant

$$\mathbf{g}_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{tt} & 0 & 0 & g_{t\phi} \\ 0 & g_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{\theta\theta} & 0 \\ g_{\phi t} & 0 & 0 & g_{\phi\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha^2 + \omega^2 \tilde{\omega}^2 & 0 & 0 & -\omega \tilde{\omega}^2 \\ 0 & \rho^2 / \Delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho^2 & 0 \\ -\omega \tilde{\omega}^2 & 0 & 0 & \tilde{\omega}^2 \end{pmatrix},$$

wobei folgende Funktionen auftreten

$$\begin{aligned} \alpha &= \rho \sqrt{\Delta} / \Sigma, \\ \Delta &= r^2 - 2Mr + a^2, \\ \rho^2 &= r^2 + a^2 \cos^2 \theta, \\ \Sigma^2 &= (r^2 + a^2)^2 - a^2 \Delta \sin^2 \theta, \\ \omega &= 2aMr / \Sigma^2, \\ \tilde{\omega} &= \Sigma \sin \theta / \rho, \end{aligned}$$

die nur von Lochmasse M und spezifischem Drehimpuls $a = J/Mc$ des Lochs abhängen. Auch die Pendants mit elektrischer Ladung sind für Radien gegen unendlich **asymptotisch flach**.

In der Nähe des Schwarzen Loches werden die Krümmungen außerordentlich stark und divergieren sogar im Zentrum. In der zentralen Singularität ist die Krümmung unendlich! In dieser Krümmungssingularität sitzt die Quelle der Gravitation des Loches. Aber genau hier versagt auch die klassische Physik!

3.9 Schwarze Löcher sind relativistische Objekte

Schließen wir nun den Bogen von der Relativitätstheorie zu den Schwarzen Löchern: Schwarze Löcher sind Lösungen der Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Sofern sie keine elektrische Ladung tragen, sind sie Lösungen der Feldgleichungen im Vakuum. Die weit verbreitete, wissenschaftliche Lehrmeinung ist, dass die kosmischen Schwarzen Löcher elektrisch neutral sind und maximal nur durch zwei Eigenschaften charakterisiert sind: **Masse und Rotation**. Der wesentliche Typus eines Schwarzen Loches in der Astrophysik ist demnach die Kerr-Geometrie, die wir noch sehr detailliert im Verlauf dieses Aufsatzes besprechen werden. Die Kerr-Lösung ist ebenfalls eine Vakuum-Lösung. Mit anderen Worten: Setzt man die Metrik eines rotierenden Schwarzen Loches in die Einsteinschen Gleichungen ein, zeigt sich, dass der **Einstein-Tensor** (die 'linke Seite' der Feldgleichungen) verschwindet.

Schwarze Löcher sind **allgemein relativistische Objekte** und als solche nur korrekt mit der ART zu beschreiben. Man kann zwar den Horizontradius nicht rotierender Schwarzer Löcher auch mit den Mitteln der klassischen, Newtonschen Theorie ableiten, muss aber das korrekte Ergebnis als Zufall werten. Die Newtonsche Theorie versagt bei der Beschreibung rotierender Löcher. Neuere Theorien, die die ART weiterzuentwickeln suchen, wie die Stringtheorien und die Loop-Quantengravitation, erlauben auch eine Behandlung von Schwarzen Löchern unter Gesichtspunkten der modernen Physik.

Bei den kompakten Objekten der Astrophysik (Weißer Zwerg, Neutronenstern, Bosonenstern, Fermionenstern, Quarkstern etc.) im Allgemeinen und den Schwarzen Löchern im Speziellen, sind Materie bzw. Energie auf kleinstem Raum vereinigt. Daher ist die Krümmung der Raumzeit bei diesen Objekten besonders hoch. Anschaulich argumentiert ist die Krümmung am Horizont Schwarzer Löcher so hoch, dass die Lichtstrahlen auf das Innere

des Schwarzen Loches 'gebogen' werden. Die Trajektorien der Strahlung, die so genannten Nullgeodäten, zeigen auf die zentrale Singularität. In diesem Punkt (ohne Rotation) bzw. Ring (mit Rotation) steckt die gesamte Masse eines Schwarzen Loches! Die Schlüsselfrage ist, welcher Zustandsgleichung die Materie dort gehorcht. Im Rahmen der klassischen ART ist festzustellen, dass in diesem singulären Punkt der Raumzeit die Krümmung unendlich wird. Das belegt die Untersuchung von Krümmungsinvarianten wie dem Kretschmann-Skalar. Die hier angedeutete Diskussion zeigt somit die **Grenzen der Relativitätstheorie** auf und deutet auf eine übergeordnete Theorie hin, nach der bereits seit Jahrzehnten fieberhaft gesucht wird. Bisher ohne Erfolg! Aber mit entscheidenden Fortschritten erst in den letzten Jahren!

3.10 p.s.

Die relativistisch korrekte Antwort auf die Eingangsfrage (Einsteins Leitfrage der SRT), was man beim Ritt auf einem Lichtstrahl sehen würde lautet: **Nichts!** Oder anders gesagt: Photonen altern nicht! Der Lorentz-Faktor divergiert, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ($v = c$) wird, und die 'Dehnung des Zeitflusses' (Zeitdilatation) geht gegen unendlich, während die Verkürzung von Längenmaßstäben (Längenkontraktion) gegen null geht.

4 Die Schwarzschild-Lösung

Im gleichen Jahr, in dem *Albert Einstein* die Allgemeine Relativitätstheorie (ART, engl. *General Relativity*, GR) publizierte, wurde auch schon eine Lösung für den **Vakuumsfall**, also verschwindenden Energie-Impuls-Tensor, gefunden. Dieses rasche Auffinden einer Lösung erstaunte selbst Einstein, weil er nicht damit gerechnet hatte: die nicht-linearen Feldgleichungen erschienen ihm zu kompliziert.

4.1 äußere Schwarzschild-Lösung

Karl Schwarzschild (1873 - 1916), auf dem Foto 4.2 zu sehen, fand diese erste Lösung und veröffentlichte sie 1916 in der Publikation mit dem Titel *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie*. Heute kennt man diese Raumzeit unter dem Begriff **äußere Schwarzschild-Lösung**. Sie beschreibt das relativistische Gravitationsfeld eines Massenpunktes und ist die Metrik nicht rotierender, ungeladener Schwarzer Löcher. Der Massenpunkt mit Masse M ist ein idealisiertes Gebilde, weil seine gesamte Masse in einem beliebig kleinen Punkt komprimiert ist. Das Schwarze Loch vom Schwarzschild-Typ hat hier eine zentrale, punktförmige Krümmungssingularität. Anhand des ja href="images/intermed/lineelschw.jpg"»Linienelements (Gleichung zu Beginn) ist schnell abzulesen, dass die Metrik statisch und kugelsymmetrisch ist. In ja href="images/intermed/schwarzschild.jpg"»Matrixform hat der metrische Tensor der Schwarzschild-Geometrie eine sehr einfache Gestalt und ist wie der metrische Tensor der ja href="images/intermed/minkowski.jpg"»Minkowski-Metrik diagonal. Im Unterschied zu diesem sind die Einträge nicht konstant, sondern koordinatenabhängig und divergieren bei $r = 0$, in der zentralen Singularität.

Nach dem Birkhoff-Theorem ist jede sphärisch symmetrische Vakuum-Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen notwendigerweise statisch. Das gilt also im Speziellen für die äußere Schwarzschild-Lösung.

4.2 innere Schwarzschild-Lösung

Ebenfalls im Jahr 1916 veröffentlichte *Karl Schwarzschild* eine zweite Lösung der Einsteinschen Gleichung in dem Papier *Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus*

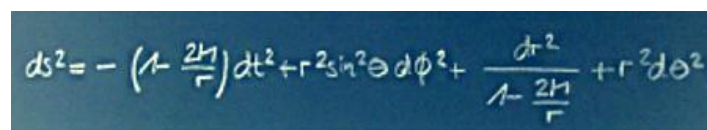

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2M}{r}} + r^2 d\theta^2$$

Abbildung 4.1: Das äußere Schwarzschild Linienelement.



Abbildung 4.2: Karl Schwarzschild.

inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie. Dies ist gerade die **innere Schwarzschild-Lösung**. Schwarzschild ersetzte den Massenpunkt der ersten Lösung durch eine Flüssigkeitskugel (siehe Abbildung 4.3). Die Kugel bestehe aus einer inkompressiblen Flüssigkeit mit zeitlich konstanter Massendichte. Dadurch ist es *keine Vakuumraumzeit* mehr, weil der Energie-Impuls-Tensor nun nicht mehr verschwindet. Trotzdem hat er eine relativ einfache Gestalt und ist diagonal. Die Flüssigkeitskugel hat einen endlichen Radius, an deren Oberfläche der Druck verschwindet. Außerhalb der Kugel entspricht die Metrik der äußeren Schwarzschild-Lösung, während innerhalb nun eine neue kugelsymmetrische Metrik *ohne Singularität* auftritt. Die globale sphärische Symmetrie ist demnach innerhalb und außerhalb der Kugel gegeben. Die innere Schwarzschild-Lösung ist jedoch nicht mehr statisch. Diese Aussage kollidiert nicht mit dem Birkhoff-Theorem, weil dieses Theorem nur für *Vakuum*-Lösungen der ART gilt.

4.3 Schwarzschilds Raumzeit in der Astronomie

Die Schwarzschild-Geometrie eignet sich, um in erster Näherung das Gravitationsfeld von Sternen relativistisch zu beschreiben. Während die äußere Schwarzschild-Geometrie das Feld außerhalb des Sterns beschreibt, gelingt mit der inneren Schwarzschild-Lösung sogar eine Umsetzung des inneren Feldes, unterhalb der Sternoberfläche. Man identifiziert also die Sternoberfläche mit der Kugeloberfläche der idealen, d. h. inkompressiblen Flüssigkeit. Die Einschränkungen eines solchen Sternmodells sind freilich die inkompressible Zustandsgleichung und die Tatsache, dass die Kugel nicht rotiert. In erster Näherung ist das eine gute theoretische Beschreibung für langsam rotierende Sterne. Deshalb wurde (und wird) die Schwarzschild-Lösung angewendet, um z. B. die Sonne zu beschreiben.

Heute kennt man in der **Theorie relativistischer Sterne** weitaus bessere Lösungen, die sogar schnell rotierende Neutronensterne (z. B. *Manko et al.*, 2000) und stark magnetisierte



Abbildung 4.3: innere Schwarzschild-Lösung: Gravitationsfeld einer idealen Flüssigkeitskugel.

Neutronensterne, die Magnetare, (*Ioka & Sasaki*, 2003) relativistisch korrekt beschreiben können.

Es sei nochmals betont, dass aufgrund der vorhandenen Singularität, nicht-rotierende Schwarze Löcher ausschließlich durch die *äußere* Schwarzschild-Geometrie repräsentiert werden.

4.4 Neue Einsichten durch geeignete Koordinatensysteme

Die Schwarzschild-Lösung kann in einer Vielzahl von **Koordinatensystemen** diskutiert werden. Historisch wurden von verschiedenen Autoren unterschiedliche Koordinatensysteme gefunden, die unter ihrem Namen bekannt geworden sind.

Der Astrophysiker *Sir Arthur Eddington* (1882 - 1944), einer der ersten Physiker, der nach Einstein die Relativitätstheorie begriff und der wertvolle Beiträge für die theoretische Astrophysik (Eddington-Leuchtkraft, Stellarphysik) lieferte, führte 1924 ein Koordinatensystem ein, das *David Finkelstein* 1958 wieder entdeckte. In diesen Eddington-Finkelstein-Koordinaten werden frei fallende Lichtteilchen (die Photonen der Quantenphysik) zugrunde gelegt, die den Nullgeodäten der Schwarzschild-Geometrie folgen. Für Licht verschwindet das Linienelement, weil sie sich auf dem Lichtkegel in Raumzeit-Diagrammen bewegen. In Eddington-Finkelstein-Koordinaten werden radiale Nullgeodäten zu Geraden. Man unterscheidet *avancierte Eddington-Finkelstein-Koordinaten*, die innerhalb des Ereignishorizontes bei $r = 2r_{mg} = 2GM/c^2$ nicht-pathologisch (d. h. geeignet) sind und *retardierte Eddington-Finkelstein-Koordinaten*, die für Geodäten außerhalb des Horizonts verwendet werden. Zur Beschreibung des stellaren, sphärisch symmetrischen Gravitationskollapses verwendete man traditionsgemäß avancierte (einlaufende) Eddington-Finkelstein-Koordinaten

$$v = t + r + 2M \log(r - 2M).$$

Dann lautet die Schwarzschild-Metrik in avancierter Eddington-Finkelstein-Form

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2M}{r}\right) dv^2 - 2dv dr - r^2 (d\vartheta^2 + \sin^2 \vartheta d\Phi^2).$$

Mittlerweile haben sich alternative, besser geeignete Koordinatensysteme hervorgetan, die auch Abstand von der sicherlich idealisierten Kugelsymmetrie nehmen.

Die Unzulänglichkeit von Eddington-Finkelstein-Koordinaten besteht offensichtlich darin, dass sie nicht global die Schwarzschild-Geometrie beschreiben. So suchte man ein Koordinatensystem, das sich in der gesamten Raumzeit gut ('nicht pathologisch') verhält und fand es in den **Kruskal-Szekeres-Koordinaten** (1960). Hier werden radiale und zeitliche Koordinate zugunsten der neuen Koordinaten für ein- und auslaufende, radiale Nullgeodäten aus den Eddington-Finkelstein-Koordinaten aufgegeben. Diese werden abermals mit Exponentialen korrigiert, um pathologisches Verhalten am Horizont auszuräumen. Schließlich wird dafür gesorgt, dass es keine Nullkoordinaten sind, sondern die neue radiale Koordinate vom Typ her raumartig und die neue Zeitkoordinate zeitartig bleibt. Dann erhält man die Kruskal-Szekeres-Koordinaten

$$\begin{aligned} u &= \sqrt{1 - \frac{r}{2M}} e^{\frac{r}{4M}} \sinh \frac{t}{4M} \\ v &= \sqrt{1 - \frac{r}{2M}} e^{\frac{r}{4M}} \cosh \frac{t}{4M} \end{aligned}$$

und das Linienelement der Schwarzschild-Lösung in Kruskal-Szekeres-Koordinaten

$$ds^2 = \frac{32M^3}{r} e^{-r/2M} (du^2 - dv^2) + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2).$$

Das Erstaunliche in diesem Koordinatensystem ist, dass man nun nicht mehr eine Singularität (definiert durch $r = 0$) hat, wie in den historischen Schwarzschild-Koordinaten, sondern **zwei Singularitäten**, fixiert durch die Bestimmungsgleichung $v^2 - u^2 = 1$. Ebenso korrespondieren zur asymptotisch flachen Region $r \gg 2M$ ($G = c = 1$) **zwei** solche Regionen, definiert durch $u \gg +|v|$ sowie $u \ll -|v|$. Diese seltsame Eigenschaft ist ein Hinweis darauf, dass die Schwarzschild-Lösung *nur ein Ausschnitt* einer größeren Mannigfaltigkeit ist! Daher sind die Kruskal-Szekeres-Koordinaten die **maximale analytische Fortsetzung** der Schwarzschild-Lösung, wie man in der Fachsprache sagt. Das bedeutet salopp gesagt, dass in diesen Koordinaten die größte Information über die Schwarzschild-Raumzeit steckt. In der Relativitätstheorie heißt die übergeordnete Mannigfaltigkeit, die die Schwarzschild-Lösung einschließt, die Kruskal-Lösung. Diese duale Struktur der Schwarzschild-Geometrie fand *J.L. Synge* bereits 1950, 10 Jahre vor Einführung der Kruskal-Szekeres-Koordinaten.

4.5 Wurmloch

Kommen wir noch einmal auf die beiden asymptotisch flachen Regionen der Kruskal-Lösung zurück: Weil die die Einstein-Gleichung der ART nur die lokale Geometrie der Raumzeit vorgibt, nicht jedoch deren globale Topologie, kann man die beiden asymptotisch flachen Regionen zu einer einzigen asymptotisch flachen Mannigfaltigkeit 'verbinden'. Dies nennt man auch ein Wurmloch vom Schwarzschild-Typ. In der Literatur kennt man das Schwarzschild-Wurmloch auch als Einstein-Rosen-Brücke.

4.6 Anti-Frame-Drag

Da die Schwarzschild-Lösung gewissermaßen ein Spezialfall der Kerr-Lösung ist (Kerr-Parameter $a = 0$), können viele Aussagen des nächsten Abschnitts auf die Schwarzschild-

Lösung bezogen werden. Von besonderem Interesse ist der Verlauf der Boyer-Lindquist-Funktionen sowie eine Re-Interpretation des Frame-Dragging-Effekts im Schwarzschild-Fall. Denn während eine rotierende Kerr-Raumzeit alles mitzieht (engl. *frame dragging*), muss eine statische Schwarzschild-Raumzeit alles zum Stoppen bringen am Horizont - einen Vorgang, den man als *Anti-Frame-Dragging* bezeichnen könnte.

5 Die Kerr-Lösung

Erst 1963 folgte eine weitere wesentliche Lösung der Einsteinschen Gleichungen mit neuen physikalischen Eigenschaften: die **Kerr-Lösung**. Sie beschreibt rotierende, elektrisch ungeladene Schwarze Löcher und wurde von dem neuseeländischen Mathematiker *Roy Patrick Kerr* gefunden (Papier: *Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics*, 1963). Das Bild 5.1 zeigt Roy Kerr in den 1970er Jahren und zu seinem 70. Geburtstag am Kerr-Fest 2004 in Neuseeland (*Fotos mit freundlicher Genehmigung von Roy Kerr*).

5.1 Kerrs Raumzeit in der Astronomie

Die Kerr-Geometrie ist von unschätzbarem Wert für die moderne, relativistische Astrophysik. Die Rotation des Loches ist dabei nicht nur natürlich, sondern sogar notwendig. Denn nur mit dieser theoretischen, rotierenden Lösung der Einstein-Gleichungen sind viele Effekte in der Nähe von Schwarzen Löchern zu verstehen. Zu diesen Effekten gehören die magnetohydrodynamische Erzeugung von Jets, die Quasi-periodischen Oszillationen bei stellaren Schwarzen Löchern, die relativistische Verbreiterung von Emissionslinien, der Lense-Thirring-Effekt in Akkretionsscheiben, der Frame-Dragging-Effekt, der Blandford-Znajek-Mechanismus und Penrose-Prozesse.

Nicht nur die Theorie kann bislang nicht auf rotierende Schwarze Löcher verzichten. Der Clou ist, dass es mittlerweile den Astronomen gelungen ist, in einigen Fällen die Rotation eines kosmischen Schwarzen Loches nachzuweisen! Zu diesen Kandidaten eines Kerr-Lochs gehört das uns nächste, superschwere Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße und einige kleinere, stellare Schwarze Löcher in Röntgendoppelsternen.

5.2 Symmetrien des Kerr-Vakuums

Kommen wir nun zur Diskussion der Eigenschaften der Kerr-Lösung, die gelegentlich auch *Kerr-Vakuum* genannt wird, weil es eine Vakuum-Raumzeit ist. Sie weist zwei Symmetrien auf: die zeitliche Symmetrie heißt *Stationarität* und kann so verstanden werden, dass sich die Struktur der Raumzeit mit der Zeit nicht weiter entwickelt ('keine explizite Zeitabhängigkeit'). Dennoch rotiert die Raumzeit. Die räumliche Symmetrieeigenschaft ist eine Achsensymmetrie (Axialsymmetrie), also eine Symmetrie zu einer Achse wie bei einem Zylinder. Um diese Symmetrieachse rotiert das Loch.

Die Symmetrieeigenschaften kann man mathematisch aus der *Killing-Gleichung* dieser Metrik extrahieren. Sie führt gerade auf zwei so genannte Killing-Felder. Jedes dieser Felder kann mit einer Erhaltungsgröße in Verbindung gebracht werden: die Stationarität bedingt eine Erhaltung der **Energie**, die Axialsymmetrie bedingt die Erhaltung des **Drehimpulses**. Die Verknüpfung von Symmetrien mit Erhaltungsgrößen ist in der Physik gerade die Aussage des *Noether-Theorems* (benannt nach der Physikerin *Emmy Noether*).



Abbildung 5.1: Roy Patrick Kerr.

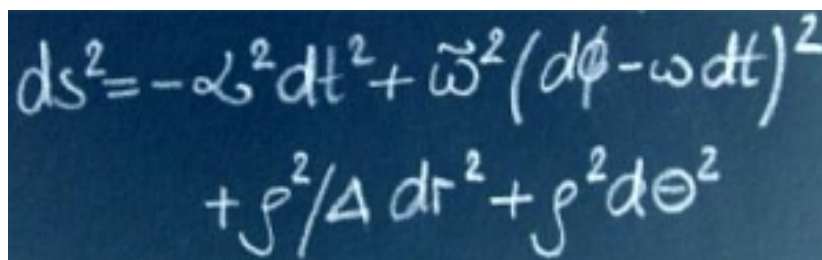

$$ds^2 = -\alpha^2 dt^2 + \tilde{\omega}^2 (d\phi - \omega dt)^2 + \rho^2/\Delta dr^2 + \rho^2 d\theta^2$$

Abbildung 5.2: Das Kerr Linienelement.

5.3 Eine rotierende Raumzeit

Das Linienelement ist in der ART eine Gleichung, die alle Eigenschaften einer Raumzeit festlegt. Im Linienelement stecken alle Komponenten des metrischen Tensors, die bei der betreffenden Koordinatenwahl nicht verschwinden. Eine Raumzeit kann immer in unterschiedlichen Koordinaten dargestellt werden, die in unterschiedlicher Ausprägung ein direktes, intuitives Verständnis der Eigenschaften der Raumzeit erleichtern können. Auch die Komplexität mathematischer Rechnungen mit Raumzeiten hängt von dieser Koordinatenwahl ab. Generell gilt in der Physik: Je besser die Koordinaten an die Symmetrie des Problems (hier: der Raumzeit) angepasst sind, umso einfacher die mathematische Behandlung.

Das Linienelement der Kerr-Metrik (Gleichung in Abbildung 5.2) ist komplizierter als im Schwarzschild-Fall und weist neue **Kreuzterme** auf. Mit Kreuztermen meint man Mischungen von Koordinaten in den metrischen Koeffizienten. Im Fall der Kerr-Lösung treten in Boyer-Lindquist-Koordinaten (einer Standardnotation der Kerr-Metrik) Mischungen zwischen der zeitlichen Komponente (t-Komponente) und der Azimutal-Komponente (Φ -Komponente) auf. Multipliziert man die Klammer im Linienelement aus, so findet man

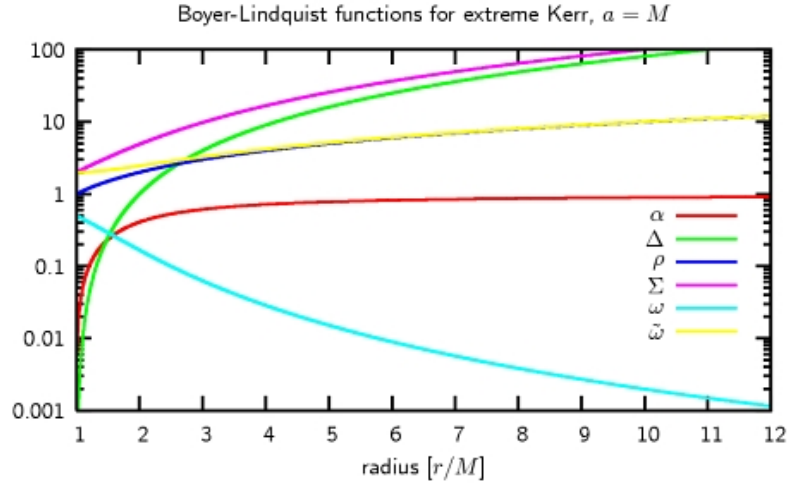


Abbildung 5.3: Radiales Verhalten der Boyer-Lindquist-Funktionen bei Maximum Kerr $a = M$.

den Kreuzterm mit $d\Phi dt$. Die Metrik geschrieben in Matrixform (siehe Gleichung ?? unten) ist also nicht diagonal und weist von Null verschiedene Nebendiagonalelemente auf. Physikalisch ist das mit der **rotierenden Raumzeit** zu begründen. Die Kreuzterme mit zeitlichen Komponenten weisen darauf hin, dass die Metrik nicht statisch ist. Das ist schnell nachzuvollziehen, indem man gleichzeitig eine t - und eine Φ -Spiegelung durchführt: dann ist die Kerr-Geometrie unverändert (invariant). Es muss also zu einer drehenden Gravitationsquelle gehören!

Roy Kerr hat historisch die Metrik dieser rotierenden, ringförmigen Gravitationsquelle in pseudo-kartesischen Koordinaten formuliert. Weil diese der Axialsymmetrie nicht angepasst sind, sieht die Metrik dann deutlich komplizierter aus, wie die historische Form der Kerr-Lösung belegt

$$ds^2 = dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 - \frac{2Mr^3}{r^4 + a^2z^2} \left(dt - \frac{1}{r^2 + a^2} [r(xdx + ydy) + a(xdy - ydx)] - \frac{z}{r} dz \right)^2.$$

Allerdings kann man die Ringsingularität (dazu später) geeignet im pseudo-kartesischen System ableiten.

5.4 Boyer-Lindquist-Koordinaten - Die Standarddarstellung

Eine Standarddarstellung rotierender Schwarzer Löcher ist die **Boyer-Lindquist-Form**. Diese Koordinaten sind pseudo-sphärisch und der Symmetrie deutlich besser angepasst. In dieser Darstellung werden eine Reihe typischer Funktionen verwendet, die auch oben im Linienelement der Kerr-Geometrie zu finden sind:

$$\begin{aligned} \alpha &= \rho \sqrt{\Delta} / \Sigma, \\ \Delta &= r^2 - 2Mr + a^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho^2 &= r^2 + a^2 \cos^2 \theta, \\
 \Sigma^2 &= (r^2 + a^2)^2 - a^2 \Delta \sin^2 \theta, \\
 \omega &= 2aMr/\Sigma^2, \\
 \tilde{\omega} &= \Sigma \sin \theta / \rho.
 \end{aligned}$$

Diese Notation wurde Ende der 1960er Jahre gefunden (siehe Historie). Das radiale Verhalten der Boyer-Lindquist-Funktionen in der Äquatorialebene (der Poloidalwinkel θ ist $\pi/2$, also 90°) und im Falle eines maximal rotierenden Schwarzen Loches $a = M$ zeigt das Diagramm 5.3. Auf der Symmetrieachse der rotierenden Raumzeit (dort gilt $\theta = 0$) gibt es in Boyer-Lindquist-Form eine Koordinatensingularität. Eine weitere, schlimmere Koordinatensingularität gibt es am (äußeren) Ereignishorizont: Die Lapse-Funktion α und das Delta-Potential Δ werden beide am (inneren **und** äußeren) Horizont null. Das ist nämlich gerade die Definition eines Horizonts. Deshalb divergiert die Komponente $\mathbf{g}_{rr}$ des metrischen Tensors am Horizont. Beide Koordinatensingularitäten des Boyer-Lindquist-Koordinatensystems lassen sich beheben, wenn man Kerr-Schild-Koordinaten verwendet. Der metrische Tensor der Kerr-Geometrie in Kerr-Schild-Form weist zwar mehr nicht-verschwindende Komponenten (mehr Nebendiagonalelemente) auf, bleibt aber konvergent. Der kovariante metrische Tensor in Kerr-Schild-Form lautet

$$\begin{aligned}
 \mathbf{g}_{\mu\nu} &= \begin{pmatrix} g_{tt} & g_{t\phi} & g_{tr} & 0 \\ g_{\phi t} & g_{\phi\phi} & g_{\phi r} & 0 \\ g_{rt} & g_{r\phi} & g_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{\theta\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z-1 & -za \sin^2 \theta & z & 0 \\ -za \sin^2 \theta & \tilde{\omega}^2 & -a(1+z) \sin^2 \theta & 0 \\ z & -a(1+z) \sin^2 \theta & 1+z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho^2 \end{pmatrix} \\
 \mathbf{g}^{\mu\nu} &= \begin{pmatrix} g^{tt} & g^{t\phi} & g^{tr} & 0 \\ g^{\phi t} & g^{\phi\phi} & g^{\phi r} & 0 \\ g^{rt} & g^{r\phi} & g^{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g^{\theta\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(z+1) & 0 & z & 0 \\ 0 & 1/\tilde{z} & a \sin^2 \theta / \tilde{z} & 0 \\ z & a \sin^2 \theta / \tilde{z} & \frac{z^2 a^2 \sin^4 \theta - (z-1) \tilde{\omega}^2}{\tilde{z}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\rho^2 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

wobei folgende, neue Funktionen enthalten sind

$$\begin{aligned}
 z &= 2r/\rho^2 \\
 \tilde{z} &= \tilde{\omega}^2 - (z+1)a^2 \sin^4 \theta.
 \end{aligned}$$

Das wird im Wesentlichen durch die neue Funktion z gewährleistet (Quelle: *S.S. Komissarov* 2004). Kerr-Schild-Koordinaten sind komplexer, aber nicht komplizierter, vor allem verhalten sie sich 'gutartig' an den Horizonten.

Im Schwarzschild-Fall koinzidiert der **innere Horizont** mit der zentralen Singularität bei $r = 0$. Bei maximaler Rotation eines Schwarzen Loches vom Kerr-Typ ($a = -M$ oder $a = M$) koinzidieren innerer und äußerer Horizont und liegen bei einem Gravitationsradius. Das ist die bereits angesprochene, verbotene sichtbare Singularität. Für Zwischenwerte von a liegt der innere Horizont immer innerhalb des äußeren Horizonts.

Physikalisch bedeutet verschwindendes Delta-Potential, dass hier gerade die Rotverschiebung unendlich wird! (Hier nicht zu verwechseln mit der kosmologischen Rotverschiebung.) Strahlung aus diesem Bereich unterliegt dem Effekt der Gravitationsrotverschiebung und wird stark unterdrückt. Astronomisch macht sich diese Unterdrückung auf zweierlei Weise bemerkbar: Einerseits verliert die Strahlung Energie und wird röter; andererseits wird auch der Strahlungsfluss unterdrückt, d. h. weniger Strahlung (eine geringere Anzahl von Photonen) erreicht den Beobachter.

5.5 Im Schlepptau des rotierenden Lochs

Ein interessanter Umstand ist, dass das rotierende Schwarze Loch am Horizont alles, Materie, Licht, Magnetfelder, Beobachter etc. zwingt in seine Umlaufrichtung und mit gleicher Winkelgeschwindigkeit zu rotieren. Das verwundert nicht, denn das Loch *ist* die Raumzeit selbst, die rotiert. Dieses 'Mitschleppen von Objekten und des Bezugssystems' bezeichnen Relativitätstheoretiker mit dem englischen Fachbegriff **frame dragging** (engl. *frame*: Bezugssystem; *to drag*: ziehen). Es kann deshalb auch keine statischen Beobachter mehr nahe am Kerr-Loch geben. Das passende Beobachtersystem, das man dann in der Kerr-Metrik verwendet, nennt man den *Bardeen-Beobachter* oder das lokal nicht rotierende Bezugssystem (engl. *locally non-rotating frame*, LNRF) wie es *James Bardeen* selbst nannte. Heute sprechen die Experten meist vom ZAMO-System, für **Z**ero **A**ngular **M**omentum **O**bserver. Dieser Beobachter rotiert mit der Raumzeit/mit dem Schwarzen Loch mit, deshalb verschwindet sein Drehimpuls (engl. *angular momentum*) lokal.

Das Symbol ω bei den Boyer-Lindquist-Funktionen bezeichnet die **Frame-Dragging-Frequenz**: Man erkennt, dass sie kurz vor dem Horizont stark ansteigt. Daran kann man sehen, dass die Rotation der Raumzeit im Bereich innerhalb der so genannten Ergosphäre wichtig und sehr hoch wird. Die Ergosphäre beginnt *bei jedem Kerr-Loch* in der Äquatorialebene bei einem Radius von $r = 2M$, also dem **Schwarzschild-Radius**. **Ergoregion** heißt der Bereich zwischen äußerem Horizont und Ergosphäre. Die Ergoregion ist eine an den Polen abgeplattete, sphäroide Region um den exakt kugelförmigen Horizont und markiert gerade die Grenze, ab der die raumzeitliche Rotation dominant wird. Mathematisch definiert man die Ergosphäre durch das Verschwinden der 00 -Komponente (oder tt -Komponente) des metrischen Tensors. Die Zeitkoordinate t ändert an der Ergosphäre ihr Verhalten: Außerhalb ist sie zeitartig und innerhalb wird sie raumartig.

Der ZAMO rotiert nun aus dem Unendlichen betrachtet exakt mit dieser Winkelfrequenz ω . Sendet er einen Lichtblitz aus, propagiert ein Teil des Lichts in positive und der andere Teil in negative Richtung des Azimutwinkels Φ . Nur der ZAMO - und nur er - wird dann die getrennten Lichtblitze nach ihren Umläufen um das Loch exakt gleichzeitig bei sich empfangen. Andere Beobachter werden eine Verzögerung messen. Dieselbe Diskussion kann man für den Schwarzschild-Fall (keine Rotation, $a = 0$) wiederholen. Die Abbildung 5.4 zeigt, dass das Verhalten der einzelnen Funktionen sehr ähnlich ist, wie im Kerr-Fall, nur dass der Horizont nun doppelt so groß ist und bei $r_H = 2 r_g$, dem Schwarzschildradius, liegt. Die Funktionen ρ und ω mit $\sim$ sind im Schwarzschild-Fall identisch und liegen aufeinander (blaue und gelbe Kurve). Es gibt jedoch eine wesentliche Ausnahme: **das Drehimpulspotential ω bleibt konstant null**, weil es proportional zu a ist. Das bedeutet, dass aufgrund des Frame-Dragging-Effekts jede Rotation am Horizont des Schwarzschild-Loches stoppen muss! Diese Bedingung wird rotierender Materie in einer Akkretionsscheibe durch die statische Raumzeit auferlegt. Man kann sie als **Anti-Frame-Drag** bezeichnen. Bei Computersimulationen von Akkretionsflüssen in Pseudo-Newtonschen Potentialen (Potentiale, die den relativistischen Schwarzschild-Fall nachahmen) muss diese Bedingung extra berücksichtigt werden. In voll relativistischen Simulationen ist sie hingegen automatisch enthalten.

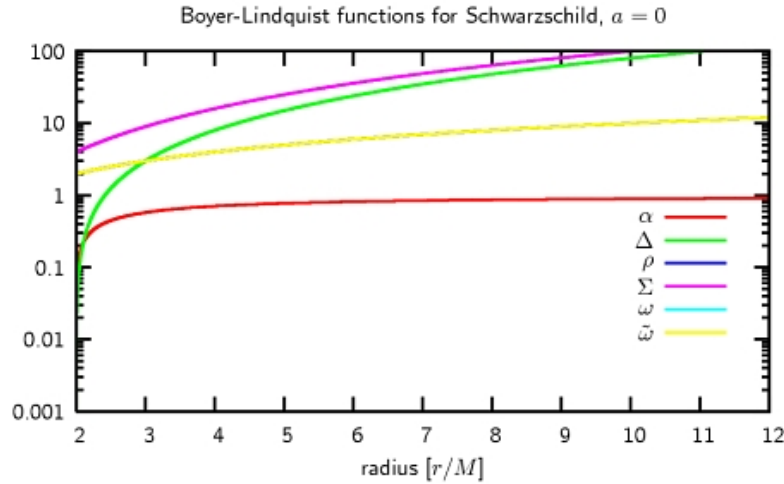


Abbildung 5.4: Radiales Verhalten der Boyer-Lindquist-Funktionen bei Schwarzschild $a = 0$.

5.6 Kerr-Löcher als Materieschleuder

Der Frame-Drag ist in der Magnetohydrodynamik (MHD) Schwarzer Löcher von besonderer Relevanz. Denn Magnetfelder in der Akkretionsscheibe werden durch *frame dragging* mitgezogen und verstärkt. Die Winkelfrequenz Ω , mit der die Raumzeit am Ereignishorizont $r = r_H$ rotiert, ist gegeben durch diese Gleichung

$$\Omega_H \equiv \omega(r_H^+) = \frac{a}{2Mr_H^+} = \frac{a}{r_H^{+2} + a^2}.$$

Anschaulich werden global poloidale Magnetfelder in der Nähe von Kerr-Löchern verdreht (*Torsion*). Die Feldlinien werden zusammengequetscht und in Rotation versetzt. Die Folge ist, dass die Magnetfeldstärke signifikant erhöht wird! Astrophysiker sprechen in diesem Zusammenhang vom **ergosphärischen Dynamo**, weil der magnetische Dynamo-Effekt in der Ergoregion eines rotierenden Loches stattfindet. Bei einem Schwarzschild-Loch funktioniert das nicht! Durch diesen Effekt werden bereits vorhandene Magnetfelder verstärkt und die Magnetfeldstruktur wird dominant toroidal ('schlauchartig'). Auch die Dynamik solcher Magnetfelder ist ein interessantes Studienobjekt, denn das rotierende Loch treibt eine Form magnetischer Wellen, also ein räumlich und zeitlich variables Magnetfeld. Diese sogenannten **Alfvén-Wellen** pflanzen sich durch die Raumzeit fort. Die magnetische Struktur, die ein schnell rotierendes Loch nach außen treibt heißt **torsionaler Alfvén-Wellenzug** (engl. *Torsional Alfvén Wave Train*, TAWT). Es handelt sich um eine MHD-Welle, die sich etwa entlang der Rotationsachse des Schwarzen Loches bewegt und dabei Plasma mitreißt. Ihre Geschwindigkeit, die Alfvén-Geschwindigkeit, hängt von der Umgebungsdichte ab: In einem dichteren Medium wird diese MHD-Welle langsamer, in einem dünneren wird die magnetische Welle beschleunigt.

Der TAWT-Mechanismus ist ein sehr effizienter Vorgang, der Plasma aus der unmittelbaren Umgebung des Kerr-Loches nach außen befördert. Das funktioniert so effizient, dass der Ausfluss relativistische Geschwindigkeiten erreichen kann. In einigem Abstand können

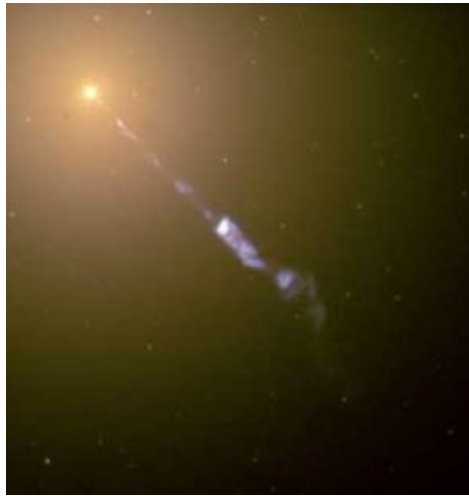


Abbildung 5.5: HST-Foto der aktiven Galaxie M87 mit Jet.

magnetische Nachbeschleunigungseffekte auftreten, die den Lorentz-Faktor signifikant steigern können (Das beobachten Astronomen auch in anderen Systemen - ohne Loch - in den Pulsarwinden, z. B. beim Crab-Pulsar.). Eine gute physikalische Größe, die diesen magnetisch getriebenen Ausfluss parametrisiert, ist der Poynting-Fluss. Dabei handelt es sich um einen elektromagnetischen Energiefluss, für den sowohl mit, als auch ohne Relativitätstheorie die mathematischen Ausdrücke beschafft werden können. Die im historischen Abriss angedeuteten MHD-Simulationen auf dem Hintergrund eines rotierenden Loches im Jahr 2002 wurden in der Folgezeit genauer analysiert. Dabei zeigte sich, dass ein trichterförmiger Ausfluss entlang der Rotationsachse des Loches nur dann effizient durch den Poynting-Fluss getrieben werden kann, wenn das Loch sehr schnell rotiert, $a \sim 0.99$ (Krolik *et al.* 2004 sowie spätere Arbeiten). Wir werden an diese Diskussion im nächsten Kapitel über Akkretion anknüpfen.

Soweit die Theorie - dass das etwas mit der Natur zu tun hat, belegt eindrucksvoll das Bild 5.5. Es zeigt eine optische Fotografie der aktiven Galaxie M87 im Sternbild *Virgo* (dt. *Jungfrau*), aufgenommen mit dem Weltraumteleskop Hubble (Credit: AURA/STScI/NASA 2000). Die helle Punktquelle links oben ist der aktive Kern der Galaxie, wo Astronomen eine hohe, kompakte Masse von gewaltigen drei Milliarden Sonnenmassen nachgewiesen haben. Das wird als **supermassereiches Schwarzes Loch** interpretiert, das über Akkretion für die enorme Aktivität der Galaxie sorgt. Die Aktivität ist nicht nur an der gleißend hellen Punktquelle erkennbar; M87 erzeugt auch einen gigantischen Materiestrahl, der im Bild ebenfalls als bläulich-weißer Strahl zu sehen ist. Das ist ein spektakuläres Beispiel eines **Jets**, der aus einem Aktiven Galaktischen Kern (AGN) heraus geschossen wird. Die Astronomen kennen davon viele Beispiele, die sie in den unterschiedlichsten AGN-Typen, vor allem in Quasaren, Blazaren und Radiogalaxien beobachten. AGN-Jets sind großskalige Plasmaströme aus dem Herzen aktiver Galaxien. Sie erreichen unglaublich hohe Distanzen vom Kern und erstrecken sich dann bis auf die kpc- oder Mpc-Skala. D.h. das Plasma wird aus dem Kerngebiet bis Entfernungen von Millionen von Lichtjahren beschleunigt! (Zum Vergleich: Unsere Milchstraße hat einen Durchmesser von etwa 100000 Lichtjahren.)

Das im letzten Absatz beschriebene **theoretische Szenario der magnetische getriebenen Jets** favorisieren die Astrophysiker als Entstehungsmechanismus für

relativistische AGN-Jets. Das bedeutet, dass das *schnell rotierende* supermassereiche Schwarze Loch, die Ursache für beinahe lichtschnelle Materieströme ist. Das heißt auch, dass der winzige Zentralbereich des AGN, nämlich die Ergoregion - die innersten zwei Gravitationsradien! - eine enorme Aktivität produzieren, die nicht nur weithin als kosmisches Leuchtfeuer zu sehen ist, sondern auch als gigantische, astronomisch beobachtbare Materiestrahlen zutage tritt.

Jets werden aber auch bei stellaren Quellen beobachtet und z. B. in abgeschwächter Form von Protosternen oder ebenfalls bei kompakten Objekten wie Weißen Zwergen, Neutronensternen oder stellaren Schwarzen Löchern in die Umgebung geschleudert. Ohne Schwarzes Loch ist die Physik der Jetentstehung eine andere (u. a. Blandford-Payne-Szenario) - wichtig ist in jedem Fall die Akkretion, weil sie die Materie zum Katapult befördert. Die Wechselwirkung von Akkretionsscheibe und kompakten Objekt treibt die Jets nach außen. Die Jets, die in der Umgebung Schwarzer Löcher erzeugt werden, sind besonders schnell - beinahe lichtschnell. Es sind relativistische Jets. Bei den extragalaktischen Makro-Jets der AGN und auch bei den Mikro-Jets von (stellaren) Mikroquasaren, Mikroblazaren und Gamma Ray Bursts (GRBs) werden relativistische Jets magnetisch getrieben! Wesentliche Zutaten für den Prozess sind eine schnell rotierende Raumzeit und Magnetfelder.

Welche Bedeutung haben Jets für den *kosmischen Materiekreislauf*? Jets reichern schließlich durch ihre Ausbreitung das interstellare und intergalaktische Medium mit Materie an und sorgen für eine kräftige Durchmischung. Somit sind Jets auf allen Längenskalen für eine gleichmäßige Verteilung der Metalle mit verantwortlich. Aus diesem 'Materialmix' können durch Gravitationskollapse (gravitative Instabilitäten) wieder neue Sterne höherer Metallizität entstehen. Jets spielen im 'kosmischen Recycling' eine wichtige Rolle bei der Durchmischung und Verteilung chemischer Elemente, die in der stellaren Nukleosynthese, Roter Riese und in Supernovae erzeugt werden. Und wer weiß: Vielleicht war die jetgetriebene Durchmischung auch eine Voraussetzung für die Entstehung des irdischen Lebens... Diese Hypothese rückt die Rolle Schwarzer Löcher in ein neues Licht. Schwarze Löcher sind keine fernen 'Materieschlucker', die uns egal sein können - sie haben etwas mit uns und unserem Dasein zu tun!

5.7 Bewegungen um den rotierenden Raumzeit-Schlund

Genauso wie die Planeten im Sonnensystem um die Sonne kreisen, gibt es auch **stabile Keplerbahnen** um ein Schwarzes Loch. Mit anderen Worten: Schwarze Löcher verschlingen *nicht* alles; wenn ein Körper genug Drehimpuls besitzt, kann er am dunklen Abgrund unbehelligt seine Kreise ziehen. Es gibt neben diesen stabilen Orbits aber auch instabile Bahnen. Im Prinzip gibt es fünf Möglichkeiten für die Bewegung eines Teilchens mit Drehimpuls in der Umgebung eines rotierenden Schwarzen Loches:

- ◇ i) Das Teilchen fällt direkt aus dem Unendlichen in das Schwarze Loch.
- ◇ ii) Das Teilchen wird aus dem Unendlichen eingefangen und fällt nach einigen Umläufen in das Schwarze Loch.
- ◇ iii) Das Teilchen beschreibt eine stabile Kreisbahn (mit konstantem Radius) um das Schwarze Loch.

- ◊ iv) Das Teilchen beschreibt eine elliptische Bahn mit einer Periastron-Drehung um das Schwarze Loch.
- ◊ v) Das Teilchen entkommt dem Schwarzen Loch, weil es genug Energie hat bzw. der Abstand ('Stoßparameter') sehr groß ist.

Diese Überlegungen macht man sich leicht am Potentialverlauf klar (wie im Lexikon bei der marginal stabilen Bahn diskutiert wird). Die Diskussion läuft analog zum Newtonschen Fall, nur dass man verallgemeinerte effektive Potentiale der Kerr-Geometrie benutzen muss. Analytisch behandeln Relativisten die Teilchenbewegungen (Materieteilchen oder Lichtteilchen - Unterschied: Ruhemasse) mit der **Geodätengleichung**. Eine Lösung dieser Gleichung auf der Kerr-Geometrie führt zu den Geodäten für Materieteilchen und den **Nullgeodäten** für Strahlung. Numerisch nutzen die Theoretiker dabei die Erhaltungsgrößen aus: neben den klassischen, konservativen Größen Masse, Energie und Drehimpuls existiert - und das nur ganz speziell in der Kerr Metrik! - eine vierte Erhaltungsgröße: die **Carter-Konstante**. *Brandon Carter* fand diese Größe 1968 (Papier: *Global structure of the Kerr family of gravitational fields*) aus der Separabilität der Hamilton-Jacobi-Gleichung. Die Carter-Konstante ist mit dem radialen und poloidalen Impuls (des Materie- oder Lichtteilchens) assoziiert.

5.8 Licht in der Kerr-Metrik

Mit diesem Satz aus vier Erhaltungsgrößen lässt sich die Geodätengleichung sehr einfach integrieren. Die Geodätengleichung ist eine Differentialgleichung zweiter Ordnung, die nach dem Existenz- und Eindeutigkeitssatz eine eindeutige Lösung besitzt: die Bahn des Materieteilchens oder Photons. Die Simulationen mit Kerr-Ray-Tracern zeigen, dass die Lichtteilchen nicht nur durch den klassischen **Doppler-Effekt**, sondern auch durch relativistische Effekte stark beeinflusst werden. Diese vollkommen neuen Effekte heißen:

- ◊ **Beaming** - ein Effekt der Speziellen Relativitätstheorie - sorgt für eine Kollimation der Strahlung in Bewegungsrichtung des Emitters und für eine Blauverschiebung. Dieses Phänomen wurde auch in Teilchenbeschleunigern entdeckt, wo relativistische, geladene Teilchen eine scharf in Bewegungsrichtung gebündelte Strahlung abgeben: die Synchrotronstrahlung (benannt nach dem Typus des Teilchenbeschleunigers, einem Synchrotron). In der Umgebung Schwarzer Löcher rotiert das Plasma außerhalb der marginal stabilen Bahn in der Regel Keplersch in einer geometrisch dünnen Standardakkretionsscheibe. Beaming bewirkt nun, dass der Teil der Scheibe, der auf den Beobachter zu rotiert heller wird, während der andere Teil der Scheibe, der vom Beobachter wegrotiert in der Helligkeit unterdrückt ('weggebeamt', aber nicht im Sinne von Scotty) wird.
- ◊ Gravitationsrotverschiebung sorgt vor allem nahe am Ereignishorizont für eine Verschiebung der Wellenlänge der Strahlung zum roten, niederenergetischen Ende hin. Auch der Strahlungsfluss, also die Intensität der Strahlungsquelle, wird unterdrückt. Ursache ist die starke Gravitation des Schwarzen Loches, gegen die die Photonen ankämpfen müssen. Um überhaupt dem Einflussbereich des Loches zu entkommen, verlieren die Photonen viel Energie. Dieser Effekt reduziert jede Emission am Horizont

$$\Omega = \omega + \frac{\alpha^2}{\omega^2} \frac{\lambda}{1 - \omega\lambda}$$

Abbildung 5.6: Winkelgeschwindigkeit in der Kerr-Metrik.

besonders stark! Man sagt: um das Schwarze Loch bildet sich ein '**Schatten**' aus (wenn der Vergleich auch etwas hinkt). Eine angemessene Bezeichnung ist 'Dunkler Fleck'.

Die Gleichung in Grafik 5.6 zeigt, wie man allgemein relativistisch korrekt die **Winkelgeschwindigkeit** in der Kerr-Metrik berechnet. Dieser Ausdruck ist ganz fundamental und gilt immer in der Kerr-Geometrie. Man sieht die Abhängigkeit von den Boyer-Lindquist-Funktionen (ω mit $\sim$ heißt 'Zylinderradius') und von dem Verhältnis der Erhaltungsgrößen Drehimpuls L und Energie E eines einfallenden Materieteilchens oder Photons, das in der Literatur häufig mit λ bezeichnet wird. Es ist der spezifische Drehimpuls des Teilchens. Die Winkelgeschwindigkeit wird am Horizont gerade ω , weil - wie aus dem Diagramm oben ersichtlich - α am Horizont null wird. Das ist gerade der bereits besprochene Frame-Dragging-Effekt: das Loch zwingt **alles** mit dem Horizont zu rotieren! Kurz notiert: $\Omega = \omega$.

Auf Keplerbahnen kann man für die Größen E und L (also auch λ) feststehende Ausdrücke ableiten, die nur von der Masse des Schwarzen Loches, dessen Rotationszustand (parametrisiert mit a) und dem Radius der Kreisbahn abhängen. Diese Ausdrücke gehen für große Radien in den Newtonschen Grenzfall über.

Man unterscheidet bei der Winkelgeschwindigkeit bzw. bei Kreisbahnen um ein Schwarzes Loch zwei Möglichkeiten: bei **prograden Orbits** rotiert das Teilchen (oder der Stern etc.) mit dem Schwarzen Loch in die gleichen Umlaufrichtung; bei **retrograden Orbits** entsprechend gegenläufig. Dies macht in den Gleichungen nur Vorzeichenunterschiede bei einigen Termen aus.

Stabile Kepler-Rotation auf Kreisbahnen ist nur bis zur marginal stabilen Bahn (Gleichung 5.1) möglich. Dies gab gerade diesem charakteristischen Radius um ein Schwarzes Loch seinen Namen. Für kleinere Radien ist keine stabile Rotation mehr möglich und das Teilchen wird im freien Fall in das Schwarze Loch fallen, am Drehimpulsfall reflektiert (wenn es genügend Drehimpuls hat) oder den Bereich des Schwarzen Loches wieder verlassen (wenn es genügend Energie hat). Bis zur marginal stabilen Bahn kann man somit die Formel für Ω vereinfachen: Man erhält dann die bekannte Winkelfrequenz für Keplerbahnen

$$\Omega_K(r) = \pm \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{r^3 \pm a\sqrt{M}}}$$

+ : prograd
- : retrograd.

Alle Werte für die Winkelgeschwindigkeit, die überhaupt angenommen werden dürfen, liegen im farbigen Bereich der Abbildung 5.7: die obere Kurve ist gerade die prograde

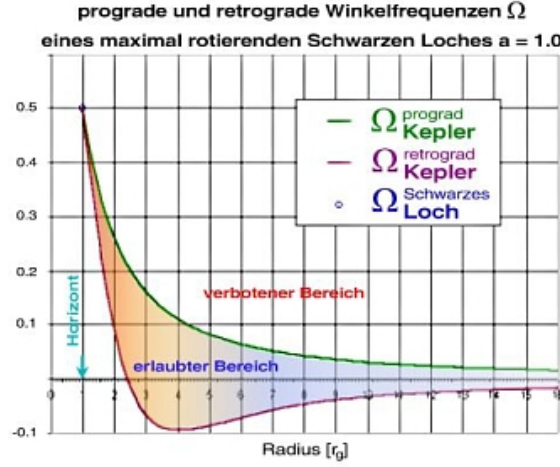


Abbildung 5.7: prograde und retrograde Winkelgeschwindigkeit für Maximum Kerr.

Winkelgeschwindigkeit, die untere Kurve die retrograde Winkelgeschwindigkeit. Der Bereich außerhalb dieser Kurven ist *physikalisch verboten*, weil hier das Geschwindigkeitsfeld nicht mehr global zeitartig ist.

Keplersche Rotation ist auf Basis der Gleichungen für die verschiedenen Radien an sich bis zum äußeren Horizont möglich, weil in den Extremfällen $a = -M$ bzw. $+M$ alle charakteristischen Radien bei M (erinnere $G = c = 1$) liegen:

$$\begin{aligned} r_H &= M + \sqrt{M^2 - a^2} \\ r_H(a = 1) &= M \\ r_H(a = 0) &= 2M \equiv R_S. \end{aligned}$$

Beide Horizonte, die marginal stabile Bahn, die marginal gebundene Bahn und der Photonenorbit fallen zusammen (nur die Ringsingularität bleibt im Zentrum des Lochs wie die Krümmungsinvarianten belegen). Doch muss dieser Extremfall unter besagten Einschränkungen des Kerr-Parameters gesehen werden. Vermutlich gibt es einen oberen Grenzwert für den Kerr-Parameter von etwa 0.99. Das Diagramm, das weiter unten folgt, zeigt die Abhängigkeit der charakteristischen Radien eines rotierenden Schwarzen Lochs vom Kerr-Parameter.

5.9 Ringsingularität und Ergosphäre - Neue Strukturen in der Kerr-Lösung

Ein wesentlicher Unterschied zwischen rotierenden und nicht rotierenden Schwarzen Löchern ist, dass beim Kerr-Typus die intrinsische Punktsingularität durch die Ringsingularität in der Äquatorebene ersetzt wird. Die Auswertung der Krümmungsinvarianten wie dem Kretschmann-Skalar zeigt, dass die Krümmung der Raumzeit immer bei $r = 0$ divergiert, also unendlich wird. Die Krümmungssingularität bleibt am gleichen Ort, ändert aber ihren Typus. In der Kerr-Geometrie ist ein singulärer Massenstrom, der in einem unendlich dünnen Ring fließt, die Quelle des rotierenden Gravitationsfeldes. a nennt man den Rotations-, Spin-

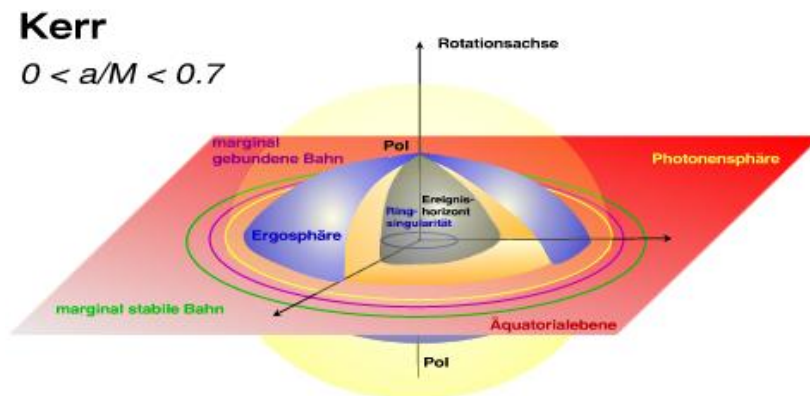


Abbildung 5.8: Morphologie eines rotierenden Schwarzen Lochs: Orbits, Horizont, Ergosphäre und Singularität.

oder **Kerr-Parameter**, der den Drehimpuls des rotierenden Loches festlegt: $a = 0$ bedeutet keine Rotation (also Schwarzschild), a kleiner null (retrograd) bzw. a größer null (prograd) sind rotierende Kerr-Lösungen. Der Typus der Singularität folgt der globalen Symmetrie der Raumzeit: die kugelsymmetrische Schwarzschild-Metrik hat eine Punktsingularität, die achsensymmetrische Kerr-Metrik hat eine Ringsingularität.

Außerdem gibt es in der Kerr-Metrik ein abgeplattetes Gebiet, das man **Ergosphäre** nennt. Sie liegt dicht am äußeren Horizont und hat eine Berandung, die vom Poloidalwinkel abhängt: An den Polen des maximal rotierenden Kerr-Loches fällt sie mit dem Horizont zusammen und steigt mit dem Kosinus des Poloidalwinkels bis auf 2 Gravitationsradien (also einem Schwarzschildradius) in der Äquatorebene an. Diese Begrenzung in der Äquatorebene ist *unabhängig vom Rotationszustand* des Schwarzen Loches und heißt **statisches Limit**: Im Schwarzschildfall gibt es keine Ergosphäre, denn hier fällt die Berandungsfläche mit dem Horizont zusammen. Akkretionsscheiben, die im Bereich zwischen ein und zwei Gravitationsradien existieren, nennt man **ergosphärische Scheiben**. Teilchen können in der Ergosphäre **negative Energien** annehmen. Auf diese Weise wäre es zumindest theoretisch möglich dem Schwarzen Loch Energie zu entziehen: Man schießt ein Teilchen in die Ergosphäre hinein, lässt es dort zerfallen. Nun muss man dafür sorgen, dass das Teilchen, das negative Energie trägt ins Loch fällt, während das andere die Ergosphäre wieder verlässt und aufgefangen wird. Auf diese Weise hätte man Energie aus dem Loch gewonnen. Diesen Mechanismus nennt man Penrose-Prozess. Die Astrophysiker stellen sich heute vor, dass die Makro-Jets Aktiver Galaktischer Kerne in der Ergosphäre Energie erhalten und so ein elektromagnetischer Energiefluss, Poynting-Fluss genannt, unmittelbar vor dem Horizont des rotierenden Schwarzen Loches getrieben wird, der den Jet nach außen elektromagnetisch beschleunigt. Die Astrophysiker sagen, dass **relativistische Jets magnetisch getrieben** sind (Details dazu auch in meiner Doktorarbeit). Die Abbildung 5.8 zeigt die **Morphologie Schwarzer Löcher**, hier der allgemeine Fall eines Kerr-Loches. Nähert man sich von außen diesem Objekt, so stößt man zunächst auf den Radius marginaler Stabilität (grüner Orbit). Dieser Abstand markiert den kleinstmöglichen Abstand, bei dem noch eine stabile Rotation um das Schwarze Loch möglich ist. Also gibt es für Radien kleiner als den für marginale Stabilität keine stabilen Kreisbahnen mehr. Kommt das Objekt näher heran, muss es entweder

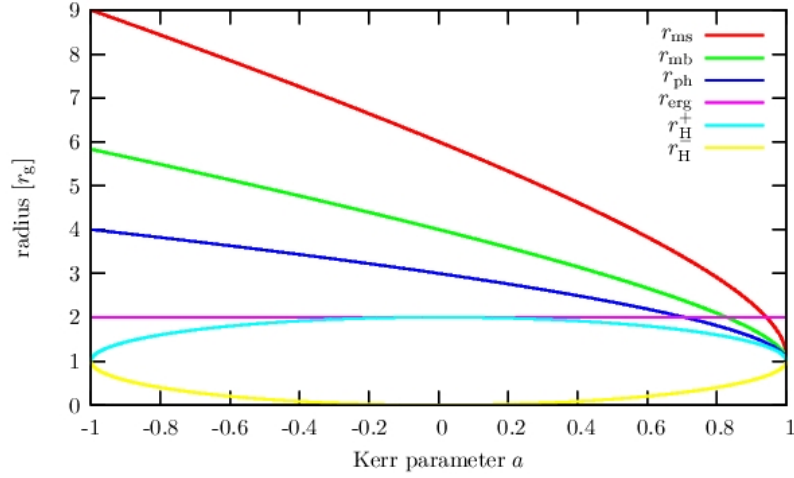


Abbildung 5.9: Charakteristische Radien eines Schwarzen Lochs in Abhängigkeit vom Kerr-Parameter a .

in das Schwarze Loch fallen oder auf einer ungebundenen Bahn verlassen.

Die marginal gebundene Bahn hingegen schließt sich weiter innen an (violetter Orbit). Dies ist der charakteristische Abstand, bei dem ein Testteilchen, das im Unendlichen ruhend erscheint, gerade an der Schwelle ist, um vom Schwarzen Loch angezogen zu werden.

Kurz vor dem (äußeren) Ereignishorizont, findet man die Photonensphäre (gelbe Kugelschale und Orbit): an diesem charakteristischen Radius können Photonen im Prinzip beliebig lange umlaufen, allerdings nur, wenn sie mit geeigneter Richtung auf diesen Orbit eingeschossen werden. Allerdings ist der Orbit instabil.

Dann schließt sich die oben beschriebene Ergosphäre an.

Die Morphologie ist im Wesentlichen für Kerr-Löcher mit a größer als 0.7 dieselbe, allerdings ragt der Photonenradius dann in die Ergosphäre hinein; ab a gleich 0.83 wandert auch der Radius für marginale Bindung in die Ergosphäre und schließlich ab einem Kerr-Parameter a von 0.94 auch der Radius für marginale Stabilität.

Sämtliche **charakteristische Radien Schwarzer Löcher** wurden in ihrer Abhängigkeit vom Kerr-Parameter a , der die Rotation des Schwarzen Loches parametrisiert, in der Abbildung 5.9 dargestellt. Die Radien heißen:

- ◇ Radius marginaler Stabilität r_{ms} ,
- ◇ Radius marginaler Bindung r_{mb} ,
- ◇ Photonenradius r_{ph} ,
- ◇ Radius der Ergosphäre r_{erg} (auch: statischen Grenze r_{stat})
- ◇ äußerer Horizontradius r_H^+ ,
- ◇ und innerer Horizontradius r_H^- .

Üblicherweise ist a eine positive Größe, dann spricht man von *prograder Rotation*, was bedeutet, dass der Drehsinn des rotierenden Schwarzen Loches mit einem umlaufenden

Testteilchen oder z. B. der Akkretionsscheibe übereinstimmt. Dies entspricht also dem rechten Teil der Abbildung. Nimmt man hingegen für a negative Werte an, so handelt es sich um *retrograde Rotation*: Scheibe und Loch rotieren gegenläufig. Während Horizont, statisches Limit und auch die Ringsingularität **unabhängig vom Vorzeichen von a** sind (Symmetrie zur Vertikalen durch $a = 0$ in der Abbildung), hängen Radius marginaler Stabilität, Radius marginaler Bindung und Photonenradius **stark vom Umlaufsinn ab**. Retrograd ist demnach der Bereich links in der Abbildung. Besonders wichtig wird das beim Radius marginaler Stabilität, angewandt in der Akkretionstheorie, wo ein gegenläufig rotierendes Loch die Standardscheibe (die Keplerrotation bis r_{ms} aufweist) weit nach außen drückt: im Extremfall, $a = -M$, auf 9 Gravitationsradien!

Wie außerdem leicht zu erkennen ist, gilt **immer**, dass der Radius marginaler Stabilität

$$\begin{aligned} r_{\text{ms}} &= M \left(3 + Z_2 \mp \sqrt{(3 - Z_1)(3 + Z_1 + 2Z_2)} \right) \\ Z_1 &= 1 + \left(1 - \frac{a^2}{M^2} \right)^{1/3} \left(\left(1 + \frac{a}{M} \right)^{1/3} + \left(1 - \frac{a}{M} \right)^{1/3} \right) \\ Z_2 &= \sqrt{3 \frac{a^2}{M^2} + Z_1^2} \end{aligned} \quad (5.1)$$

außen liegt, sich dann der marginal gebundene Orbit

$$r_{\text{mb}} = 2M \mp a + 2\sqrt{M}\sqrt{M \mp a} = \left(\sqrt{M} + \sqrt{M \mp a} \right)^2$$

und die Photonensphäre

$$r_{\text{ph}} = 2M \left[1 + \cos \left(\frac{2}{3} \arccos(-a/M) \right) \right]$$

anschließen, bis schließlich der Ereignishorizont

$$r_{\text{H}}^+ = M + \sqrt{M^2 - a^2}$$

ganz innen liegt. Noch weiter innen, verhüllt vom inneren Horizont, dem Cauchy-Horizont,

$$r_{\text{H}}^- = M - \sqrt{M^2 - a^2}$$

befindet sich die **Ringsingularität**. Hier unterscheiden sich rotierende und nicht rotierende Schwarze Löcher eklatant, denn im Kerr-Fall wird die zentrale Punktsingularität zu einem (unendlich dünnen) Ring 'aufgeblasen'. Die Ringsingularität liegt in der Äquatorebene. Im Schwarzschild-Fall, $a = 0$, der genau in der Mitte der Abbildung liegt, kollabiert die Ringsingularität zu einer Punktsingularität, bleibt jedoch bei $r = 0$. Die intrinsischen Singularitäten der Schwarzen Löcher sind gerade die Quellen des Gravitationsfeldes der Vakuumlösungen der Einsteinschen Feldgleichungen.

Die **maximal rotierenden Schwarzen Löcher**, $a = +M$, haben die verblüffende Eigenschaft, dass *alle* charakteristischen Radien (bis auf den der Ergosphäre bzw. des statischen Limits) zusammenfallen, nämlich beim Radius $r = 1 r_g$! Aufgrund der kosmischen Zensur sind diese extremen Formen der Kerr-Lösung verboten. Wie die Abbildung zeigt, geht die gegenseitige Annäherung der charakteristischen Radien eines Kerr-Loches relativ glatt mit variablem Kerr-Parameter vonstatten (es gibt keine Sprünge/Unstetigkeiten der Radien

als Funktion von a). Die Ergosphäre, also der Bereich negativer Energien, hat in diesem Fall (und ebenso für $a = -M$) ihr maximales Volumen, das Loch hingegen seinen kleinstmöglichen Radius des äußeren Horizonts. Dadurch dass Schwarze Löcher durch Akkretion schnell Drehimpuls gewinnen (engl. *spin-up effect*), ist zu erwarten, dass sehr viele von ihnen nahe an diesem Limit rotieren. Das legen auch aktuelle Computermodelle nahe (*Volonteri et al.* 2003; 2005). Rotation ist vital, um die Bildung von Poynting-Flüssen, die die Jets speisen, zu erklären.

5.10 Ein Plädoyer für Löcher ohne Ladung

Wie in der Historie Schwarzer Löcher bereits angemerkt, haben auch die Schwarzen Löcher der Kerr-Familie eine Verallgemeinerung erfahren: **rotierende Schwarze Löcher mit elektrischer Ladung**. Diese Kerr-Newman-Lösungen wurden 1965 von *Newman et al.* abgeleitet. Für Relativisten ist das Studium dieser Raumzeiten mit elektromagnetischen Feldern außerordentlich interessant. Für Astrophysiker spielt sie eher eine untergeordnete Rolle, weil die Ladung durch Akkretion von Plasma aus der Umgebung schnell kompensiert werden würde, sollte sich ein geladenes Schwarzes Loch gebildet haben. Aus diesem Grund betrachten Astrophysiker in der Regel nur ungeladene Schwarze Löcher vom Kerr-Typ.

Alle Versuche eine **innere Kerr-Lösung** als rotierendes Pendant zur inneren Schwarzschild-Lösung aufzufinden, sind bisher gescheitert! Eine gewisse Verwandtschaft zu diesen möglicherweise existierenden Lösungen weisen die **Raumzeiten von Neutronensternen und Magnetaren** auf: sie bestehen aus einem rotierenden, magnetisiertem Fluidum, das eine Kugel mit endlichem Radius ausfüllt. Bei diesen kompakten Objekten ist jedoch das Innere äußerst komplex aufgebaut, weil bei diesen hohen Materiedichten kernphysikalische Umwandlungsreaktionen einsetzen - es gibt bislang keine Einigkeit unter den Experten, welche Zustandsgleichung diese ultrakompakte Materie angemessen beschreibt. Es gibt also schon bei den 'Vorstufen eines Schwarzen Loches' Probleme. Ein vernünftiger Ansatz wäre es, den Übergang von einem Neutronenstern auf ein Schwarzes Loch konsistent zu rechnen - doch das bisher nicht gelungen.

6 Eigenschaften Schwarzer Löcher

Schwarze Löcher verschlucken unter gewissen Bedingungen Strahlung und Materie. Die Punkte, wo es kein Zurück mehr gibt, bilden eine sphärische Region, die man **Ereignishorizont** (engl. *event horizon*) nennt. Es handelt sich dabei aber *nicht* um eine feste Oberfläche wie bei Sternen, sondern um eine an sich mathematisch definierte Grenzfläche (*Nullfläche*). An dieser Grenzfläche passieren jedoch eine Reihe von physikalischen Besonderheiten: Generell wird die Entweich- oder Fluchtgeschwindigkeit hier gerade der Vakuumlichtgeschwindigkeit c . Weil dies jedoch die Geschwindigkeitsobergrenze für Signale und Materie ist, wie Einstein in der Speziellen Relativitätstheorie gezeigt hat, muss ab dem Ereignishorizont *alles* im Schwarzen Loch verschwinden! Damit grenzt diese ausgezeichnete Fläche bei Schwarzen Löchern Ereignisse im Universum klar in zwei Bereiche ab: eine *beobachtbare Zone*, wo nämlich Ereignisse vor dem Horizont stattfinden und eine *unbeobachtbare Zone*, wo Ereignisse nach dem Horizont stattfinden.

6.1 Horizonte und Kerr-Parameter

Den Horisontradius kann man relativistisch exakt berechnen. Erstaunlicherweise liefert die viel einfachere Newtonsche (aber eigentlich inadäquate!) Berechnung dasselbe Ergebnis. Der Radius des Ereignishorizonts r_H hängt vom Rotationszustand des Schwarzen Loches ab. Es ist sogar so, dass rotierende oder elektrisch geladene Löcher zwei Horizonte haben.

Die Abbildung 6.1 stellt die beiden Extremfälle gegenüber: die **Schwarzschild-Lösung** (links) beschreibt nicht rotierende, also statische, Schwarze Löcher. Rechts daneben ist die maximal rotierende Form eines Schwarzen Loches, die extreme **Kerr-Lösung**, illustriert. In der Gegenüberstellung wurden gleiche Massen für die beiden Typen Schwarzer Löcher angenommen. Man erkennt sofort, dass rotierende Löcher bei gleicher Masse offenbar kleiner sind als ihr statisches Pendant. Der (äußere) Horizont ist in beiden Fällen exakt kugelsymmetrisch, aber im Kerr-Fall kleiner.

Es sei darauf hingewiesen, dass Abbildungen wie diese zwar instruktiv sind, aber mit Bedacht zu interpretieren sind. Das Schemabild basiert auf den Informationen, die ein bestimmtes Koordinatensystem liefert. Es basiert hingegen *nicht* auf Invarianten, also Informationen, die in allen Koordinatensystemen gleich sind. Der einzige Sinn dieser Illustration ist, dass sie gut und intuitiv die strukturellen Eigenschaften Schwarzer Löcher subsumiert. Der tatsächliche visuelle Eindruck eines Loches ist jedoch weitaus weniger interessant: Es ist einfach nur eine schwarze Region (siehe Titelbild ganz oben), wie man wissenschaftlich mit Ray-Tracing-Simulationen belegen kann – dazu kommen wir später.

Rotation parametrisiert man in der Physik mit einem Drehimpuls. Bei rotierenden Schwarzen Löchern verwendet man den spezifischen Drehimpuls (Drehimpuls/Masse) oder **Kerr-Parameter** $a = J/Mc$. In der Theorie Schwarzer Löcher ist es üblich, die so genannten geometrisierten Einheiten $G = c = 1$ einzusetzen, so dass der Kerr-Parameter in Einheiten der Masse M angegeben wird. Theoretiker setzen manchmal sogar der Einfachheit halber

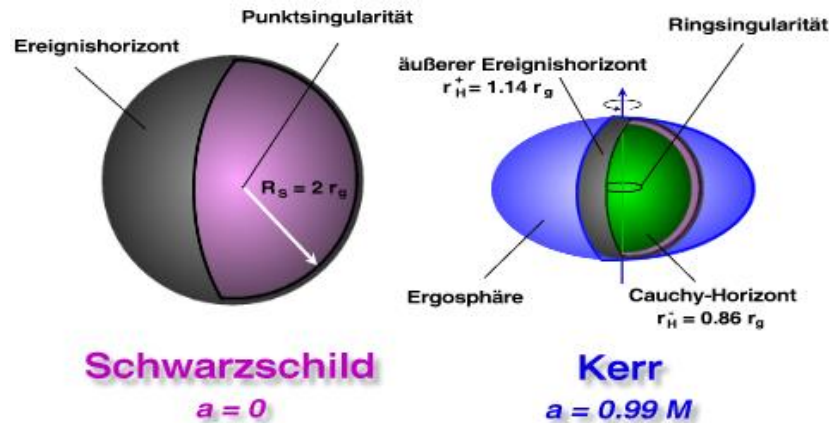


Abbildung 6.1: Schwarze Löcher: statische Schwarzschild-Raumzeit und rotierende Kerr-Raumzeit.

auch die Masse eins, $M = 1$. Somit kann der Kerr-Parameter den Wertebereich von -1 bis +1 durchlaufen.

$a = 0$ bedeutet keine Rotation (Schwarzschild), $a = -M$ maximale retrograde und $a = M$ maximale prograde Rotation (Kerr). Prograd und retrograd unterscheiden den Umlaufsinn relativ zu umlaufenden Teilchen bzw. einer Akkretionsscheibe: bei prograder Rotation haben beide denselben Umlaufsinn, bei retrograd einen gegenläufigen.

In beiden Extremfällen, $a = -1$ oder $a = +1$, rotiert der Horizont am Äquator mit der halben Lichtgeschwindigkeit (Bardeen, Press & Teukolsky 1972)! An sich kann ein Schwarzes Loch jeden Wert von a im Bereich zwischen -1 und +1 annehmen; es gibt jedoch vermutlich Einschränkungen, weil bei den beiden Extremwerten die Singularität (dazu gleich mehr) sichtbar wäre. Von außen sichtbare Singularitäten sind allerdings nach der *kosmischen Zensur* (nach Roger Penrose) verboten. Es wurden bislang zwei Grenzwerte vorgeschlagen, um sichtbare Singularitäten zu vermeiden: In den 1970er Jahren schlug der Relativist Kip Thorne den Wert $a = 0.998$ vor (Thorne limit). Kürzlich wurde der Zahlenwert nach unten korrigiert: Der Röntgenastronom Bernd Aschenbach (MPE) schlug auf der Basis von Beobachtungen quasi-periodischer Oszillationen den Wert $a = 0.996$ vor (Aschenbach limit).

Der Kerr-Parameter ist für jedes Schwarze Loch individuell unterschiedlich und hängt von seiner Vorgeschichte ab, z. B. seinem Alter, seiner Umgebung und seiner Akkretionsaktivität. Es ist Aufgabe astronomischer Beobachtungen neben der Masse des Loches gerade diesen Parameter a zu messen. Von theoretischer Seite ist zu erwarten, dass die Schwarzen Löcher in späten kosmologischen Epochen hohe Kerr-Parameter aufweisen, weil sie schon bei ihrer Entstehung viel Drehimpuls vom Vorläuferobjekt (massereicher Stern, Materiewolke, Sternhaufen etc.) beziehen. Es gibt allerdings auch Prozesse wie den Blandford-Znajek-Mechanismus oder Penrose-Prozesse, die zu einer Absenkung der Lochrotation führen können. Im Detail muss die Entwicklung des Loches daher individuell studiert oder simuliert werden. Aktuelle Computermodelle befürworten hohe Rotationen von superschweren Löchern, die im Laufe ihrer kosmologischen Entwicklung durch Akkretion 'aufgezogen' wurden (Volonteri et al. 2003, 2005).

Die Kerr-Löcher haben eine Reihe besonderer Eigenschaften, die ihren statischen Pendanten fehlt: So existieren im rotierenden Fall **zwei Horizonte**: ein *innerer* und ein *äußerer Horizont*.

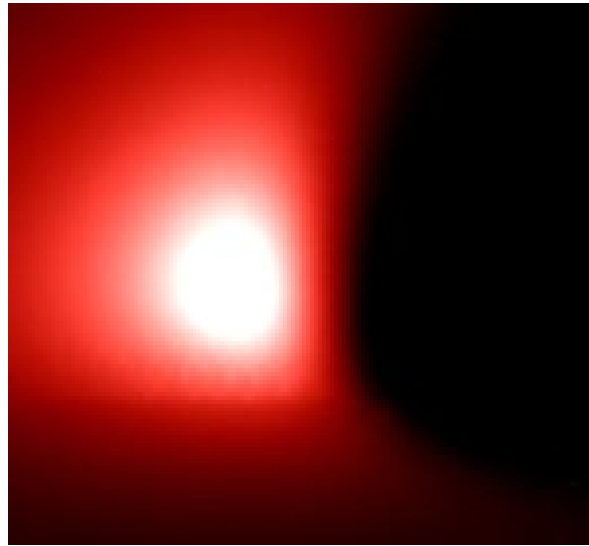


Abbildung 6.2: Simulation einer leuchtenden Akkretionsscheibe um ein Kerr-Loch.

In der Regel meint man mit Ereignishorizont bei einem Kerr-Loch den äußeren Horizont, weil er die Punkte ohne Wiederkehr enthält. Astronomisch ist diese äußere Zone wesentlich, die den 'Anfang der Schwärze' markiert. Der innere Horizont heißt auch Cauchy-Horizont. Geodäten können diese Nullfläche nur einmal schneiden. Anders gesagt: Was hereingeht, kommt niemals heraus! Der Einfall in ein Schwarzes Loch ist eine Einbahnstraße.

Beide Horizonte sind dadurch definiert, dass eine spezielle metrische Funktion, die so genannte Horizontfunktion Δ verschwindet

$$\Delta = r^2 - 2Mr + a^2 = 0 \Leftrightarrow r_{\text{H}}^{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2}.$$

Es sei angemerkt, dass dieses Verhalten in Schwarzschild- bzw. Boyer-Lindquist-Koordinaten in einer Koordinatensingularität resultiert, die aber definitionsgemäß durch eine geeignete Wahl anderer Koordinaten behoben werden kann. Im extremen Kerr-Fall (maximale Rotation des Loches) fallen innerer und äußerer Horizont zusammen. Im Schwarzschildfall (keine Rotation des Loches) geht der innere Horizont in die zentrale, echte Singularität über. Diagramm 6.3 illustriert diesen Sachverhalt für den vollen Parameterbereich der Rotationen unter Verwendung geometrisierter Einheiten (hier $G = c = 1$ und hier auch $M = 1$). Die Schwarzschild-Geometrie verläuft exakt in der Mitte ($a = 0$), während die extremen Kerr-Lösungen ($a = -1$ bzw. $+1$) an den Rändern zu finden sind. Man erkennt auch, dass ein langsam rotierendes Loch (z. B. $a \sim 0.1$) extrem voneinander abweichende Horizonte aufweist. Der innere Horizont ist bei langsamer Rotation sehr nahe an der zentralen Punktsingularität bei $r = 0$.

Außerdem besitzen nur rotierende Löcher eine besondere oblate Region, die man **Ergosphäre** nennt. Dieser Bereich erweist sich als vital für die Entstehung der relativistischen Jets, die man in aktiven Galaxien und einigen Röntgendoppelsternen mit Schwarzen Loch (engl. *black hole X-ray binary*, **BHXB**) beobachtet.

Die Relativisten und Astrophysiker nennen den Horisonradius der Schwarzschild-Lösung den Schwarzschildradius R_{S} . Er hat immer den Wert von zwei Gravitationsradien.

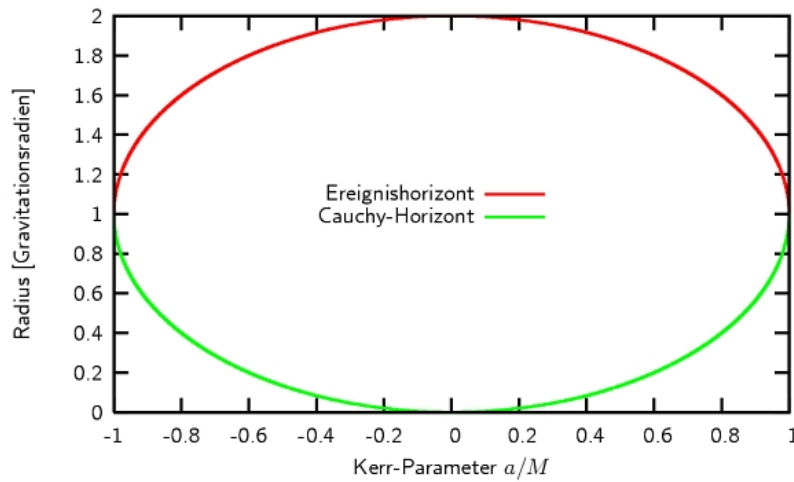


Abbildung 6.3: Innerer (grün) und äußerer (rot) Horizont eines Kerr-Loches in Abhängigkeit vom Drehimpuls des Loches.

Benannt wurde der Radius und die Raumzeit selbst nach *Karl Schwarzschild*, einem deutschen Astrophysiker. Er fand bereits kurz nach der Veröffentlichung der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) Albert Einsteins im Jahre 1916 eine Lösung der Vakuumfeldgleichungen, die seither **Schwarzschild-Lösung** heißt. Sie beschreibt die Metrik, also die Raumzeit (eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit), nicht rotierender und kugelsymmetrischer Schwarzer Löcher - oder allgemeiner gesprochen von Punktmassen.

Mit ansteigender Rotation des Schwarzen Loches hingegen, schrumpft der äußere Horizontradius, während sich ein zusätzlicher innerer Horizont ausbildet. Der innere Horizont wächst mit zunehmender Rotation des Loches. Bei maximaler Rotation liegen beide Horizonte bei nur einem Gravitationsradius: Innerer und äußerer Horizont fallen zusammen.

Der Gravitationsradius ist eine charakteristische Längenskala in der theoretischen Betrachtung Schwarzer Löcher und ist definiert zu $r_g = GM/c^2$, mit der Gravitationskonstanten G , der Vakuumlichtgeschwindigkeit c und der Masse des Schwarzen Loches M . Zahlenwerte im SI-Einheitensystem sind $G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ und $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$. Wie gesagt setzen Relativisten aus Zweckmäßigkeitsgründen diese Größen konstant eins, so dass auch der Gravitationsradius eins wird. Der Gravitationsradius ist die natürliche Längeneinheit der ART. Er skaliert linear mit der Masse des Loches.

6.2 Entwicklung Schwarzer Löcher

Einfallende Materie 'füttert' über Akkretion das Schwarze Loch. Das heißt die Gravitationskräfte des Loches ziehen alles in der Umgebung an. Betrachtet man ein Testteilchen, so hängt sein Schicksal von der genauen Größe der Gesamtenergie und des Drehimpulses ab. Das Teilchen kann gegebenenfalls wieder ins Unendliche entkommen oder in das Loch hineinfallen. Im letzten Fall sprechen Astrophysiker von Akkretion. Sie lässt das Loch durch Aufsammlung von Materie anwachsen und an Masse gewinnen. Dadurch wird es noch effizienter, weil der Horizontradius linear mit der Masse anwächst und damit

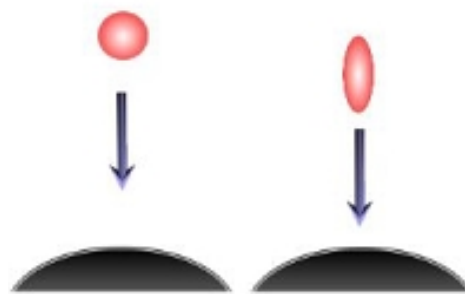


Abbildung 6.4: Gezeitenkräfte auf eine fallende Kugel.

der Einflussbereich des Loches wächst. Schwarze Löcher sammeln immer mehr Materie auf. Sie können aber auch Materie und Energie verlieren, z. B. indem sie Jets aus ihrer Rotationsenergie speisen, Teilchen Energie über Penrose-Prozesse entnehmen oder indem die Löcher Hawking-Strahlung emittieren. Letztendlich entscheidet eine Bilanz der Vorgeschichte des Lochs darüber, welche Masse und welchen Drehimpuls es hat.

6.3 Im Würgegriff des Schwarzen Lochs

Studiert man Teilchenbahnen (zeitartige Geodäten) in den Raumzeiten Schwarzer Löcher, so kann man mit einer kleinen Rechnung zeigen, dass die radiale Geschwindigkeit eines Teilchens am Horizont **immer** gleich der Vakuumlichtgeschwindigkeit ist. Im freien Fall wirken enorme Gezeitenkräfte (engl. *tidal forces*) auf den Körper, die ihn radial in die Länge ziehen und transversal stauchen (siehe Illustration 6.4). Solche Kräfte sind Volumen erhaltend, d. h. der Körper wird zwar extrem deformiert, aber füllt den gleichen Hohlraum aus. Die Gezeitenkraft skaliert mit der inversen dritten Potenz im Abstand und wird in der Singularität unendlich! Das hat extreme Deformationen zur Folge, die mit der Annäherung an das Loch ein bizarres Ausmaß annehmen. Man spricht in diesem Zusammenhang oft von 'Spaghettis' und der 'Spaghettisierung', weil Testkörper in eine solche Morphologie deformiert werden: lang und dünn.

Im Jahr 2004 waren sich Röntgenastronomen des MPE Garching um *Stefanie Komossa* sicher, dass sie die Folgen dieser extremen Gezeitenwirkung eines Loches auf einen Stern in einer anderen Galaxie beobachtet haben. Die Kräfte waren so extrem, dass der Stern zerrissen wurde und seine Trümmer einen hellen Akkretionsblitz im Röntgenbereich produziert haben. Vor kurzem ist es auch gelungen, den mit diesem Vorgang verbundenen Ultraviolett-Blitz zu beobachten (*Gezari et al.* 2006).

6.4 Singularitäten - Orte unendlicher Krümmung

Der Bereich 'hinter' dem Ereignishorizont ist für Außenbeobachter prinzipiell uneinsehbar und ist der Ort, wo die akkretierte Materie und Strahlung schließlich hingelangt. Teilchen, die den Horizont erreichen, müssen in das Schwarze Loch fallen und erreichen dann die innere Singularität. Echte, nicht behebbare, **intrinsische Singularitäten** oder Krümmungssingularitäten sind bei jedem klassischen Schwarzen Loch vorhanden. Wie bereits

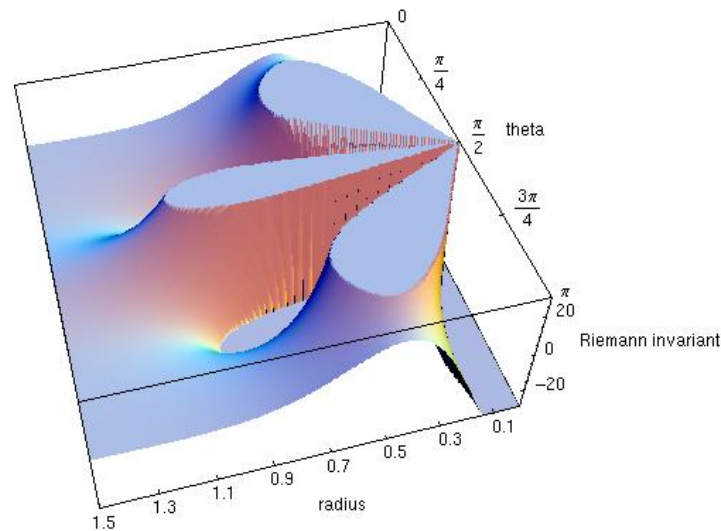


Abbildung 6.5: Krümmungsrelief eines rotierenden Schwarzen Loches mit $a = 0.998$.

besprochen, entdeckte der britische Mathematiker und Relativist *Roger Penrose*, dass alle intrinsischen Singularitäten hinter einem Horizont verborgen sein müssen. 'Hinter' meint 'verborgen für Außenbeobachter'. Diese Forderung nannte er die **Kosmische Zensur** (engl. *cosmic censorship*).

Letztlich steckt in dieser Singularität die gesamte Masse des Schwarzen Loches! Es sei daran erinnert, dass (elektrisch neutrale) Schwarze Löcher Vakuumlösungen der Einsteinschen Gleichungen sind, d. h. alle Bereiche bis auf die zentrale Singularität sind im relativistischen Sinne *leer*! Hier verschwindet der Energie-Impuls-Tensor ('relativistisches Vakuum'). Die Singularität kennzeichnet außerdem einen Bereich, wo die physikalische Beschreibung versagt. Denn hier divergieren wesentliche Größen, die ein Physiker benötigt: Krümmung, Dichte, Temperatur. Mit anderen Worten: In Singularitäten bricht die physikalische Beschreibbarkeit zusammen.

Im allgemeinen, rotierenden Fall gibt es keine punktförmige Singularität, sondern eine ringförmige Singularität. Singularitäten- und Krümmungsstrukturen von Raumzeiten analysieren die Relativisten mathematisch mit Krümmungsinvarianten, die definitionsgemäß in allen Koordinatensystemen übereinstimmen. Zu den Krümmungsinvarianten gehört z. B. der Kretschmann-Skalar (siehe auch Riemannscher Krümmungstensor sowie Weyl-Tensor). Die Abbildung 6.5 zeigt das **Krümmungsrelief eines rotierenden Schwarzen Loches**: Der Kretschmann-Skalar wurde auf der vertikalen Achse in Abhängigkeit von Radius (Achse vorn) und Poloidalwinkel (Achse in die Tiefe) aufgetragen. Dabei wurde ein Kerr-Loch mit Kerr-Parameter $a = 0.998$, also maximaler Rotation, angenommen. Die Krümmungsstruktur zeigt eindeutig an, dass die zentrale Ringsingularität im Zentrum des Lochs bei $r = 0$ und $\theta = 90$ Grad (hier am rechten Bildrand) sitzt. Die Krümmungsstruktur des klassischen, rotierenden Loches ist außerordentlich interessant, zeigt sie doch nicht nur das die Krümmung nach positiv unendlich geht - wie die drei abgeschnittenen Gipfel

zeigen -, sondern auch nach negativ unendlich - entsprechend der Täler! Bislang gibt es für die negative Krümmung keine physikalische Erklärung, denn sie ist wesensverschieden von der negativen Krümmung von Sattelflächen. Das Diagramm zeigt auch, dass die Krümmungseigenschaften spiegelsymmetrisch zur Äquatorialebene sind. Außerdem erkennt man sehr schön die asymptotische Flachheit der Kerr-Lösung, denn bei großen Radien (und beliebigen Winkeln) geht der Kretschmann-Skalar gegen null, d. h. die Krümmung verschwindet außen (Diagramm nach Rechnungen von *R. Conn Henry*, ApJ 535, 350, 2000).

Die Riemannschen Invariante der Schwarzschild-Metrik beispielsweise ist proportional zu $1/r^6$. Die Größe divergiert demnach auch bei $r = 0$, nämlich der intrinsischen Punktsingularität. Das Verfahren ist allerdings nicht immer so trivial, denn nicht immer ist klar, wie das Ergebnis zu interpretieren ist. Es gibt besonders geeignete Koordinatensysteme, wo die wahre Natur der intrinsischen Singularität besser erkennbar wird.

Die Untersuchungen mit diesen Größen führen zu dem Resultat, dass die intrinsische Singularität der Kerr-Geometrie eine Ringsingularität in der Äquatorebene ist. **Sie befindet sich wie die Punktsingularität der Schwarzschild-Lösung im Ursprung der Raumzeit bei $r = 0$ und ist immer innerhalb des inneren Horizonts!** Dieser Ring hat laut Allgemeiner Relativitätstheorie weder Dicke, noch Ausdehnung - genau wie bei der punktförmigen Singularität. Das mag den Quantenphysikern Kopfschmerzen bereiten, denn aufgrund der Heisenbergschen Unschärfe sind solche idealisierten Gebilde verboten und sollten in etwas endlicher Ausdehnung 'aufgeweicht' sein. Hier zeigt sich sehr deutlich, dass die ART eben eine **unquantisierte** Theorie ist. Spätestens hier wird der Ruf nach einer quantisierten Gravitationstheorie laut, um die Inkonsistenzen zwischen klassischer Physik und Quantenphysik zu bereinigen. Im Jahr 2005 demonstrierte der Gravitationsforscher *Martin Bojowald* vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, dass sich im Rahmen einer bestimmten Quantengravitation, der Loop-Quantengravitation (LQG), ein **Verschwinden von klassischen, echten Singularitäten der ART** andeutet. Der Knackpunkt ist, dass sich die LQG im Gegensatz zur ART noch nicht als Theorie bewährt hat, die erfolgreich die Natur beschreibt. Aus diesem Grund dauern die Forschungen in diese Richtung an.

Es zeigt sich jedenfalls unter dieser Perspektive, dass Schwarze Löcher - unabhängig von ihrer Existenz! - geeignete Objekte sind, um die Tauglichkeit und den Gültigkeitsrahmen der Gravitationstheorien abzustecken.

Sollte die Kerr-Lösung tatsächlich in der Natur realisiert sein, so muss sich die Masse 'hinter dem Horizont' in Form dieser intrinsischen Singularität sammeln. In welcher Form die Materie vorliegt ist völlig unklar! Man könnte es mit 'singulärer Materie' bezeichnen, aber das wäre nur ein Etikett für etwas, das ebenso wenig verstanden ist. Mit den Mitteln der Relativitätstheorie lässt sich die Masse eines Schwarzen Loches als '**Masse ohne Materie**' apostrophieren. Denn die Eigenschaft Masse ist da und messbar, nicht jedoch die Natur der Materie, z. B. ob es baryonische (aus Quarks bestehende) Materie ist oder ob sie aus Strings etc. besteht. Die Materie scheint alle Eigenschaften, wie Form und Farbe zu verlieren. Übrig bleibt nur eine fundamentale Eigenschaft: die Masse. Dazu gesellt sich die Eigenschaft Drehimpuls (Rotation) im Fall der Kerr-Löcher - mehr nicht. Dies ist gerade die Aussage des Keine-Haare-Theorems.

7 Massenskala Schwarzer Löcher

Schwarze Löcher können aus der Sicht klassischer Theorien beliebige Massen haben. Es muss nur durch irgendeinen Prozess gelingen, eine gegebene Masse - einen Stern, einen Stuhl, den ungeliebten Chef - unterhalb ihres Schwarzschild-Radius zu komprimieren: Dann resultiert ein Schwarzes Loch. Im Weltraum gibt es offensichtlich Prozesse, die auf natürliche Weise ein Schwarzes Loch erzeugen können. So ist das Ende eines massereichen Sterns in der Regel ein stellares Schwarzes Loch. Das ist jedoch noch nicht alles. Astronomen fanden mit der Zeit viele Kandidatenobjekte am Himmel, für die auch Schwarze Löcher eines deutlich anderen Massebereichs in Frage kommen. Mittlerweile hat man in der Astrophysik ganz bestimmte Massenbereiche gefunden, denen eine spezielle Klasse Schwarzer Löcher zugeordnet werden kann. Die Unterscheidungskriterien sind **Masse** und **Evolution**:

7.1 Primordiale Schwarze Löcher

Primordiale Schwarze Löcher oder **Mini-Löcher** sind sehr klein. Sie haben nur Massen von etwa 10^{18} g oder entsprechend 10^{-15} Sonnenmassen. Das entspricht in greifbaren Einheiten etwa der Masse eines irdischen Berges. Der zugehörige Radius des Ereignishorizonts beträgt nur etwa 10^{-12} m und kommt damit in den subatomaren Bereich. Nehmen wir an, diese Masse wäre gleichmäßig über eine Kugel dieses Radius verteilt, so wäre die Kompaktheit enorm hoch: Sie läge bei einer mittleren Dichte von etwa 10^{48} g/cm³!

Die Existenz solcher Mini-Löcher ist höchst spekulativ und deren Entstehungsmechanismus völlig unklar. Es könnte eine besonders intensive Form von Gravitationswellen, die superkritischen Brill-Wellen, kollabiert sein und diese Mini-Löcher übrig gelassen haben. Auch wird erwogen, dass solche Mini-Löcher primordial vorhanden waren, also in einer Frühphase des Universums entstanden sind, beispielsweise aus spontanen Symmetriebrechungen eines Skalarfeldes, ähnlich dem Higgs-Mechanismus.

Stephen Hawking zeigte 1974, dass durch Quanteneffekte solche 'Zwerge' unter den Löchern schnell zerstrahlen würden. Denn die Emission von Hawking-Strahlung kostet dem Loch Masse bis irgendwann die kleine Masse aufgebraucht und verschwunden ist. Das Ende der Zerstrahlungsphase ist - wie man annimmt - mit einem kurzzeitigen Ausbruch (*burst*) hochenergetischer, elektromagnetischer Wellen verbunden. Leider haben die Astronomen in Beobachtungen bisher **keine Hinweise** auf die primordiale Schwarze Löcher gefunden. Die Gamma Ray Bursts (GRBs) werden mit ganz anderen Szenarien in Verbindung gebracht, nämlich Sternexplosionen (so genannten Hypernovae) und Verschmelzung kompakter Doppelsterne.

Das Negativresultat bezüglich der Vernichtungsstrahlung primordialer Schwarzer Löcher verwundert, denn es ist zu erwarten, dass in der Verteilung der großräumigen, kosmischen Hintergrundstrahlung Signaturen zu finden sind. Sollten es primordiale Schwarze Löcher in einer frühen Phase des Universums gegeben haben, könnten sie über Akkretion gewachsen und so eventuell die Saatkörner für Galaxien gewesen sein. Diese Hypothesen sind aber recht spekulativ.



Abbildung 7.1: Massenhierarchie Schwarzer Löcher.

7.2 Stellare Schwarze Löcher

Stellare Schwarze Löcher entstehen im Rahmen der Sternentwicklung. Einstein war sicherlich angetan davon, dass Schwarzschild schon so kurz nach der Publikation der Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie eine Lösung gefunden hatte: die Schwarzschild-Lösung. Einstein sträubte sich aber davor, daran zu glauben, dass diese Punktmassen in der Natur existierten könnten.

Die wachsenden Erkenntnisse in der Stellarphysik sorgten aber für einen Umschwung. Die Astrophysiker fanden, dass Sterne am Ende ihrer Entwicklung instabil werden und infolge des Überhand gewinnenden Gravitationsdruckes kollabieren. Dieser Gravitationskollaps bringt sehr kompakte Sterne hervor: Weiße Zwerge und Neutronensterne sind nur eine Variante. Einer hohen Restmasse des sterbenden Sterns hält auch Neutronenmaterie nicht Stand. Dann muss - nach weit verbreiteter Lehrmeinung - eine Singularität entstehen. Da die Vorläufersterne rotieren, ist es sehr wahrscheinlich, dass auch das entstandene Loch rotiert. Die entsprechend angemessene Raumzeit ist demnach die Kerr-Lösung und weniger die Schwarzschild-Lösung. Erst seit Ende der 1960er Jahre wurden diese Singularitäten Schwarze Löcher genannt.

Die stellaren Schwarzen Löcher gehen aus Sternen hervor. So verwundert es nicht, dass sie nur wenige bis etwa hundert Sonnenmassen wiegen. Einer Sonnenmasse entsprechen 1.989×10^{30} kg. Wie alle Schwarzen Löcher können auch diese durch Aufsammeln von Materie aus der nahen Umgebung wachsen. Dieser für die Astrophysik generell wichtige Vorgang heißt Akkretion. Schwarze Löcher, die sich zu nahe kommen, weil sie beispielsweise gemeinsam in einem Mehrfachsternsystem entstanden, können auch miteinander verschmelzen. In diesen so genannten Merging-Szenarios können noch gewaltigere Schwarze Löcher entstehen - die vielleicht sogar die stellare Skala sprengen. Wir werden in Kürze sehen, dass es auch diese schwereren Kandidaten für Schwarze Löcher gibt.

Gute Kandidaten für stellare Schwarze Löcher sind z. B. folgende astronomische Quellen:

- ◇ XTE J1118+480,
- ◇ Cyg X-1,
- ◇ GRS 1915+105,



Abbildung 7.2: Supernovaüberrest Cassiopeia A.

◇ Cyg X-3.

7.3 Wenn Sterne explodieren

Wie vorweggenommen, entstehen stellare Schwarze Löcher aus Sternexplosionen, aus den so genannten Hypernovae (HN). Der Energieausstoß dieser katastrophalen Ereignisse ist enorm und liegt bei 10^{53} erg. Diese Explosionsenergie wird in den interstellaren Raum 'geschleudert' und treibt heftige Stoßwellen an, die mit der Umgebung zusammenstoßen. Dabei kommt es zu heftigen Strahlungsprozessen, die vor allem Synchrotronstrahlung emittieren. Das Ergebnis einer solchen Explosion zeigt das farbenprächtige Bild 7.2, ein Falschfarbenkomposit aus Beobachtungsdaten der Weltraumteleskope Chandra (Röntgen: Anteile aus blau und grün), Hubble (optisch: gelb) und Spitzer (infrarot: rote Farbanteile), das den Supernovaüberrest Cassiopeia A zeigt (Credit: NASA/CXC/SAO, NASA/STScI, NASA/JPL-Caltech 2005). Das Umgebungsmaterial leuchtet in allen möglichen Wellenlängenbereichen des elektromagnetischen Spektrums durch die Anregung des Schocks der Sternexplosion, die sich vor rund 300 Jahren ereignete.

Diese Vorgänge sind für die Komplexität der Materie von großer Bedeutung, entstehen doch beim Auslaufen der Schockwelle diejenigen Elemente, die schwerer sind als Eisen. Die mit der Explosionswelle verbundenen Prozesse nennen die Astronomen r-Prozesse und p-Prozesse.

Entscheidend für das Schicksal eines Sterns ist vor allem seine Masse. Kollabiert am Ende der stellaren Entwicklung eine Masse, die etwa drei Sonnenmassen übersteigt, so kann der Gravitationskollaps auf ein stellares Schwarzes Loch nicht verhindert werden. Als Konsequenz kollabiert das Material auf einen Punkt.

Der Kollaps kann auch in Doppelsternsystemen (Binärsystemen) stattfinden, die im Universum häufiger sind, als Einzelsterne (wie beispielsweise die Sonne). Es ist möglich, dass bereits ein Stern eines Binärs auf die beschriebene Art und Weise zum Weißen Zwerg wurde. Diese Umwandlung verläuft vergleichsweise glimpflich und beeinflusst kaum den Begleiter. Ist sein Begleitstern massereich und räumlich relativ nahe, so kann es passieren, dass Materie von ihm auf die kompakte Komponente überfließen kann. Stellt man sich die

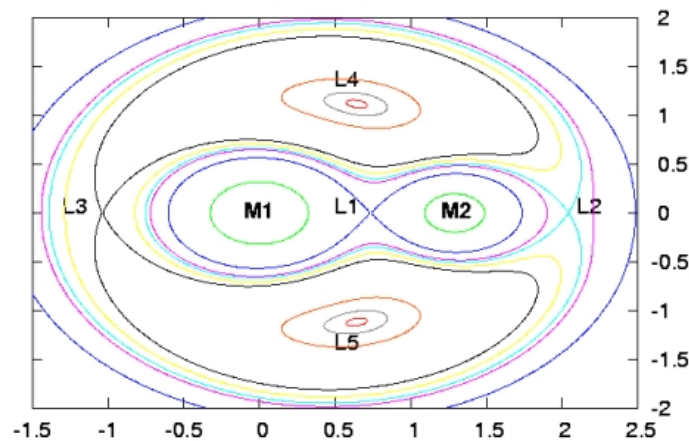


Abbildung 7.3: fünf Lagrange-Punkte in einem Doppelsternsystem.

zwei überlappenden Gravitationsfelder der Sterne vor, so ist es klar, dass es mindestens einen Punkt in diesem System geben muss, wo die gesamte Gravitationskraft verschwindet: In diesem so genannten inneren Lagrange-Punkte gleicht sich gerade die Gravitationskraft der einen Komponente mit der der anderen Komponente aus. Eine detaillierte Rechnung (*restringiertes Dreikörperproblem*) zeigt, dass es insgesamt fünf solcher Lagrange-Punkte in einem Doppelsternsystem gibt. Sie sind als L1 bis L5 in der Darstellung 7.3 des effektiven Gravitationspotentials beider Massen eingetragen (detaillierte Beschreibung im Lexikon unter Roche-Volumen):

Sollte nun der Begleitstern so ausgedehnt sein, in der Regel ein Riesenstern, dass seine Oberfläche bis zu einem Lagrange-Punkt oder darüber hinaus reicht, so kann Materie überfließen. Astrophysiker sagen dann, dass der Begleitstern sein Roche-Volumen überschreitet. Der Begleitstern rotiert, d. h. seine Materie besitzt Drehimpuls. Aus diesem Grund fällt das Material nicht auf direktem Wege radial ein, sondern formt ein abgeflachtes, scheibenförmiges Gebilde: die Standardakkretionsscheibe. In dieser Akkretionsscheibe gibt es Prozesse (Dissipation durch turbulente Viskosität oder magnetische Rotationsinstabilität, **MRI**), die den Drehimpuls nach außen transportieren. Deshalb kann das Material schließlich bis zur kompakten Komponente gelangen.

Ist die kompakte Komponente nun ein Weißer Zwerg, stürzt das Material aus der Akkretionsscheibe auf dessen Oberfläche und reichert sich an. Der Weiße Zwerg gewinnt also sukzessiv an Masse, aber Weiße Zwerge können nicht beliebig schwer werden. Wurde soviel Masse akkretiert, dass er die Chandrasekhar-Grenze von etwa 1.46 Sonnenmassen erreicht, zerreißt es den Weißen Zwerg in einer mächtigen Wasserstoffexplosion, einer Supernova vom Typ Ia. Es ist anzunehmen, dass der Begleitstern bei dieser Explosion aus dem Binärsystem geschleudert wird, weil er einen 'Kick' durch die auslaufende Schockwelle erhält. Diese Hypothese und andere Details von Supernova-Explosionen müssen jedoch in Computersimulationen noch bestätigt werden. Derzeit macht die Simulation einer einzigen Supernova aus einem Prä-Neutronenstern schon genug Probleme.

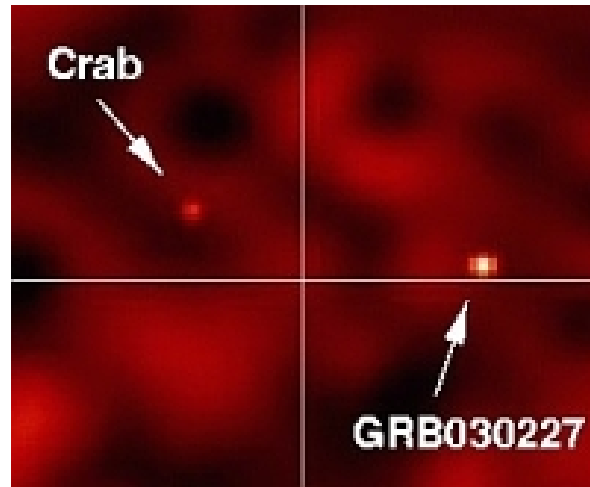


Abbildung 7.4: Integral-Foto des Gammastrahlenausbruchs GRB030227.

7.4 Das Hellste im Universum!

In einer besonders heftigen Form einer Sternexplosion ist die Hypernova. Hier ist zu erwarten, dass aus dem Kollaps eines sehr massereichen Sterns, z. B. vom Wolf-Rayet-Typ mit einigen zehn Sonnenmassen, **immer** ein stellares Schwarzes Loch entsteht. Die Astronomen gehen davon aus, dass mit Hypernovae die langzeitigen Gamma Ray Bursts (GRBs) assoziiert sind. Bei diesen Helligkeitsausbrüchen im energiereichsten Bereich der elektromagnetischen Strahlung treibt der Gravitationskollaps einen ultrarelativistischen Jet aus stellarer Materie, der sich seinen Weg durch den kollabierenden Stern bahnt. Im Rahmen des anisotropen Feuerball-Modells nimmt man an, dass dieser Jet schließlich den Bereich des Kollapsars verlässt und durch das interstellare Medium (dann auch *Circum Burst Medium* genannt) propagiert. Dabei entsteht bei der sich sukzessiv verlangsamenden Schockwelle das charakteristische **Nachleuchten der GRBs** in niederenergetischen Bereichen des Spektrums (engl. *GRB afterglow*) durch Synchrotronkühlung. GRBs sind mit Leuchtkräften von $10^{51} \dots 10^{54}$ erg/s das Leuchtkräftigste, was Astronomen kennen - sie übertrumpfen sogar die aktiven Galaxienkerne (AGN), von denen die leuchtkräftigsten Quasare etwa 10^{47} erg/s haben! (Zu den AGN kommen wir noch im Verlauf des Kapitels)

Die Abbildung 7.4 zeigt ein Beobachtungsfoto des Gammastrahlenausbruchs GRB030227, aufgenommen mit dem Gammasatelliten Integral der Europäischen Weltraumbehörde ESA (Credit: *Beckmann et al.*, SPI-Team, Integral/ESA 2003). Die hier abgebildete Strahlung hat Energien zwischen 20 und 200 keV und liegt im Bereich der harten Röntgen- und Gammastrahlung. Links neben dem GRB ist eine kontinuierliche Quelle, der Crab-Nebel (engl. *Crab nebulae*), zu sehen. Im Vergleich der Intensität sieht man, dass der GRB sogar den Crab-Pulsar kurzzeitig überstrahlt. Dort regt ein schnell rotierender Neutronenstern seine Umgebung zum Leuchten an. Der Crab-Pulsar ist eine so prominente und starke Quelle in der Gammaastronomie, dass die Astronomen Leuchtkräfte und Flüsse von kosmischen Gammaquellen in seinen Einheiten angeben.

Der Superstern *Eta Carinae* (η Car) im Sternbild *Schiff* (*Carina*) ist ein prominenter **Galaktischer Hypernova-Kandidat**. η Car hat etwa 100 Sonnenmassen, ist 7500

Lichtjahre entfernt und bläst - typisch für massereiche Sterne - einen heftigen Teilchenwind in Form eines bipolaren Ausflusses ab. Es ist eine interessante Frage, ob dieser Stern eine Gefahr für die Menschheit darstellen könnte, sollte er als Gamma Ray Burst eines Tages aufleuchten. Eine (von mir gemachte) Abschätzung für die deponierte Äquivalentdosis des hypothetischen *Eta Carinae*-GRBs bei bekannten Parametern und plausiblen Annahmen (100s dauernder Burst) ergibt einen Wert von etwa 1 Sv (Sievert), bezogen auf einen Tag. Dies entspricht fast dem 300fachen der üblichen Jahresbelastung (3 mSv) eines Menschen! Eine kurzzeitige Ganzkörperbestrahlung von über 7 Sv führt nach wenigen Tagen zum Tode. Bei einem wirklich langen GRB von etwa 1000 Sekunden, die astronomisch gesehen keine Seltenheit sind, wäre die Gefahr also tatsächlich nicht von der Hand zu weisen! Allerdings bestünde diese Gefahr 'nur' für das Leben derjenigen Erdhemisphäre, die im Moment des Bursts dem GRB zugewandt ist. Außerdem gehen viele Abschätzungen in diese Kalkulation ein: die Quelle ist punktförmig, eine Ganzkörperbestrahlung deshalb erschwert; von besonderer Relevanz ist die Orientierung des GRB-Jets. Mit ein bisschen Glück zeigt er nicht in Richtung Erde...

Leider ist man mit einer numerischen Behandlung noch nicht soweit gekommen, dass der Kollaps zu Neutronensternen oder Schwarzen Löchern in der Simulation geglückt wäre. Die Versuche werden jedoch unternommen. Wichtig ist es dabei, die Strahlungs- und Neutrinophysik sowie Einsteins Theorie adäquat zu implementieren. Bei der Simulation des Gravitationskollapses zu Schwarzen Löchern benötigt man ein Kriterium, das lokal die Ausbildung eines Horizonts fixiert. Auch diese Forschung steht noch Anfang. Die Beobachtung der Natur belegt aber, dass der Kollaps zu Kompakten Objekten geschieht (z. B. SN Typ II im Crab-Nebel oder SN 1987a).

Stellare Schwarze Löcher sind die klassischen Vertreter. Lange Zeit glaubte man, dass diese schmale Massendomäne charakteristisch für Schwarze Löcher sei. Schließlich entdeckten Astrophysiker in den 1960er Jahren das Standardmodell für Aktive Galaktische Kerne (AGN), das so genannte **AGN-Paradigma**, nach dem die Aktivität besonders heller Galaxienkerne durch Akkretion auf supermassereiche Schwarze Löcher erklärt wird. Dazu kommen wir am Ende dieses Kapitels.

7.5 Mittelschwere Schwarze Löcher

Bleiben wir zunächst auf der Massenskala, die wir allmählich erweitern wollen. Mittelschwere Schwarze Löcher stellen den neusten Typus auf der Massenskala dar. Sie haben größere Massen von 10^2 bis 10^6 Sonnenmassen. Vor kurzem hat man starke Hinweise darauf gefunden, dass dieser intermediäre Typus im Zentrum von Kugelsternhaufen existieren muss. Ganz aktuell ist die Frage, ob die mysteriösen ultraleuchtkräftigen Röntgenquellen (*ultra-luminous X-ray sources*, **ULXs**) physikalisch mit massereichen Schwarzen Löchern erklärt werden können.

Die Kandidatenobjekte im Zentrum von Kugelsternhaufen heißen

- ◇ M15,
- ◇ G1

Kugelsternhaufen sind alte galaktische Komponenten und befinden sich in einer sphäroiden Randregion einer Galaxis, dem *galaktischen Halo*. Etwa hunderttausend Sterne bilden eine kugelige Ansammlung, deren Sterndichte zum Zentrum hin stark zunimmt. Optisch sehen sie so aus, wie das Beispiel 7.5, der Kugelsternhaufen M80, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop Hubble (Credit: *Ferraro et al.* 1999, AURA/STScI/NASA). M80



Abbildung 7.5: HST-Foto des Kugelsternhaufens M80.

ist einer von etwa 150 Kugelsternhaufen der Milchstraße und 28000 Lichtjahre entfernt. Kugelsternhaufen sind die ältesten Objekte einer Galaxie und reichen an das Alter des Universums heran. Aufgrund des hohen Alters weisen Kugelsternhaufen fast kein Gas mehr auf, das akkretiert werden könnte. Deshalb müssen ihre Schwarzen Löcher, sollten sie existieren, hungern.

Die massereichen Schwarzen Löcher könnten aus leichteren stellaren Schwarzen Löchern hervorgegangen sein, dadurch dass in den dichten Kugelsternhaufen häufige Verschmelzungsereignisse (engl. *merging events*) geschahen. Ihre aktuelle hohe Masse hätten sie dann durch Akkretion gewonnen. Die charakteristischen Rotationskurven von Sternen um das Haufenzentrum (die Geschwindigkeitsdispersionskurven) können mit massereichen Schwarzen Löchern sehr elegant erklärt werden. Es wäre auch möglich, dass ganze Sterne akkretiert werden. Dann hätten Astronomen die Chance, in damit assoziierten hochenergetischen Strahlungsausbrüchen (Röntgenbursts) indirekt die Existenz eines Schwarzen Loches abzuleiten.

Das Problem bei dieser netten Vorstellung: Es gibt bei den meisten Kugelsternhaufen auch alternative Erklärungen, die **ohne** massereiches Schwarzes Loch auskommen. So wäre es denkbar, dass eine große Ansammlung massereicher oder kompakter Sterne (Bosonensterne, Fermionenball) im Zentrum des Kugelsternhaufens sitzt, was ebenso die gemessene Geschwindigkeitsdispersion erklären würde. Eindeutige Nachweise sind daher abzuwarten. Im Falle von G1, einem Kugelsternhaufen in unserer Nachbargalaxie Andromeda, haben sich jedenfalls die Hinweise auf ein massereiches Schwarzes Loch von etwa 17000 Sonnenmassen verdichtet (*Gebhardt et al.* 2005).

In den kleinsten Vertretern von Galaxien, den **Zwerggalaxien** hat man nun ebenfalls Kandidaten für Schwarze Löcher gefunden. Die Methode beruht ebenfalls auf der Messung der stellaren Geschwindigkeitsdispersion. Diese Objekte heißen u. a.

◇ POX 52,

◇ NGC 4395

Mit etwa 100 000 Sonnenmassen liegen diese Kandidaten für Schwarze Löcher gerade im Übergangsbereich zwischen massereichen und supermassereichen Schwarzen Löchern. Auch hier ist die Evidenz schwach. Insgesamt lässt sich vorläufig bilanzieren: Die Hypothese von Schwarzen Löchern mittlerer Masse in Kugelsternhaufen und Zwerggalaxien ist plausibel, doch sind die Modelle noch sehr unsicher und eine sichere Verifikation einer geschlossenen Massenlücke bleibt abzuwarten. Die Existenz von massereichen Schwarzen Löchern in ULXs ist noch eine sehr vage These, weil die Astronomen noch zuwenig über die Physik dieser Quellen wissen. Zum Teil kann man einige ULXs auch gut mit akkretierenden stellaren Schwarzen Löchern erklären.

Vom theoretischen Standpunkt war es zwar lange rätselhaft, weshalb es bei diesen Massen nicht auch Schwarze Löcher geben sollte. Die Beobachtungen müssen diese Hypothese schlüssig belegen. Die nahezu geschlossene **Massenhierarchie** ist sicherlich - vom theoretischen Standpunkt aus - außerordentlich attraktiv!

7.6 Supermassereiche Schwarze Löcher

Supermassereiche Schwarze Löcher sind in der Regel Zentren von Galaxien. In einem unifizierenden Modell gehen fast alle Astrophysiker heute einvernehmlich davon aus, dass **jede Galaxie** im Zentrum ein supermassereiches Schwarzes Loch (engl. *supermassive black hole*, SMBH) beherbergt (Es mag wenige Ausnahmen geben, wo z. B. der Galaxienkern in einem Kollisionsereignis entrissen wurde.).

Die Massen supermassereicher (oder auch superschwer genannt) Schwarzer Löcher finden sich auf der Skala von Millionen bis Milliarden Sonnenmassen! Die maximalen Massen leitet man bei alten elliptischen Galaxien ab, wie M87, die kaum noch Gas enthalten, das akkretiert werden könnte. Diese Riesenellipsen sind nach einem gängigen Evolutionsmodell aus der Verschmelzung von Spiralgalaxien (*merging spirals*) hervorgegangen und haben eine heftige Entwicklungsphase hinter sich. Die galaktischen Kollisionsprozesse kann man aktuell an zahlreichen irregulären Galaxien ablesen. Solche Vermischungsprozesse fördern das Entstehen neuer Sterne, weil das interstellare Medium (ISM) beteiligter Galaxien heftig durchmischt wird. Astronomen erkennen das an der Blaufärbung von solchen Sternentstehungsregionen (engl. *starburst regions*). Junge, massereiche Sterne vom Spektraltyp O oder B strahlen blau und blauweiß.

Der Schwarzschildradius supermassereicher Schwarzer Löcher ist in der Größenordnung von Milliarden Kilometern bzw. einigen astronomischen Einheiten. Säße einer dieser Giganten im Zentrum unseres Sonnensystems, so würde sein Schwarzschildradius etwa bis zur Bahn des Zwergplaneten Pluto reichen! Diese größten Vertreter Schwarzer Löcher sind demnach in der Tat riesenhaft, aber relativ zu ihrer Wirtsgalaxie, in die sie eingebettet sind, wiederum winzig.

7.7 Das AGN-Standardmodell

Ein zentrales supermassereiches Schwarzes Loch ist insbesondere die vitale Ingredienz von Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) (siehe diesen Web-Artikel für Details). Denn das Loch speist über Akkretion von Plasma die enorme Helligkeit des AGN. Das ist die Kernaussage des AGN-Paradigmas. Gemäß diesem Standardmodell für aktive Galaxien findet man folgende

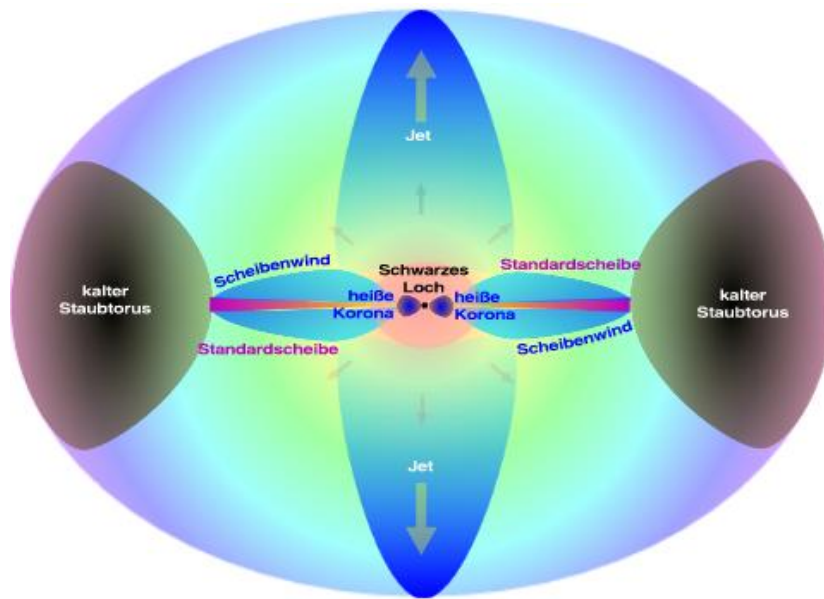


Abbildung 7.6: Tomographie eines Aktiven Galaktischen Kerns bis zur pc-Skala.

Strukturen vor: Das kalte, molekulare Material des großskaligen Staubtorus fällt von der pc-Skala (einige zehn bis hundert Lichtjahre) in das Herz des AGN. Dabei bildet der Materiestrom eine besondere Form aus, die so genannte Standardscheibe, die eine dünne Materiescheibe darstellt. Sie wird zum Zentrum hin immer heißer und strahlt sehr effizient Wärmestrahlung ab. Aus diesem Grund wird das Material gut gekühlt und sammelt sich in dem flachen Gebilde an. Im inneren Bereich der Scheibe wird das Material schließlich extrem aufgeheizt und daher ionisiert. Auf kleiner Skala (einige Lichtjahre) bläht sich der heiße Akkretionsfluss auf und wird in das Schwarze Loch gezogen. Der nun sehr heiße und ausgedünnte Akkretionsfluss nimmt nun ein neues Erscheinungsbild an: Als so genannter ADAF gewinnt er nun an räumlicher Dicke und kann kaum durch Strahlung gekühlt werden.

7.8 Das Leuchten der AGN

Die involvierten Strahlungsprozesse auf diesem langen Weg sind sehr vielfältig: thermische Strahlung ist allgegenwärtig und kann bei dem heißen Plasma wenige Lichtjahre vom Schwarzen Loch entfernt im Röntgenbereich strahlen. Ebenso kann kalte Umgebungsstrahlung (aus dem kosmischen Hintergrund oder der kalten Akkretionsscheibe) Comptonisiert werden, d. h. energiearme Photonen werden durch inverse Compton-Streuung in heißem Gas zu energiereichen Photonen. Geladene Teilchen, die sich vor dem Hintergrund vorhandener Magnetfelder bewegen, erzeugen Synchrotronstrahlung und Zyklotronstrahlung. Diese kann ebenfalls Comptonisiert werden (*Synchrotron-Self Compton*, SSC). Daneben gibt es noch Bremsstrahlung, also elektromagnetische Emission von abgebremsten, geladenen Teilchen. Um es auf den Punkt zu bringen: **Ein Aktiver Galaktischer Kern ist also nichts anderes, als ein akkretierendes, supermassereiches Schwarzes Loch, das seine Umgebung in allen möglichen Facetten zum Leuchten bringt.** In diesem Zusammenhang sprechen



Abbildung 7.7: optisches Erscheinungsbild des Quasars 3C273.

Astrophysiker gerne vom Schwarzen Loch als AGN-Motor (engl. *AGN engine*). Die hellsten AGN sind leuchtkräftigste Quasare, die (bolometrische) Leuchtkräfte von etwa 10^{47} erg/s erreichen. Das Beobachtungsfoto 7.7 zeigt das optische Erscheinungsbild des leuchtkräftigen Quasars 3C 273, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop Hubble (Credit: *Martel et al. 2003, STScI/NASA*). Zum Vergleich: Unsere Sonne schafft eine Leuchtkraft von 10^{33} erg/s. Weniger helle AGN wie die Seyfert-Galaxien kommen ungefähr auf ein Hundertstel der Quasarleuchtkraft, demnach etwa 10^{45} erg/s.

8 Akkretion - Materie am Abgrund

Schwarze Löcher sind **Schwerkraftfallen**: Alles, was ihnen zu nahe kommt, ob Materieteilchen oder Licht, ist verloren. Aus der Ferne betrachtet kann man sagen, dass sie sogar die Zeit schlucken!

Gehen wir nun der Frage nach, weshalb Materie überhaupt in ein Schwarzes Loch fällt und welche Materieströmungen sich dabei ausbilden. Diese Frage ist Gegenstand der **Akkretionsphysik**. Als Akkretion (lat. *accrescere*: hinzuwachsen) bezeichnen die Astrophysiker gerade den Vorgang, dass ein massebehaftetes Objekt Materie aufammelt. Neben Sternen (insbesondere Protosternen) und kompakten Objekten (Weiße Zwerge, Neutronensterne, Fermionenstern, Bosonenstern, Quarksterne) kann der Akkretor ein Schwarzes Loch sein. Der Materiestrom wird auch *Akkretionsfluss* (engl. *accretion flow*) genannt. Dieser Begriff ist fast schon eine Metapher und mit Bedacht gewählt, denn tatsächlich kann man auf ein Schwarzes Loch einfallende Materie beschreiben wie eine strömende Flüssigkeit. Die Gesetze der **Hydrodynamik** werden also in der theoretischen Beschreibung der Akkretion benötigt. Das reicht allerdings nicht, wie wir in diesem Kapitel erkennen werden.

8.1 Kosmische Davids und Goliaths

Im Wesentlichen kann man zwei Typen von akkretierenden Schwarzen Löchern unterscheiden: **stellare** und **supermassereiche** Schwarze Löcher. Sie wurden bereits im Kapitel Massenskala detailliert beschrieben.

Im ersten Fall akkretieren die Löcher Materie eines Begleitsterns, der z. B. sein Roche-Volumen überschreitet oder einen starken Sternwind auf das Loch bläst. Bei stellaren Systemen sind die Längenskalen viel kleiner und liegen im Bereich von einigen Astronomischen Einheiten ($1 \text{ AU} \sim 150 \text{ Mio. km}$).

Im zweiten Fall handelt es sich um ein deutlich schwereres Loch im Zentrum einer Galaxie. Dort wird es entweder 'gefüttert' und ist aktiv, so dass es die enormen Leuchtkräfte eines Aktiven Galaktischen Kerns (AGN) erzeugt. Oder das Loch 'hungert' und ist inaktiv (engl. *quiescent*), wie es bei den zahlreichen supermassereichen Schwarzen Löchern in den Zentren normaler Galaxien der Fall ist. Ein solches, 'schlafendes' (engl. *dormant*) Schwarzes Loch von etwa drei Millionen Sonnenmassen lauert im Zentrum unserer Heimatgalaxie.

8.2 Eine Mahlzeit für das Loch

Ein Schwarzes Loch, das gefüttert wird, benötigt einen Wirt, der es mit Masse versorgt. Im Falle der aktiven supermassereichen Schwarzen Löcher in AGN ist ein großskaliger Staubtorus das Massereservoir. Die riesigen Mengen an kalten Molekülen und Staub wiegen insgesamt 10^4 bis 10^8 Sonnenmassen (je nach AGN) und umkreisen das Loch in moderatem Abstand von etwa einer Parsec. Der Staubtorus ist jedoch *nicht* stabil: Aufgrund der so genannten **Papaloizou-Pringle-Instabilität (PPI)** können nicht-axiale Störungen kleiner Ordnung

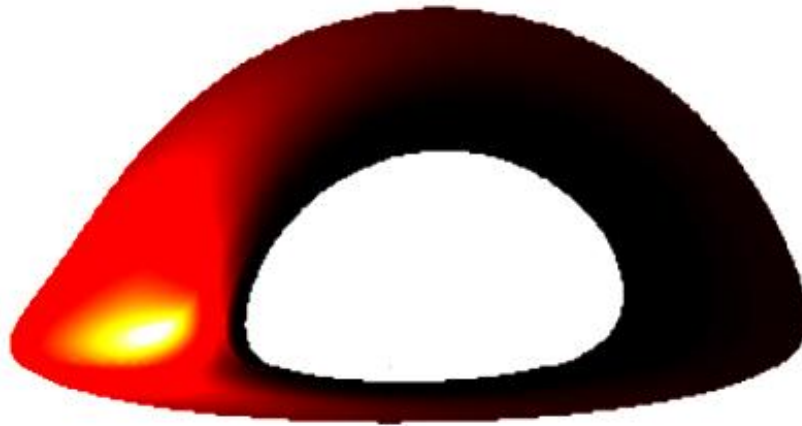


Abbildung 8.1: Simulierte Emission eines um 80 Grad geneigten Materierings direkt am rotierenden Schwarzen Loch.

die Toruskonfiguration zerstören. Diese rein hydrodynamische Instabilität wächst auf der dynamischen Zeitskala (Keplerrotation am Torusinnenrand) an, entsprechend auf der Skala von etwa 100 Millionen Jahren. Tori sind daher *generell keine* stabilen Konfigurationen. Als Folge der PPI zerfällt der Torus und die Materie fällt ins Zentrum, wo das Schwarze Loch lauert.

Daneben gibt es Materieflüsse, die in Zusammenhang mit anderen Galaxien in der Umgebung stehen. Viele Galaxien finden die Astronomen in Galaxienhaufen, den *Clustern*. Der Raum zwischen den Galaxien eines Haufens ist nicht leer, sondern angefüllt mit Gas, dem Clustergas. Dieses Material kann auf eine benachbarte Galaxie fließen, weil es gravitativ mit dem Potential der Galaxie wechselwirkt. Diese Materieströme heißen *cooling flows* und sind ein weiteres Reservoir, die das zentrale supermassereiche Schwarze Loch 'füttern'.

8.3 Karussellfahrt ins Loch

Innerhalb des Staubtorus bildet sich eine charakteristisch abgeflachter Akkretionsfluss aus, die Standardscheibe. Durch effiziente Strahlungskühlung ist sie in senkrechter Richtung in sich zusammengesackt. Astrophysiker nennen diese flache Eigenschaft *geometrisch dünn*. Allerdings kann die Strahlung nicht die Standardscheibe ungehindert passieren, weil das darin enthaltene Material hohe optische Tiefen aufweist: Standardscheiben sind *optisch dick* - wie die Astronomen sagen; sie sind also opak, undurchsichtig. Die Materie bewegt sich hier vornehmlich Keplersch, d. h. eine Rotationsbewegung wie bei den Planeten im Sonnensystem. Eine kleine Einfallbewegung zum Loch (eine *radiale Drift*) ist der Rotation allerdings überlagert. Insgesamt nimmt der Materiestrom auch aufgrund des Drehimpulses die dünne Scheibengestalt an: Rotierende, deformierbare Gebilde sind abgeflacht.

Standardscheiben verraten sich im beobachteten Spektrum als **Wärmestrahlung** (Plancksche Strahlung), die einen charakteristischen Buckel formt. Bei aktiven Galaxien (vornehmlich Typ 1; siehe dazu AGN) liegt dieser Buckel im Bereich der blauen und

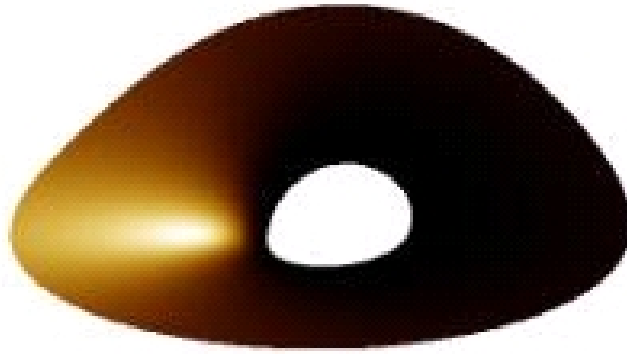


Abbildung 8.2: Simulierte Emission einer hoch inklinierten Akkretionsscheibe um ein Kerr Loch.

ultravioletten Strahlung und heißt daher in der Fachsprache 'Großer Blauer Buckel' (engl. *big blue bump*, BBB).

Die Standardscheiben beobachten die Astronomen auch bei den stellaren Schwarzen Löchern, z. B. den Mikroquasaren. Hier werden die Scheiben allerdings deutlich heißer (Für Experten: die Maximaltemperatur der Standardscheibe skaliert mit der inversen Quadratwurzel der Masse des Akkretors). Die physikalische Beschreibung der Akkretionsphysik stellarer versus supermassereicher Schwarzer Löcher ist also analog, wenn auch die Größenskala der Scheiben bzw. die Massenskala der Löcher differieren. Die Akkretionsscheiben sind auch durch den Einfluss ihrer eigenen Schwerkraft recht kompakt - einen Sachverhalt den die Astrophysiker *Selbstgravitation* nennen. Weiterhin sprechen sie von einer kalten Standardscheibe (oder auch *Shakura-Sunyaev disk*, **SSD**, nach den Pionieren, die 1973 diese Akkretionslösung fanden).

8.4 Magnetische Effekte

Akkretionsscheiben bestehen aus interstellarem Material, das nicht wie ein starrer Körper um ein Zentralobjekt rotiert, sondern das man als verformbares Gebilde, als *Fluidum*, beschreiben kann. Beispiele für irdische Fluide sind strömendes Wasser oder bewegte Luft. Weil der Akkretionsfluss ebenso verformbar ist, bedienen sich die Akkretionsphysiker den Methoden der Hydrodynamik. Der Materiestrom kann relativ hohe Geschwindigkeiten erreichen und unterliegt deshalb der *Turbulenz*. Außerdem wirken *Scherungskräfte* auf die Strömung und deformieren sie.

Turbulenz sorgt für eine Umverteilung des Drehimpulses in der Scheibe. Fachleute nennen das *Drehimpulstransport*. Im Prinzip sorgt die Wechselwirkung der vielen Teilchen untereinander dafür, dass sich ihr Rotationsverhalten ändert. Numerische Simulationen haben mittlerweile belegt, dass die rein hydrodynamische Turbulenz nicht ausreicht, um effizient den Drehimpuls in der Scheibe nach außen zu transportieren. Die Schlüsselrolle im Drehimpulstransport spielt die **magnetische Turbulenz**. Sie wird durch die Magnetorotationsinstabilität (MRI) erzeugt (dazu in Kürze mehr, bei der Diskussion des

NRAFs).

Die technischen Komplikationen in einer mathematischen Beschreibung nehmen mit der Annäherung an das Zentralobjekt zu. Denn der Akkretionsfluss wird heißer, so dass schließlich die Teilchen im akkretierten Material ionisiert werden. Die wesentlichen Ladungsträger sind Elektronen und Ionenrümpfe. Wenn diese Spezies auftreten, beginnt die Domäne der **Plasmaphysik**. Zu allem Überfluss generieren die sich bewegenden Plasmateilchen, die ja an sich elektrische Ströme sind, **Magnetfelder**. Dieses Phänomen heißt in der Elektrodynamik *Induktion*. Die Magnetfelder können durch Lorentz-Kräfte die elektrisch geladenen Teilchen ablenken. Auch bereits vorhandene Magnetfelder galaktischen Ursprungs ('Saatmagnetfelder') haben einen solchen Einfluss. Sie können durch die Rotation der Scheibe verstärkt werden, was Astrophysiker als *Dynamo-Effekt* bezeichnen.

Die wesentliche Konsequenz dieser Überlegungen ist, dass die Hydrodynamik um elektromagnetische Konzepte erweitert werden muss. Genau das gelingt in einer Beschreibung als geladene, magnetisierte Flüssigkeit. Das ist der Bereich der **Magnetohydrodynamik**: Der Satz an hydrodynamischen Gleichungen wird nun modifiziert um Gleichungen aus der Elektrodynamik.

8.5 Einstein-Effekte

Bei weiterer Annäherung an das Schwarze Loch werden die Effekte der gekrümmten Raumzeit relevant. Die Flüssigkeit bewegt sich (bei Bewegung im freien Fall) auf gekrümmten Geodäten, die von der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) diktiert werden. Die Plasmageschwindigkeiten nehmen auch deutlich zu und werden vergleichbar mit der Lichtgeschwindigkeit. Solche relativistischen Geschwindigkeiten erfordern die Konzepte der Speziellen Relativitätstheorie - diese sind allerdings in der ART enthalten. Außerdem gibt es eine ganze Reihe von Strahlungsformen, die der Akkretionsfluss aussendet, die bereits im Kapitel Massenskala bei den supermassereichen Schwarzen Löchern besprochen wurden.

Insgesamt lässt sich sagen, dass Strahlungsprozesse und Relativitätstheorie die mathematische Beschreibung in der Akkretionsphysik zusätzlich erschweren: Strahlungsmechanismen kühlen oder heizen den Akkretionsfluss, relativistische Prozesse generieren oft völlig neue Phänomene wie z. B. negative Energien in Penrose-Prozessen, Frame-Dragging, gravitomagnetische Kräfte/Präzession im Lense-Thirring Effekt oder die Strahlung unterliegt Gravitationslinseneffekten (engl. *light bending effects*) - all das wird erst in einer korrekten, voll allgemein relativistischen Behandlung berücksichtigt.

8.6 Die numerische Herausforderung

Nun müsste man für ein totales Verständnis der Akkretion in Galaxien, hydrodynamische oder besser magnetohydrodynamische Simulationen in drei Raumdimensionen (3D) betreiben, die am kollabierenden Staubtorus ansetzen. Diese Rechnungen, die nur mithilfe von Hochleistungsrechnern möglich sind (siehe auch Astrophysik auf dem Computer), müssten hochaufgelöst sein und dem Akkretionsfluss im Prinzip von 10^4 bis 10^6 Gravitationsradien bis auf einen Gravitationsradius, nämlich dem Ereignishorizont, folgen. Hier haben die theoretischen Astrophysiker natürlich ein eklatantes, numerisches Problem: Einerseits deckt die Auflösung nicht eine so große Skala (6 Dekaden) ab. Dieses Problem wäre allerdings mit neuen, numerischen Techniken wie dem Adaptive Mesh Refinement (AMR) zu bewältigen.



Abbildung 8.3: Sandwich aus SSD und ADAF.

Andererseits - und viel gravierender - unterscheiden sich die numerischen Methoden sehr auf den unterschiedlichen Skalen, weil man *unterschiedliche Physik* in den Griff bekommen muss. So ist die Raumzeit auf der Höhe des Staubtorus flach, während sie nahe am Horizont stark gekrümmt ist; die Strahlungsprozesse sind sehr unterschiedlich in den verschiedenen Bereichen (von Wärmestrahlung bis Synchrotronstrahlung) und schließlich ist die Astrochemie außerordentlich komplex und dynamisch relevant, gerade im Staubtorus.

8.7 Akkretionsflüsse - Wege ins Loch sind vielfältig

Die Lösung dieser Herausforderungen liegt - wie immer in der Physik - in der Vereinfachung und der Segmentation in Teilprobleme: Die eine Forschergruppe löst die physikalischen Effekte im Staubtorus, die andere diejenige in der Standardscheibe; eine weitere Gruppe berechnet die Bewegung von Materie in unmittelbarer Nähe zum Loch. Das ist der aktuell beschrittene Weg. Schwierig kann es dann werden, wenn man die Ergebnisse dieser Forschungen aneinander fügen möchte. Die unterschiedliche Physik und Modellierung führte in der Akkretionsphysik auf eine Reihe von Paradigmen mit differierenden und teilweise überlappenden Gültigkeitsbereichen. Es handelt sich dabei um verschiedene Formen so genannter **Akkretionslösungen**. Wir beschränken uns in diesem Artikel auf die wichtigsten drei Akkretionslösungen in der Astrophysik, die mit folgenden Akronymen bezeichnet werden:

- ◇ **SSD** oder **SAD**: *Shakura-Sunyaev Disk* bzw. *Standard Accretion Disk*, Shakura & Sunyaev (1973)
- ◇ **ADAF**: *Advection Dominated Accretion Flow*, Narayan & Yi (1994)
- ◇ **NRAF**: *Non-Radiative Accretion Flow*, Stone, Pringle & Begelman (1999)

8.8 SSD und ADAF

Die einflussreichsten und populärsten Modelle sind die beiden Erstgenannten: SSD und ADAF. Es fällt der große Zeitraum von mehr als zwanzig Jahren zwischen den beiden grundlegenden Modellen auf. Die Notwendigkeit eines heißen, advektionsdominierten Akkretionsflusses wurde anhand des Spektrums von Cyg X-1 erkannt, einem Röntgendoppelstern mit stellarem Schwarzen Loch (engl. *black hole X-ray binary*, **BHXB**). Denn das beobachtete harte Spektrum konnte nur mit einem heißen Plasmareservoir erklärt

werden. Das Plasma ist im ADAF-Modell tatsächlich sehr heiß und optisch dünn. Die innere Energie des Plasmas wird in das zentrale Schwarze Loch advektiert und nur ein geringer Teil wird abgestrahlt. Das Spektrum ist allerdings hart genug, um die Beobachtungen erklären zu können. Die harte Strahlung resultiert einerseits von einem Planck-Strahler hoher Temperatur und andererseits von Comptonisierung.

Die Morphologie des ADAFs ist typischerweise kugelförmig (*sphäroidal*) und ähnelt eher einem sphärischen **Bondi-Akkretionsfluss**. Ein Bondi-Fluss ist nicht so flach wie eine Standard- oder Keplerscheibe, sondern das Material strömt eher radial von allen Seiten auf die zentrale, akkretierende Masse ein. Zwischen der flachen (Keplerschen) Standardscheibe SSD und dem aufgeblähten ADAF kann es einen charakteristischen Übergangsradius (engl. *transition radius*) geben, der räumlich hin und her zappelt. Diese räumlichen Schwingungen könnten (zumindest zum Teil) die in Mikroquasaren beobachteten Quasi-Periodischen Oszillationen (QPOs) bewirken. Ein Indiz dafür ist, dass die QPO-Frequenz im Bereich der Rotationsfrequenz am Übergangsradius liegt.

Damit waren die Kombination aus SSD und ADAF, wie das Schema oben illustriert, ein bewährtes Modell, um eine Vielzahl astronomischer Quellen, in der Regel Röntgenquellen erklären zu können. Die Strukturen des Akkretionsflusses hängen im Detail jedoch vor allem von der **Akkretionsrate** ab, d. h. davon, wie viel Masse pro Zeit auf das Loch einstürzt. Der Lexikoneintrag Akkretion zeigt diesbezüglich ein sehr interessantes Schema im Abschnitt 'Vereinheitlichte Akkretion', das eine recht einheitliche Sicht auf Akkretionsflüsse gestattet.

8.9 NRAF

Das NRAF-Modell ist seit 1999 etabliert und wird aktuell intensiv weiter verfolgt. Prinzipiell subsumiert das Akronym NRAF sämtliche Akkretionsflüsse, die **nicht** durch Strahlung (engl. *radiation*) gekühlt oder geheizt werden können. Der heiße Akkretionsfluss kann innen, nahe vor dem gravitierenden Objekt (hier: Schwarzes Loch), einen advektiven Torus ausbilden.

Die ersten NRAF-Modelle waren rein hydrodynamisch (*Stone, Pringle & Begelman, 1999*). Später wurden die Modelle verfeinert, dadurch dass Magnetfelder Berücksichtigung fanden (*Balbus & Hawley, 2002*). Dann ist eine wesentliche Zutat im Modell die **ideale Magnetohydrodynamik**. Dahinter verbirgt sich die einfachste Form der MHD, die nicht dissipativ ist. Viskositäten und Wärmeleitung werden nicht berücksichtigt. Das hat den numerischen Vorteil, dass das Gleichungssystem deutlich einfacher ist. Doch bereits die ideale MHD zeigt einen wichtigen Mechanismus: die bereits angedeutete **Magnetorotationsinstabilität** oder magnetische Rotationsinstabilität (engl. *magneto-rotational instability, MRI*). Diese Instabilität wurde von Balbus und Hawley 1991 entdeckt. Das führte zum alternativen Namen *Balbus-Hawley-Instabilität*. Die MRI ist wesentlich, um zu verstehen, weshalb Materie einer Akkretionsscheibe - trotz *hohen* Drehimpulses - in ein Schwarzes Loch fallen kann. Die MRI sorgt für einen sehr effizienten **Drehimpulstransport**. Die damit verbundene **magnetische Turbulenz** ist deutlich wichtiger als die hydrodynamische Turbulenz. Damit diese MHD-Instabilität funktionieren kann, benötigt man nur ein rotierendes Objekt, z. B. einen Torus oder eine schlanke Akkretionsscheibe, und ein schwaches Magnetfeld, das dieses Objekt durchsetzt.

Typischerweise koppelt das Magnetfeld über **Äquipartition** an den Gasdruck. Dann steigt das Magnetfeld mit der Quadratwurzel des Gasdrucks. Der Gasdruck wird anfangs vom Torus vorgegeben.

Der Torus - aus numerischen Gründen bei etwa 100 Schwarzschildradien lokalisiert - dient dann als Massereservoir, das das Schwarze Loch füttert. Die nicht-radiativen, idealen 3D-MHD-Simulationen von *Balbus* und *Hawley* in einer pseudo-Newtonschen Geometrie (*Paczynski-Wiita-Potential*), die die Metrik eines Schwarzen Loches in begrenzter Weise nachahmt, sind sehr eindrucksvoll. Sie belegen, dass der **nicht-radiative Akkretionsfluss** (engl. *non-radiative accretion flow*, **NRAF**), der üblicherweise von einer wohl definierten Torus-Konfiguration startet, schon nach wenigen Kepler-Rotationen turbulent wird. Ursache ist die MRI, die äußerst effizient den Drehimpuls und Energie nach außen abtransportiert. Es handelt sich daher um magnetische Turbulenz. Die globale Magnetfeld-Topologie, die anfangs wohlgeordnet im Torus verankert ist, wird durch die Turbulenz schnell völlig zerstört und stochastisch. Oberhalb der Scheibe bildet sich eine magnetisierte Korona (engl. *coronal envelope*) aus. Diese Morphologie spricht für das lange existierende Modell einer abgeflachten Korona (*slab corona*), die der Akkretionsscheibe aufgeprägt ist. Das *slab corona model* gehört nach wie vor zum Standardrepertoire der Röntgenastronomie. Es ist in vielen Softwareprodukten der beobachtenden Astronomie zur Anpassung (engl. *fit*) der Beobachtungsdaten gebräuchlich. Natürlich kann sich diese Geometrie deutlich ändern, wenn die Strahlung im MHD-Modell berücksichtigt wird.

Die NRAF-Simulationen zeigen auch einen hohen Plasmaausfluss sowie einen Poynting-Fluss, der nach (magnetischer) Kollimation und Beschleunigung zu einem Jet werden könnte. **Rekonnexion**, also die Vernichtung des Magnetfeldes, wenn entgegengesetzte Polaritäten aufeinander treffen, übernimmt die Rolle der Heizung des Plasmas. Durch die MRI und Dynamo-Effekten wird das Magnetfeld schließlich so sehr verstärkt, dass es die Bedingung für Äquipartition erfüllt: Dann wird der magnetische Druck vergleichbar dem Gasdruck. In diesem Moment saturiert die MRI, weil das Magnetfeld zu stark wird und die MRI stoppt. Hier wird klar, warum die MRI auch 'Instabilität schwacher Felder' (engl. *weak field instability*) heißt, denn sie funktioniert nur effizient bei schwachen Magnetfeldern. Wesentliche Merkmale und Ergebnisse der NRAF-Simulationen sind der **turbulente durch die MRI getriebene Zerfall einer anfänglichen Torus-Konfiguration**, der zur **Akkretion auf das Schwarze Loch** führt und dabei auch einen **heißen, inneren Torus** auf der Höhe der marginal stabilen Bahn auszubilden scheint.

8.10 NRAF auf Kerr!

Die NRAF-Simulationen von *Balbus* und *Hawley* waren ein weiterer wesentlicher Beitrag zur Akkretionsphysik. Sie ebneten den Weg, um die ideale Magnetohydrodynamik genauer in Augenschein zu nehmen. Denn es stellte sich heraus, dass der MRI eine Schlüsselrolle in der Dynamik der **magnetischen Akkretionstheorie** zukommt. Am Rande sei bemerkt, dass die MHD-Akkretionsphysik auch bei der Bildung von Planeten in jungen Sternscheiben (*proto-planetary disks*, Proplyds) relevant ist.

Die Untersuchungen wurden signifikant erweitert: *De Villiers* und *Hawley* stellten 2003 Simulationen vor, die nun anstelle des post-Newtonschen Potentials die volle Kerr-Geometrie beinhalten! Damit ist es *erstmalig* gelungen Akkretionsflüsse auf dem Hintergrund rotierender Schwarzer Löcher zu beschreiben. Strahlung wurde aus numerischen und konzeptionellen Gründen noch außen vor gelassen, so dass dies die **relativistische Erweiterung des NRAF-Sektors** darstellt: Nicht strahlende Akkretionsflüsse können damit nicht nur post-Newtonsche, sondern nun auch voll relativistisch simuliert werden. Das Akronym dieser

Domäne ist die **Allgemein Relativistische Magnetohydrodynamik** (engl. *general relativistic magnetohydrodynamics*, **GRMHD**).

Als Koordinaten wurden die Boyer-Lindquist-Koordinaten gewählt. Ihr Verhalten ist am Ereignishorizont pathologisch, weil dort eine Koordinatensingularität auftritt. Deshalb wurde in den Simulationen, nicht exakt bis auf den Horizont gerechnet, sondern kurz vorher abgeschnitten. Das ist sicherlich eine Schwäche in der Methode, weil so eventuell künstliche Effekte auftreten - dafür ist die Metrik deutlich einfacher in ihrer mathematischen Gestalt.

In den Simulationen wurde wieder eine anfängliche Toruskonfiguration zugrunde gelegt, dessen zeitliche Entwicklung simuliert werden soll. Die Dynamik mündet wieder in einen Zerfall des Torus nach wenigen Umläufen wegen der effizienten Wirkung der MRI. Wieder bildet sich ein Akkretionsfluss in radialer Richtung zum Schwarzen Loch aus - wie zu erwarten war.

Typische Parameter in den Simulationen sind hohe Rotation des Loches, Kerr-Parameter $0.9 M$, eine anfängliche Toruskonfiguration die einen Innenrand von 15 Gravitationsradien und einen Torusradius (Ort maximalen Gasdrucks, 'Toruszentrum') von 25 Gravitationsradien aufweist und ein Verhältnis von Gasdruck zu magnetischem Druck ('Plasma β ') von 200.

Neben *De Villiers & Hawley* gibt es nun weitere Forschergruppen, die erfolgreich strahlungslose MHD-Simulationen auf der Kerr-Geometrie durchführen, z. B. *Gammie et al.* 2003 und Mitarbeiter. Die grundsätzlichen physikalischen Aussagen haben sich hier bestätigt.

Wichtig ist, dass die unterschiedlichen Simulationstechniken, numerische Methoden und natürlich die physikalischen Ergebnisse sehr genau verglichen werden müssen. Unbedingte Voraussetzung ist daher eine gute Transparenz der Forschungsarbeiten. Diese Diskussion mündet schließlich in die Reproduzierbarkeit der Arbeiten und ein physikalisches Verständnis des grundsätzlichen Phänomens.

Im Wesentlichen gibt es nun folgende Strukturen im **voll relativistischen, nicht-radiativen Akkretionsfluss**:

- ◇ Ein **innerer Torus** (engl. *inner torus*), der vom einströmenden Akkretionsfluss auf der Höhe der marginal stabilen Bahn aufgebaut wird. Dieser Torus mündet letztendlich im rotierenden Loch und taucht dort ein (engl. *plunging region*). So wird das rotierende Loch mit Materie versorgt und kann akkretiv wachsen. Der innere Torus könnte bei ausreichendem Emissionsmaß mit der Korona assoziiert werden.
- ◇ Die **Hauptscheibe** (engl. *main disk body*), die sich aus den großen Materiereservoir des anfänglichen Torus entwickelt. Im Prinzip ist sie das turbulente Relikt der toroidalen Startkonfiguration. Inwärts mündet sie in den inneren Torus.
- ◇ Die **koronale Einhüllende** (engl. *coronal envelope*) ist ein Materierückflussgebiet, das sich bei großen Poloidalwinkeln ausbildet. Es ist oberhalb bzw. unterhalb der Hauptscheibe lokalisiert. Während die Materie in der Äquatorialebene (kleine Poloidalwinkel) einströmt, fließen Teile davon außen wieder zurück und entfernen sich vom rotierenden Loch.
- ◇ Nahe der Symmetrieachse des Systems - der Rotationsachse des Loches - bildet sich der **trichterförmige Jet** (engl. *funnel jet*) aus. Es handelt sich dabei um einen *zentrifugal und magnetisch getriebenen Ausfluss*, der an der Jetbasis noch nicht gebündelt, sondern recht breit ist. Dieser Ausfluss wird bei deutlich größeren Abständen zum Loch von etwa hundert Schwarzschildradien gebündelt (kollimiert) - was jedoch nicht simuliert

wurde, weil es viel zu weit außerhalb des Simulationsgebietes liegt. Die Forscher gehen davon aus, dass dieser Ausfluss den großskaligen, kollimierten Jet, wie man ihn bei AGN beobachtet, speist.

- ◇ Unmittelbar an der Symmetrieachse entsteht ein **leeres, trichterförmiges Gebiet** (engl. *evacuated funnel*). Aufgrund des Drehimpulses findet sich hier fast keine Materie, die Materiedichten sind sehr gering.

8.11 Status und Ausblick

Die letztgenannten MHD-Simulationen in der unmittelbaren Umgebung rotierender Schwarzer Löcher sind zurzeit wohl das Beste, was die Akkretionstheorie bietet, weil viele Eigenschaften des Akkretionsflusses geklärt werden. Bei den NRAF-Simulationen gibt allerdings eine gewichtige Unzulänglichkeit: Die **Strahlungskühlung und -heizung** ist noch unberücksichtigt. Bei den Strahlungsprozessen ist zu erwarten, dass vor allem die Synchrotronkühlung der Elektronen einen wesentlichen Einfluss auf den heißen, magnetisierten Akkretionsfluss haben wird. Die Kühlzeitskala der Elektronen liegt im Bereich von Millisekunden (!) und sollte heiße, evaporierte (d. h. aufgeblähte) Bereiche des Akkretionsflusses vertikal kollabieren lassen. Die numerische Auflösung solcher geometrisch dünnen Strukturen wird außerordentlich schwierig werden. Womöglich sind in der Numerik auch hier *Adaptive Gittermethoden* erforderlich.

8.12 Und die Natur?

Die grundlegenden Aussagen der Akkretionsphysik werden durch astronomische Beobachtungen bestätigt. So konnten die Röntgendoppelsterne mit stellarem Schwarzen Loch sehr gut mit Akkretionsmodellen erklärt werden, die Standardscheibe plus ADAF beinhalten.

Radiogalaxien und radiolaute Quasare zeigen Strukturen wie die relativistischen Jets, die nur durch ein rotierendes, superschweres Loch verstanden werden können. Leider ist es mit den aktuellen Beobachtungstechnologien noch nicht möglich, die theoretischen Resultate im Detail direkt mit Beobachtungsfotos zu vergleichen, weil der Akkretionsfluss auf einem so kleinen Raumgebiet (noch) nicht astronomisch abgebildet werden kann. Die Entwicklungen in der Interferometrie (siehe auch Apertursynthese) wie VLBI und VLTI lassen die Hoffnung aufkeimen, dass dies innerhalb der nächsten wenigen Jahre möglich sein wird.

Vielleicht können die Astronomen mit verbesserten Akkretionsmodellen auch die rätselhaften Eigenschaften der Quelle Sgr A* erklären. Sgr A* ist das massereiche und kompakte Zentrum unserer Milchstraße. In diesem Galaktischen Zentrum vermuten die Astronomen ein supermassereiches Schwarzes Loch mit etwa drei Millionen Sonnenmassen. Diesem Thema widmet sich extra ein Web-Artikel im Wissensportal mit dem Titel Das größte Schwarze Loch der Milchstraße. Die Synchrotronemission eines heißen, magnetisierten Objekts, vielleicht einem kleinen Materietorus inklusive dessen Selbstabsorption (*Synchrotron-Selbst-Absorption*, SSA) und Comptonisierung (*Synchrotron-Selbst-Comptonisierung*, SSC), würde die beobachteten Radiodaten (Submillimeter mit SCUBA) aus dem Zentrum der Milchstraße eventuell erklären. Der beobachtete Radiofluss weist eine Struktur aus zwei

'Buckeln' ('*double humps*') auf, wobei - nach dem favorisierten Modell - der hochenergetische Buckel gerade der reprozesierte/Comptonisierte niederenergetische Buckel ist.

Sgr A* ist das uns mit knapp 26000 Lichtjahren räumlich am nächsten liegende, gigantische Schwarze Loch. Trotz dieser 'Nähe, und trotz der oben beschriebenen theoretischen Erfolge gehört das hungernde, d. h. kaum akkretierende Schwarze Loch im Zentrum unserer Heimatgalaxie zu den großen Rätseln der Astrophysik. Diese in der Leuchtkraft stark unterdrückte Quelle (engl. *quiescent source*) ist ein ideales Problem, um die Fähigkeiten und Vorhersagekraft der modernen Akkretionsphysik zu testen.

9 Beobachtung Schwarzer Löcher

Schwarze Löcher am schwarzen Nachthimmel beobachten? Unmöglich! – So könnte sich eine voreilige Beurteilung der Frage, ob man Schwarze Löcher beobachten kann anhören. Es erinnert an die schwarze Katze, die man im Kohlenkeller nicht sieht. Und doch ist die Sachlage nicht so aussichtslos, wie sie auf den ersten Blick erscheinen mag. Um in der Metapher zu bleiben: Falls sich die schwarze Katze auf das weiße Sofa im Wohnzimmer wagt, entdeckt man sie sofort!

Ähnlich verhält es sich mit Schwarzen Löchern. Erinnern wir uns an das letzte Kapitel, so wissen wir, dass Schwarze Löcher mit ihrer Umgebung wechselwirken. Sie akkretieren Materie und Strahlung. Sie wachsen. Sie sind der Motor der hellsten Leuchtfeuer im All, der Aktiven Galaktischen Kerne. Damit wird klar, dass etwas Schwarzes vor hell leuchtendem Hintergrund sehr auffällig sein muss - wie die schwarze Katze auf dem weißen Sofa.

9.1 Ein Foto vom Stecknadelkopf

Die Astronomen haben jedoch ein ganz anders Problem: Schwarze Löcher sind kompakte Objekte, das heißt, sie nehmen nicht viel Raum ein. Entsprechend klein ist der dunkle Fleck, den Schwarze Löcher in ihrer Umgebung erzeugen. Was die Astronomen brauchen ist eine **hohe räumliche Auflösung** ihrer Teleskope. Dazu benutzen sie einen Trick: Viele Teleskope werden zusammengeschaltet und erhöhen damit die Lichtsammelleistung (Apertursynthese). Das Verfahren heißt **Interferometrie** und wurde erstmals mit Radioteleskopen wie dem Very Large Array (VLA) erprobt. Mittlerweile funktioniert das auch mit optischen Teleskopen. Am Very Large Telescope (VLT) in Chile nennt man das VLTI, das Very Large Telescope Interferometer.

In den nächsten Absätzen sollen kurz alle bislang erprobten und auch ein paar neue astronomische Verfahren vorgestellt werden, um kosmische Schwarze Löcher aufzuspüren. Eine deutlich genauere Diskussion findet der interessierte Leser in meiner Dissertation ab S.30 und in einem Konferenzbeitrag von 2007 mit dem Titel *Experimental Evidence of Black Holes* (pdf).

9.2 Spektro-relativistische Verifikation

Im Kapitel über Akkretion wurde auch geschildert, dass sich Schwarze Löcher durch ihre verheerende Wirkung auf ihre unmittelbare Umgebung bemerkbar machen. Wenn man auch nicht direkt die Strahlung vom Schwarzen Loch selbst beobachten kann, weil diese verschluckt wird, so heizt sich die Umgebung sehr stark auf, was man durch hochenergetische (thermische) **Röntgenstrahlung** messen kann. In diesem Bereich gibt es auch Emissionslinien von Atomen und Ionen der Elemente Eisen, Nickel und Chrom, die in unmittelbarer Nähe des Schwarzen Loches entstehen. Die Profile dieser Spektrallinien (siehe links) verraten viel über die physikalischen Eigenschaften des Systems aus Schwarzem Loch und Akkretionsscheibe

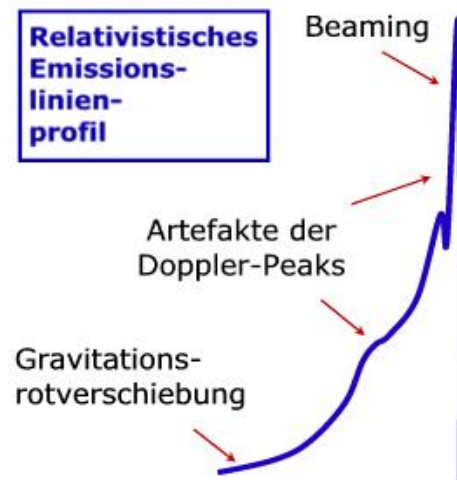


Abbildung 9.1: Prototyp eines Emissionslinienprofils, ausgesandt nahe einem Schwarzen Loch.

wie im Web-Artikel Röntgenlinien - Sendboten von Loch und Scheibe erläutert wird. So kann man aus dem Linienprofil die Neigung (*Inklination*) der kalten Standardscheibe ableiten, den Rotationszustand des Schwarzen Loches folgern, die Ränder der Standardscheibe bestimmen oder etwas über das Geschwindigkeitsfeld des Plasmas erfahren. Die Methode kann prinzipiell auch mit anderen Charakteristika im Spektrum durchgeführt werden, die nur empfindlich genug auf das Loch reagieren. Das ganze Konzept kann man als **spektro-relativistische Verifikation** Schwarzer Löcher bezeichnen.

9.3 Eruptive Verifikation

Aber auch kurz- oder langzeitige Röntgenflares können in der Nähe Schwarzer Löcher entstehen, z. B. dann, wenn ganze Sterne sich dem Loch bis auf ihren Gezeitenradius nähern. Dann werden die Sterne von den gigantischen Gezeitenkräften bei der Annäherung zerrissen (engl. *stellar tidal disruption*). Für sonnenartige Sterne funktioniert diese Zerreißprobe bis zu Massen der supermassereichen Schwarzen Löcher von 110 Mio. Sonnenmassen. Für Massen darüber liegt der Gezeitenradius **innerhalb** des Ereignishorizonts, und der Zerriss ist prinzipiell unbeobachtbar. Spätestens jedoch bei Erreichen der Singularität (falls es sie gibt) wird jede Materiekonfiguration zerrissen, was jedoch ebenfalls generell nicht (aufgrund der *kosmischen Zensur*) beobachtbar ist.

Diese Sternzerriss-Ereignisse sind nach vorsichtigen Abschätzungen recht selten: Etwa alle 10 000 Jahre verirrt sich ein Stern in diese Nähe zu einem supermassereichen Schwarzen Loch in einer Galaxie. Dennoch ist erstmals dieser Zerriss eines Sterns in einer relativ weit entfernten Galaxie beobachtet wird (*Komossa et al. 2004; Gezari et al. 2006*). Zusammen mit den Gamma Ray Bursts, bei denen im Prinzip ohne Ausnahme immer ein stellares Schwarzes Loch gebildet wird, kann man die Röntgenflares als **eruptive Nachweismethode** Schwarzer Löcher auffassen. Schwierig ist es allerdings, aus den beobachteten Eruptionen eindeutige Eigenschaften des Loches oder der Umgebung abzuleiten.

Im Kapitel Thermodynamik und Hawking-Strahlung werden wir uns damit beschäftigen,

dass Schwarze Löcher auch Strahlung und Teilchen abgeben können und damit gar nicht so schwarz sind, wie allgemein angenommen wird. Aufgrund eines Quanteneffekts den *Stephen Hawking* im Rahmen theoretischer Arbeiten entdeckt hat, geben vor allem massearme Schwarze Löcher Strahlung und Energie ab. Die Löcher können dabei sogar vernichtet werden - ein Vorgang der explosionsartig ablaufen soll, wenn die Löcher sehr leicht sind. Sollte über diesen faszinierenden **Hawking-Effekt** der Nachweis eines **Mini-Lochs** gelingen, müsste man diese Methode auch zu den eruptiven Verifikationsmethoden rechnen.

9.4 Kinematische Verifikation

Eine **kinematische Nachweismethode** vermisst die Bahnen von Sternen oder quasi-periodischen Flares, die sich um das Schwarze Loch bewegen. Sterne 'tanzen' mit hohen Bahngeschwindigkeiten auf elliptischen Orbits um ein Schwarzes Loch, wie Beobachtungen mit der Kamera CONICA im Nahinfrarot (NIR) beim Galaktischen Zentrum, der Quelle Sagittarius A*, abermals belegt haben (Genzel-Gruppe, MPE). Das Resultat dieser langjährigen Sternbeobachtungen im Infrarot ist in Form einer Animation mit echten Beobachtungsdaten rechts zu sehen. Die Sterne sind die punktförmigen, weiß dargestellten Quellen. Links oben variiert das Beobachtungsjahr. Rechts oben ist der Maßstab dargestellt. Hier sieht man die Sternbewegungen im Herzen der Milchstraße über einen Zeitraum von mehr als zehn Jahren. Das rote Kreuz markiert den Ort der zentralen, dunklen Masse, um das sich die Sterne auf Kepler-Ellipsen bewegen. Die Astronomen sind sich einig, dass im Zentrum ein supermassereiches Schwarzes Loch existiert. Die dynamischen Messungen legen einen aktuellen Wert von 3.6 Millionen Sonnenmassen für das supermassereiche Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße nahe (*Eisenhauer et al.* 2005). Quasi-periodische NIR- und Röntgenflares, die man nahe Sgr A* beobachtet sprechen für einen vergleichbaren Wert.

Neben Sternen können auch Gaswolken (z. B. die so genannten *Broad Line Regions*, BLRs) herangezogen werden, die um das Zentrum einer Galaxie kreisen, um die Masse des zentralen Lochs kinematisch zu vermessen. Reverberation Mapping, das Ausnutzen der M - σ -Relation und die Auswertung der Maser-Emission von galaktischem Gas sind ebenfalls kinematische Methoden, die detailliert im Lexikon unter supermassereiches Schwarzes Loch beschrieben werden.

9.5 Aberrative Verifikation

Eine weitere Methode beruht darauf, dass Schwarze Löcher durch ihre tiefen Potentialtöpfe die Richtung von Strahlung ablenken können. Dieses Phänomen nennt man *Lensing*, das beugende Objekt nennt man **Gravitationslinse**. Dies wäre also eine **aberrative Methode**, um die dunklen, kompakten Massen nachzuweisen. Es ist beobachtet worden, dass durch ein Schwarzes Loch oder eine andere kompakte, dunkle Masse zwischen Erde und heller Strahlungsquelle (zum Beispiel einem Quasar), die Strahlung um die dunkle Massenansammlung gebeugt wurde (*Aberration*). Auf diese Weise entstehen von ein und derselben Quelle Vielfachbilder und unter Umständen ein bekanntes Helligkeitsmuster, das man **Einsteinkreuz** oder Einsteinring nennt. Bei weit entfernten Quasaren, die selbst sehr aktive Galaxienkerne sind, wurden solche Mehrfachbilder beobachtet. Meist handelt es sich bei den Gravitationslinsen nicht nur um ein einzelnes supermassereiches Schwarzes Loch, sondern um einen ganzen Galaxienhaufen. Die Verifikation ist daher schwierig und würde nur

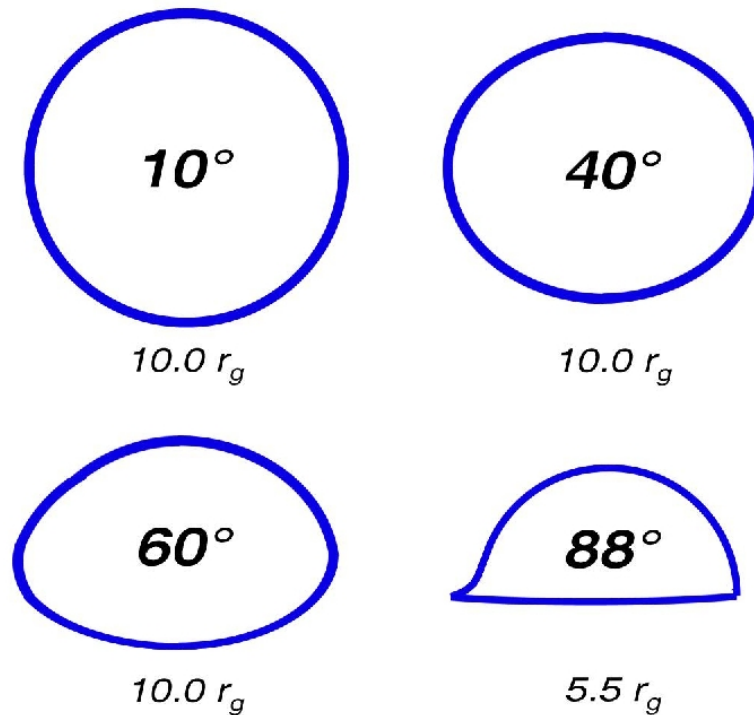


Abbildung 9.2: Gelinste kreisförmige Umlaufbahnen um ein Schwarzes Loch unter verschiedenen Blickwinkeln.

bei 'engem Streifen' der Strahlung der Hintergrundsquelle am Lochhorizont funktionieren. Mit wachsendem räumlichem Auflösungsvermögen der Teleskope steigen die Chancen, dass die aberrative Methode irgendwann in vielen Fällen erfolgreich eingesetzt wird.

Der Gravitationslinseneffekt bei Schwarzen Löchern ist auch interessant in seiner Wirkung auf kreisförmige Bahnorbits. Die Ray-Tracing-Simulation 9.2 zeigt die verzerrten Bilder von Kreisbahnen um ein Schwarzes Loch unter verschiedenen geneigten Blickwinkeln auf die Bahnebene.

Die Kreisbahnen haben einen Abstand von 5 bis 10 Gravitationsradien zum zentralen, maximal rotierenden Schwarzen Loch (nicht dargestellt). Es handelt sich bei allen vier Fällen um **Primärbilder**, also nur um Strahlung, die direkt zum Beobachter propagiert, ohne das Loch zu umlaufen. Die klassische (scheinbar) elliptische Bahnform hat man nur bei kleinen Neigungen (Inklinationen) der Bahnebene, wie die beiden oberen Darstellungen bei 10° und 40° Neigung belegen. Bei höheren Inklinationen hingegen, etwa ab 60° machen sich deutlich die **relativistischen Linseneffekte** bemerkbar: Der Beobachter blickt zwar eher auf die Kante der Bahnebene, aber die Strahlung wird um die kompakte Masse herumgebeugt. So kann man auch Bereiche direkt hinter dem Loch beobachten, die sich im **geometrischen Schatten** befinden und Newtonsch unbeobachtbar wären!

Bei der hier höchsten Inklination von 88° (was sehr nahe am Maximum von 90° liegt) erhält man ein stark verzerrtes Abbild des Orbits: Obwohl der Beobachter fast exakt auf die Kante der Bahnebene schaut, wo die klassische Ellipse wie eine Linie erscheinen und der Orbiter auf ihr hin- und her oszillieren würde, sieht man in diesem gelinsten Beispiel den hinteren Teil

des Bahnorbits! Leider reichen die aktuellen Auflösungen der Teleskope nicht aus, um solch befremdliche Bahnbewegungen am Himmel zu beobachten. Wenn dies gelänge könnte man auch hier den Umlaufsinn der Lochrotation direkt sehen.

Im hier gerechneten Beispiel rotiert das Loch maximal (Kerr-Parameter $a \sim M$) im Gegenuhrzeigersinn. Deshalb befindet sich bei der Bahnform unter 88° die kleine Ausstülpung der beobachteten Bahn links unten. Auf der gleichen Seite zeigen leuchtende Standardakkretionsscheiben das charakteristische Vorwärts-Beaming, ein Gebiet hoher Blauverschiebung.

Neben der starken Abhängigkeit von der Inklination, spielt natürlich der Abstand des Orbits zum Loch eine gewichtige Rolle. Bei großen Abständen verschwinden die relativistischen Linseneffekte, weil man in den **asymptotisch flachen Bereich** der Raumzeit Schwarzer Löcher kommt. Dieser Fall ist aktuell bei demjenigen Stern mit der Bezeichnung *S2* beobachtbar, der als Stern mit engster Bahn das supermassereiche Schwarze Loch im Galaktischen Zentrum umkreist (siehe Film in der Webversion dieses Artikels). *S2* ist zwar mit einer Periastron-Entfernung von 17 Lichtstunden sehr nahe am Loch, doch entspricht diese Entfernung im relativistischen Einheitensystem mehr als 4000 Gravitationsradien! Diese Distanz ist zu groß (vergleiche 5 bis 10 Gravitationsradien in der Abbildung), als dass starke relativistische Effekte, wie Linsenbeugung eine Rolle spielen würden: die Bahnform von *S2* ist eine exakte Kepler-Ellipse, wie mit *Very Large Telescope* (VLT) verifiziert werden konnte.

Es ist davon auszugehen, dass das Auflösungsvermögen in naher Zukunft so hoch sein wird, dass man diese Bahnformen bei einem Orbiter um ein Schwarzes Loch beobachten wird. Das wäre ebenfalls eine Form von aberrativer Verifikation, die das Potenzial hat, die Eigenschaften des Loches zu verraten.

Die Verhältnisse sind bei linsenden Schwarzen Löchern aber tatsächlich noch komplizierter: Neben den dargestellten Primärbildern entstehen Bilder höherer Ordnung dadurch, dass eng am Loch vorbeilaufende Strahlung das Loch mehrfach umrunden kann (unter gewissen Umständen kann es sogar auf dem Photonenorbit eingefangen werden (siehe dazu auch Kerr-Lösung)). So gibt es im Allgemeinen auch noch **Sekundär- und Tertiärbilder**, die es ermöglichen, die Bahnorbits gleichzeitig von oben und unten zu beobachten! Außerdem bilden sich so genannte Einstein-Ringe aus, wenn ein leuchtender Orbiter direkt zwischen Loch und Beobachter steht: das Bild des Strahlers ist durch den Linseneffekt in diesem symmetrischen Sonderfall zu einem leuchtenden Ring verzerrt worden. Diese Effekte beobachtet man auch ohne Schwarze Löcher bei den Mikrolinsen. Der Ring wird nicht als Bild aufgelöst, sondern ist photometrisch aus einem charakteristischen Anstieg der Lichtkurve ableitbar.

9.6 Obskurate Verifikation

Vielleicht ist es sogar möglich, *direkt* die **Absorption der Strahlung** am Ereignishorizont mit Hilfe von Radiowellen oder anderen Strahlungsformen zu detektieren. Die Abbildung 9.3 zeigt eine Sequenz des Erscheinungsbildes von verschiedenen stark geneigten Standardakkretionsscheiben, die mittels Kerr Ray Tracing visualisiert wurden (*A. Müller* 2004). Die Winkelangabe ist gerade der Neigungswinkel der Scheibe zum Beobachter: Bei 1° (links oben) schaut man direkt von oben auf die Scheibe; es zeigen sich kaum Verzerrungen. Bei 70° (rechts unten) schaut man fast auf die Kante der Scheibe; der hintere Teil erscheint hochgebogen, weil die Lichtstrahlen um das Loch durch Linseneffekte gebeugt werden. Die farbkodierte Größe ist der relativistisch verallgemeinerte Doppler-Faktor (g-Faktor) in der

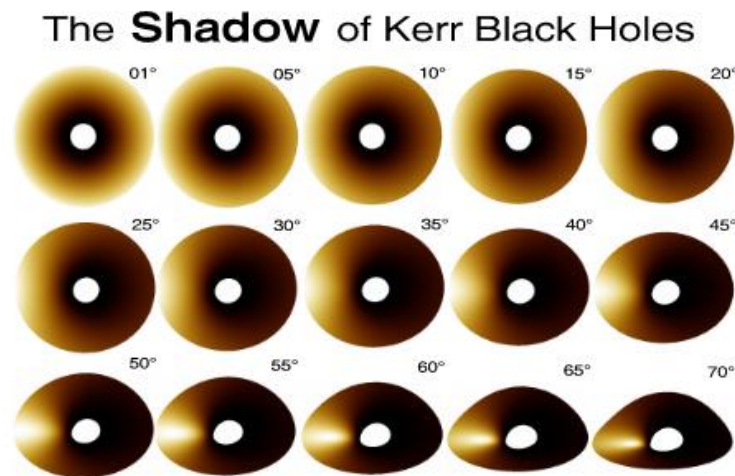


Abbildung 9.3: Erscheinungsbild einer dünnen Gasscheibe und eines Kerr-Loch bei verschiedenen Neigungen.

vierten Potenz. Jede Strahlungsform aus dem Bereich Schwarzer Löcher wird um diesen dominanten Faktor gewichtet. Die weiße Aussparung in der Mitte ist die Berandungsfläche des Ereignishorizonts, der sich direkt an den Scheibeninnenrand anschließt. Zwischen diesen beiden Extremen sieht man, wie einerseits die Emission durch speziell relativistische Doppler-Blauverschiebung auf der linken Seite verstärkt wird (*Forward Beaming*) und andererseits rechts stark unterdrückt durch Doppler-Rotverschiebung wird (*Back Beaming*). In allen Fällen gilt jedoch, dass man sehr deutlich ein **schwarzes Gebiet um das Schwarze Loch** sieht. Denn in direkter Umgebung um den Horizont nimmt der Rotverschiebungsfaktor so stark ab, dass er jede Emission in diesem Bereich unterdrückt! Diese Gravitationsrotverschiebung verrät die Position des Lochs. Würde ein Astronom zufällig gerade über diesen 'Großen Schwarzen Fleck' (*Great Black Spot* GBS, Dissertation A. Müller 2004) mit einem sehr auflösungsstarken Teleskop schwenken, so würde er einen signifikanten Abfall in der Emission messen können. Die Entwicklung der VLBI-Technologie für Wellenlängen im Submillimeterbereich lässt darauf hoffen, dass die Auflösung in den kommenden Jahren dazu ausreichen könnte, zumindest für den kosmisch nächsten Kandidaten für ein supermassereiches Schwarzes Loch (etwa drei Millionen Sonnenmassen), nämlich im Zentrum der Milchstraße in 8 kpc ($\sim 26\,000$ Lj) Entfernung, diesen direkten Nachweis eines Schwarzen Loches zu erbringen. Die Quelle Sgr A* im Sternbild Schütze ist ein wahrscheinlicher Kandidat dafür und wird bereits lange intensiv beobachtet. Ein anderer guter Kandidat ist M87. Im Bereich der Millimeterwellen erreichen die Radioastronomen bereits **räumliche Auflösungen von 15-20 Schwarzschild-Radien** in der Entfernung von M87 (Krichbaum et al. 2006). Die direkte Beobachtung der unmittelbaren Umgebung des Schwarzen Loches ist damit greifbar. Das Nachweisprinzip, bei dem die Schwärze des Loches direkt fotografiert wird, könnte man **obskurative Verifikation** nennen. Das Attribut *obskurativ* leitet sich vom lateinischen Wort *obscuratio* ab, das übersetzt *Dunkelheit* heißt. Die Dunkelheit oder Schwärze ist die Schlüsseleigenschaft bei dieser Nachweismethode.



Abbildung 9.4: Illustration eines Mikroquasars.

9.7 Akkretive Verifikation

Unter der **akkretiven Verifikation** Schwarzer Löcher kann man Folgendes verstehen: Ist in der Umgebung Schwarzer Löcher ausreichend interstellares Gas vorhanden, so wird es vom Loch aufgesammelt. Bei dieser Akkretion heizt sich das Gas zu einem heißen, ionisierten und magnetisierten Akkretionsfluss auf. Die Heizung erfolgt einerseits hydrodynamisch über Turbulenz und dissipative Viskosität, also im Prinzip Reibung der Plasmateilchen in der zähen Strömung, aber andererseits auch magnetohydrodynamisch über Rekonnexion, also der Vernichtung von Magnetfeldern entgegengesetzter Polarität. Die in den Feldern gespeicherte Energie wird so auf das Plasma in Form kinetischer Energie übertragen. Aber auch Strahlungsprozesse (Bremsstrahlung, Comptonisierung, Synchrotronstrahlung etc.) spielen eine große Rolle bei Heizung und Kühlung des Akkretionsflusses - wie bei der Erweiterung der NRAF-Modelle im Kapitel Akkretion diskutiert wurde. Letztendlich wird ein großer Teil des strömenden Plasmas vom Schwarzen Loch aufgesammelt, reichert es mit noch mehr Masse an und vergrößert es damit. Das Gas leuchtet dabei unter kräftiger und variabler Emission in allen Spektralbereichen und sorgt nach dem **AGN-Paradigma** für die typischen enormen Leuchtkräfte aktiver Galaxienkerne bis zu 10^{47} erg/s. Diese Aktivität verrät also implizit unter Verwendung der Relation für die Eddington-Leuchtkraft die Existenz supermassereicher Schwarzer Löcher in den Galaxienzentren. Das ist die einzige Erklärung, die bisher die theoretische Astrophysik bietet.

Ist eines der Objekte in **Binärsystemen** ein Schwarzes Loch – Astronomen bezeichnen sie dann allgemein als *Black Hole X-ray Binary* (**BHXB**), in speziellen Fällen Mikroquasar oder Mikroblazar – , so gibt es auch hier ganz erstaunliche Effekte: Materie kann vom Begleiter (beispielsweise einem Riesenstern) durch den inneren Lagrange-Punkte (hier heben sich die Gravitationskräfte der beiden Sterne auf) abfließen, vorausgesetzt der Begleiter überschreitet sein Roche-Volumen. Alternativ kann die Materie auf vom Wirtstern in Form eines kräftigen Sternwinds seinen Weg auf die kompakte Komponente finden.

Da die Materie Drehimpuls besitzt (Rotation des Begleiters) spiraliert sie in einer Akkretionsscheibe in das Schwarze Loch. Dort, wo der Akkretionsstrom des Wirts auf die Scheibe trifft, bildet sich ein *heißer Fleck* (engl. *hot spot*) aus, der in Lichtkurven typischerweise als charakteristische Variation auftritt. Durch innere Viskositäten und Rekonnexion der Magnetfelder in der Akkretionsscheibe heizt sich das Plasma stark

auf und strahlt ein Planckspektrum (Schwarzkörperspektrum) ab, also Wärmestrahlung. Synchrotronstrahlung ist ebenfalls wichtig, weil sie den heißen Akkretionsstrom auf sehr kurzen Zeitskalen kühlt (nur einige Millisekunden bei den Elektronen!).

Sind es sogar zwei Schwarze Löcher, die sich umkreisen, so verliert das System durch die Abstrahlung von Gravitationswellen Energie. An sich passiert das bei allen Doppelsternen, aber der Energieverlust ist bei einem binären kompakten Objekt besonders gravierend bzw. die Abstrahlung besonders effizient. Als Folge nähern sich die kompakten Objekte sukzessiv an, bis sie schließlich verschmelzen. Dies wird als Ursache für die umstrittenen kurzzeitigen (d. h. kürzer als 2 Sekunden) Gamma Ray Bursts (GRB) favorisiert. Es handelt sich dabei um spontane, kurzzeitige Ausbrüche im hochenergetischen Bereich der elektromagnetischen Strahlung, die isotrop über den Himmel verteilt auftreten. Es sind also Ereignisse, die nicht bevorzugt in der Milchstraße, sondern in allen möglichen Galaxien im Universum aufzutreten scheinen! Die hochenergetische Gammastrahlung kennt man auf der Erde von bestimmten radioaktiven Atomkernen. Bei den länger andauernden GRBs nimmt man hingegen an, dass sehr massereiche Sterne (z. B. Wolf-Rayet-Sterne) einen der Supernova ähnlichen Prozess am Ende ihrer Entwicklung durchlaufen, den Astronomen auch Hypernova nennen. Auch bei diesen Kollapsen entsteht ein stellares Schwarzes Loch und außerdem ein ultrarelativistischer Jet, also ein Teilchenstrom, der weit aus dem System aus Schwarzen Loch und Akkretionsfluss hinausgetragen wird.

Immer wenn Astronomen solche aktiven Schwarzen Löcher in AGN, BHXBs oder GRBs anhand der Spektren, Lichtkurven oder anderer Diagnoseinstrumente identifizieren, haben sie eine akkretive (oder alternativ eruptive) Verifikation eines Schwarzen Lochs durchgeführt.

9.8 Temporale Verifikation

Temporale Methoden haben etwas mit Zeit zu tun. Dabei wird der Effekt der Einsteinschen Theorie ausgenutzt, der besagt, dass Massen das Zeitmaß beeinflussen. Dieser **Zeitdilatationseffekt** wurde sogar auf der Erde nachgewiesen, im Experiment *Gravity Probe-A*, bei dem der Einfluss der Erdmasse auf Atomuhren nachgewiesen wurde, die in Flugzeugen installiert waren und in verschiedenen Höhen flogen. Generell gilt: Je näher die Uhr bei der Masse ist, umso langsamer tickt sie. Bergbewohner altern schneller als Talbewohner. Piloten altern schneller als Busfahrer - ein Sachverhalt, der die Berufswahl erleichtern könnte.

Dieser Effekt ist gravierend bei Schwarzen Löchern, weil sie um ein Vielfaches kompakter sind, als die Erde (siehe dazu Tabelle im Lexikoneintrag kompaktes Objekt). Nun müsste man nur eine Uhr zu einem Schwarzen Loch schicken - das ist allerdings gar nicht notwendig, weil es in der Nähe der Löcher eine Reihe natürlicher Uhren gibt, z. B. ein periodisch um das Loch kreisender Stern oder ein heißer Fleck in der Akkretionsscheibe. Wenn dieser Orbiter sehr nah um das Loch kreist, wird sein Zeitmaß stark gedehnt. Diesem Effekt unterliegt auch die Lichtkurve, die der Astronom beobachtet (*Cunningham & Bardeen 1973*). Die Lochmasse und sogar sein Rotationsparameter folgen aus einer Analyse dieser Bewegungen.

9.9 Gravitationswelleninduzierte Verifikation

Im Jahr 1916 sagte *Albert Einstein* Gravitationswellen kurz nach der Publikation seiner Allgemeinen Relativitätstheorie voraus. Es handelt sich dabei um die dynamische Raumzeit

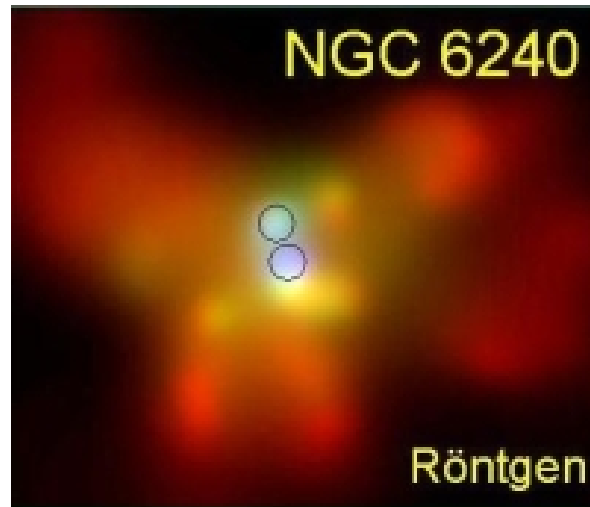


Abbildung 9.5: ULIRG NGC 6240 – der doppelte AGN.

selbst, die sich wellenförmig verbiegt. Dies geschieht dann, wenn Massen oder andere Energieformen beschleunigt werden.

Die Raumzeit ist jedoch ein recht steifes Gebilde und lässt sich nur mit erheblichem Aufwand verbiegen. Es bedarf schon sehr heftigen Beschleunigungen von Massen, am besten von kompakten Objekten, um eine Gravitationswelle ausreichender Amplitude zu erzeugen.

In der Astrophysik sind gute Kandidaten für Gravitationswellenstrahler Doppel- oder Mehrfachsternsysteme aus kompakten Objekten, z. B. ein Binärpulsar oder ein Binär-Loch. Beide Typen wurden astronomisch entdeckt: der Binärpulsar **PSR1913+16** (*Hulse-Taylor-Pulsar*) und das supermassereiche Binär-Loch im ULIRG **NGC 6240**! Die Natur des doppelten AGN ist mit dem Röntgensatellit Chandra enthüllt worden (siehe Röntgenfoto 9.5; Credit: *Komossa et al.* 2002, MPE, Chandra).

Auch die Explosionen massereicher Sterne, die Supernovae und Hypernovae, sind gute Emittter von Gravitationswellen. Es besteht jedoch ein wichtiger Unterschied zwischen diesen beiden Beispielen: Doppelsterne sind kontinuierliche Quellen von Gravitationswellen, wohingegen Sternexplosionen nur kurze Ausbrüche zeigen, die wieder vergehen. Letztere heißen auch *Burstquellen*.

Wie im historischen Abriss dargelegt, gelang es 2001 Gravitationsforschern am AEI die Kollision zweier Schwarzer Löcher auf Hochleistungsrechner zu simulieren (*Alcubierre et al.* 2001). Ein wichtiges Resultat ist dabei das Spektrum an Gravitationswellen, das dabei abgestrahlt wird. Dabei ist nicht nur die Emission im Kollisionsmoment von Bedeutung, sondern auch davor, wenn sich die Quellen umkreisen und - durch den Energieverlust des Systems - immer näher kommen. Die Fachleute sprechen auch von der *ring down phase*, wenn charakteristische Frequenzen im Gravitationswellenspektrum immer höher werden, weil sich die Binäre annähern.

Von theoretischer Seite weiß man also schon recht viel über Gravitationswellen. Die Relativisten haben schon eine recht klare Erwartungshaltung, was sie messen sollten. Mittlerweile wissen die Forscher, dass je nach Typ des Gravitationswellenemitters eine bestimmte Signatur, nämlich ein bestimmtes Spektrum vorliegt. So kann man umgekehrt

vom Spektrum her einen Befund durchführen, *was* da strahlt. Hier setzt nun die Grundidee der **gravitationswelleninduzierten Verifikation** Schwarzer Löcher an. Denn es sollte nach allem, was heute bekannt ist, sehr gut möglich sein, anhand der gemessenen Gravitationswellen ein Schwarzes Loch zu entdecken. In der Form der Gravitationswellen sind sogar eindeutige Spuren der klassischen Schwarzen Löcher verborgen, die klar auf den Ereignishorizont hinweisen (*Ryan 1995, Hughes 2001*). Damit stellt die gravitationswelleninduzierte Methode die **einzige Technik** zur Verfügung, um sicher ein klassisches Schwarzes Loch nachzuweisen, wie es Einsteins Theorie vorhersagt. Verifikationsmethoden, die auf elektromagnetischer Emission beruhen, haben immer eine letzte Unsicherheit, so dass hier der Beweis des Horizonts prinzipiell unmöglich ist (*Abramowicz et al. 2002; Müller 2007*).

‘Einziges Problem’ ist, dass es bisher noch nicht gelungen ist, Gravitationswellen überhaupt *direkt* nachzuweisen! Das liegt daran, weil sie einen so geringen Effekt im Labor erzeugen: Die relative Längenänderung beträgt nur 10^{-18} ! Anschaulich gesprochen deformiert eine Gravitationswelle eine Länge von einem Lichtjahr nur um den Durchmesser eines menschlichen Haares!

Beim besagten *Hulse-Taylor-Pulsar* allerdings ist es gelungen, die beobachtete Dynamik des Systems durch die Abstrahlung von Gravitationswellen zu erklären! Dieser *indirekte* Nachweis von Gravitationswellen wurde 1993 mit dem Nobelpreis für Physik für *Russel A. Hulse* und *Joseph H. Taylor Jr.* prämiert. Die Aussichten auf die Existenz dieser Einsteinschen Wellen sind also viel versprechend. Nach Jahrzehnten der Vorbereitung und erfolglosen direkten Suche gibt es nun allerdings sehr Erfolg versprechende Großprojekte wie LIGO, LISA und Geo600 - um nur ein paar Gravitationswellendetektoren zu nennen. Die Experten sind sich sicher, dass es Gravitationswellen geben muss und dass es nur eine Frage der Zeit ist, bis die Experimente empfindlich genug sind, um Gravitationswellen messen zu können und das neue Fenster der **Gravitationswellenastronomie** aufzustoßen.

10 Schwarze Löcher und Kosmologie

Im Kapitel Massenskala Schwarzer Löcher wurden zuletzt die schwersten Löcher vorgestellt, die so viel Masse haben wie Milliarden Sonnen. Die kosmologisch brisanten Fragen sind: Woher kommen die supermassereichen Schwarzen Löcher, die schon im jungen Kosmos extrem aktiv in Gestalt der Aktiven Galaktischen Kerne (AGN) in Erscheinung treten? Und wie entwickeln sich die superschweren Löcher weiter? Weshalb gibt es im lokalen Kosmos keine Quasare mehr?

10.1 Wachstum supermassereicher Schwarzer Löcher

Die Beobachtung von AGN in allen möglichen Wellenlängenbereichen elektromagnetischer Strahlung bei sehr hohen kosmologischen Rotverschiebungen legt nahe, dass sie sich schon recht bald im Frühen Universum gebildet haben müssen. AGN sind nichts anderes als aktive, supermassereiche Schwarze Löcher. Damit gestattet die Beobachtung von AGN in unterschiedlichen Epochen (d. h. bei unterschiedlicher kosmologischer Rotverschiebung) ein direktes Studium der AGN-Entwicklung und des **Wachstums Schwarzer Löcher**.

Die unmittelbare Umgebung des Schwarzen Loches gibt intensive Röntgenstrahlung ab. Es bietet sich daher an, bei den Beobachtungen weltraumgestützte Röntgenteleskope zu benutzen. Wie im historischen Abriss kurz beschrieben wurde, erlauben lang belichtete Röntgenfotos von Himmelsausschnitten, die so genannten Tiefenfeldbeobachtungen (engl. *X-ray deep fields*), eine genaue Analyse der AGN-Ära.

Die aktuellen Beobachtungen der Röntgengruppe am MPE sprechen dafür, dass sich die AGN nicht alle auf die gleiche Weise entwickelt haben, sondern die Entwicklung von ihrer Leuchtkraft abhängt! Ein großer Datensatz von knapp 1000 AGN Typ 1, die mit den Röntgensatelliten ROSAT, XMM-Newton und Chandra beobachtet wurden, führt im Energieband von 0.5 bis 2 keV zu folgendem, erstaunlichem Resultat: Bei kosmologisch

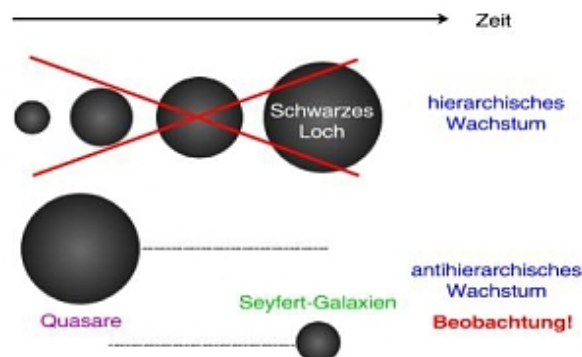


Abbildung 10.1: Wachstum Schwarzer Löcher: erst Quasare, viel später Seyferts.

großen Entfernungen ($z \sim 2$) gibt es besonders viele leuchtkräftige AGN wie die Quasare. Bei kosmologisch kleinen Entfernungen ($z \sim 0.7$) gibt es hingegen besonders viele leuchtschwache AGN wie die Seyfert-Galaxien (*Hasinger, Miyaji & Schmidt* 2005). Die Leuchtkraft ist jedoch ein Maß für die Masse des zentralen Schwarzen Loches, das diese Leuchtkraft über Akkretion erzeugt, wie aus der Eddington-Relation hervorgeht. Macht man sich diesen Zusammenhang zunutze, so folgt, dass sich offensichtlich zuerst die schweren, großen Schwarzen Löcher gebildet haben. Deutlich später bildete sich das Gros der leuchtschwachen AGN. Dieses Phänomen nennt die Fachwelt **antihierarchisches Wachstum Schwarzer Löcher**.

Die Röntgenbeobachtungen wurden auch mit Modellen aus der Theorie erklärt (*Merloni* 2004). Die Modelle zeigen, dass die gemittelte Akkretionsrate aller Schwarzen Löcher zu kleiner kosmologischer Rotverschiebung hin abnimmt. Erst in diesen Epochen kleiner Rotverschiebung können daher die Akkretionsmoden mit kleiner Einfallrate (wie der ADAF und andere *radiatively inefficient accretion flows*, so genannte RIAFs) dominieren - das sind die Seyfert-Galaxien. Die Akkretionsmoden mit hoher Akkretionsrate, wie die Standardscheibe, dominieren in Epochen mit höherer Rotverschiebung - das sind gerade die Quasare.

Was passiert mit den viel schwereren Löchern der leuchtkräftigen AGN im *lokalen* Universum, bei $z \sim 0$? Sie sind noch da! Astronomen beobachten sie in den Zentren der größten Galaxienhaufen, den Galaxiensuperhaufen. Zum Beispiel ist die elliptische Zentralgalaxie M87 im Zentrum des Virgohaufens ($z \sim 0.004$) ein solcher Gigant vom Kaliber der Milliarden-Sonnenmassen-Klasse. Die Beobachtungen beruhen vor allem auf kinematischen Methoden wie der M - σ -Relation (beschrieben im Lexikon unter supermassereiches Schwarzes Loch).

Von theoretischer Seite kommt weitere Unterstützung für dieses Szenario: Im Sommer 2005 wurden die Ergebnisse der **Millennium-Simulation** vorgestellt (*Springel et al.* 2005). Mithilfe von Hochleistungsrechnern wurde die zeitliche Entwicklung eines riesigen Ausschnitts des Universums simuliert. Die Simulation startet bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z = 127$ und berechnet, wie sich knapp zehn Milliarden Teilchen in einem würfelförmigen Volumen mit einer Kantenlänge von knapp 700 Mpc bis zu einer Rotverschiebung von $z \sim 0$ formiert haben. Das wichtigste Ergebnis ist, dass der kalten **Dunklen Materie** die Schlüsselrolle bei der Entstehung großräumiger, kosmischer Strukturen zukommt. Und es stellte sich heraus - um an die Beobachtung im Virgohaufen anzuknüpfen - dass die Zentren der schwersten Galaxienhaufen die besten Orte im Universum sind, um nach den 'Nachfahren' der ersten supermassereichen Schwarzen Löcher zu suchen. Denn in solchen Knotenpunkten hatten sich auch in der Simulation die größten Massen angesammelt.

Wie im Lexikoneintrag Dunklen Materie detaillierter ausgeführt wird, ist es kürzlich auch gelungen, die 3D-Struktur der Dunklen Materie zu kartographieren (*Massey et al.* 2007). Dabei zeigte sich, dass die Dunkle Materie mehr und mehr bei kleiner Rotverschiebung zusammenklumpt, weil sie sich über die Gravitation anzieht.

10.2 Huhn oder Ei?

Nun wissen wir, dass in der Entstehungsgeschichte des Universums anscheinend zuerst die ganz hellen AGN und entsprechend die ganz großen Schwarzen Löcher auftauchten. Aber war zuerst das Loch da oder die umgebende Galaxie? Diese Fragestellung kursiert in der Fachwelt als *hen-egg problem*, also Huhn-oder-Ei-Frage. Denn auch die Biologie fragt sich, ob zuerst ein Huhn da war, das Eier legte, oder zuerst das Ei, aus dem sich ein Huhn entwickelte.

Um diese Frage beantworten zu können, muss ein weiterer Befund angeführt werden: Es muss klar werden, wie sich Sterne entwickelt haben, denn eine Galaxie ist nichts anderes als eine große Ansammlung von Sternen.

Letztendlich müssen die Astronomen nun so vorgehen, dass sie die Anzahl (junger d. h. vor allem blauer) Sterne bei großen kosmologischen Rotverschiebungen zählen. Das gestattet ihnen die Sternentstehungsrate (engl. *star formation rate*, **SFR**) im kosmologischen Rahmen zu bestimmen. Diese Beobachtungen sind optisch durchzuführen und benötigen die scharfen Augen des Weltraumteleskops *Hubble* (HST). Auch hier müssen die Astronomen sehr lange belichten und erhalten Bilder, die *Hubble Deep Fields* genannt werden.

Aus der Analyse dieser tiefen Einblicke ins Universum folgt die Entwicklung der Sternentstehungsrate mit der Rotverschiebung (*Madau 1996, Connolly et al. 1997*). Der Clou ist nun, dass die SFR bei $z \sim 1$ ein Maximum hat - das ist entwicklungsgeschichtlich deutlich später, als das Maximum der Anzahldichte der Quasare (*Hasinger 1997*)! Mit anderen Worten: Diese Vergleiche von tiefen optischen mit tiefen Röntgenbeobachtungen sprechen dafür, **dass die meisten supermassereichen Schwarzen Löcher sich vor den meisten Sternen entwickelt haben!**

10.3 Woher kam das Ei?

Die supermassereichen Schwarzen Löcher erschienen zuerst auf der kosmischen Bildfläche. Wie sind sie genau entstanden? Wie dieser Prozess genau ablief, ist nach wie vor unverstanden. Die Millennium-Simulation lässt darüber spekulieren, ob der Kollaps von Halos aus Dunkler Materie auf Schwarze Löcher geschehen ist. Theoretiker stellen die Hypothese auf, dass kleine Saatlöcher von nur etwa zehn oder vielleicht auch hundert Sonnenmassen bei $z \sim 20$ genug Zeit gehabt hätten, um exponentiell auf die großen Massen im lokalen Universum über Akkretion zu wachsen. In diesem konservativen Szenario wird angenommen, dass die ersten Schwarzen Löcher im Gravitationskollaps extrem massereicher Sterne der **Population III** entstanden. Die **Halos aus Dunkler Materie** stießen zusammen und verschmolzen miteinander. In diesen Gebilden sanken die aus PopIII-Sternen entstandenen kleineren Löcher (*PopIII-Remnants*) in das Zentrum. Gemäß diesem Vorschlag wuchsen die kleinen Löcher in den Halozentren durch Akkretion auf der kosmologischen Skala an. Am Ende einer Milliarden Jahre dauernden Entwicklung stehen dann die superschweren Löcher in den Galaxienzentren, wie sie Astronomen beobachten.

In einem spekulativeren Modell wäre denkbar, dass Mini-Löcher von der atomaren Längenskala über einen Inflationsmechanismus wie ihn das Universum selbst in der Frühphase durchmachte, exponentiell gewachsen sind und über Akkretion schließlich zu den gigantischen Vertretern in AGN wie den Quasaren oder den kleineren Seyfert-Galaxien oder den Zentren normaler Galaxien wurden.

Ebenso darf spekuliert werden, ob superkritische Brill-Wellen kollabiert sind und so die ersten 'Saatlöcher' lieferten.

Eine klassische Idee ist, dass relativistische Sternhaufen auf schwere stellare Schwarze Löcher kollabieren, dadurch dass die Sterne miteinander kollidierten und verschmolzen. Dieser Vorgang heißt in der Astrophysik *Zel'dovich-Podurets-Instabilität*, benannt nach *Y.B. Zel'dovich* und *M.A. Podurets* (Papier: *The evolution of a system of gravitationally interacting point masses*, 1965).

In der Klärung der Entstehung der supermassereichen Schwarzen Löcher ist noch viel Raum

für mutige, aber physikalisch fundierte Spekulationen.

11 Thermodynamik und Hawking-Strahlung

Nach dem bisher Gesagten sollte man glauben, dass Schwarze Löcher nur alles verschlucken können, ob es nun Materie oder Strahlung sei, die ihnen zu nahe kommt. Dem ist nicht so. Der bekannte Astrophysiker und Kosmologe *Stephen W. Hawking* bemerkte Mitte der 1970er Jahre, dass Schwarze Löcher auch Teilchen emittieren können! Diese Hawking-Strahlung ist **kein** rein relativistischer Effekt, sondern nur unter Berücksichtigung der Quantentheorie zu erklären. In diesem Sinne wählte Hawking einen *semiklassischen Ansatz*, weil es damals keine Quantengravitationstheorien gab. Um ein Verständnis dieses Phänomens zu erhalten, muss man weiter ausholen und die historische Vorgeschichte beleuchten: Es wird nun um die Thermodynamik Schwarzer Löcher gehen.

11.1 Wiederentdeckung der klassischen Wärmelehre

Bereits Anfang der 70er Jahre entdeckten *James Bardeen*, *Brandon Carter* und Hawking **thermodynamische Analoga** bei den Schwarzen Löchern, die es ihnen ermöglichten, einen **Temperaturbegriff** und einen **Entropiebegriff** zu definieren. Dabei floss die Vorarbeit von *Jacob D. Bekenstein* ein, der dies in seiner Dissertation 1972 darlegte. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich nur um Analoga handelt, d. h. Größen entdeckt wurden, die ein ähnliches Verhalten haben. Die exakte thermodynamische Temperatur eines Schwarzen Loches muss anders definiert werden. Eine Identifikation dieser analogen Größen ermöglicht es, Pendants zu den Hauptsätzen der Thermodynamik zu formulieren, die **vier Hauptsätze der Theorie Schwarzer Löcher**. Doch welche Parameter eines Schwarzen Loches entsprechen jeweils einem Temperatur-, Entropie- und Energiebegriff?

11.2 Der 2. Hauptsatz

Wie die Diskussion der Schwarzschild- und Kerr-Lösungen sowie die Massenskala Schwarzer Löcher gezeigt hat, wächst der Radius des Ereignishorizontes mit steigender Masse des Schwarzen Loches an, aber fällt hingegen mit zunehmendem Drehimpuls (Rotation) ab.

Verschmelzen zwei Schwarze Löcher, so kann man rechnerisch zeigen, dass die Oberfläche des neuen Horizontes größer ist, als die Summe der Flächeninhalte der einzelnen, kollidierenden Schwarzen Löcher. Dasselbe gilt auch bei den Entropien zweier verschmelzender Systeme in der klassischen Thermodynamik. Es liegt daher nahe, die **Entropie eines Schwarzen Loches** proportional zu der Horizontoberfläche anzunehmen. Wie gesagt, kann man nicht einfach diese Oberfläche so berechnen wie bei einer Kugel mit Radius R , denn der Horizont rotiert außerdem.

Die folgende Gleichung zeigt das Ergebnis für die **Horizontoberfläche** A_H in Abhängigkeit von der Masse M des Schwarzen Loches und seinem Drehimpuls J . Dabei ist $a = J/Mc$ der spezifische Drehimpuls, der auch *Kerr-Parameter* genannt wird:

$$\begin{aligned} A_H(M, a) &= 4\pi [(r_H^+)^2 + a^2] \\ &= 8\pi \frac{GM}{c^2} \left(\frac{GM}{c^2} + \sqrt{\left(\frac{GM}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{J}{Mc}\right)^2} \right) \\ &= 4\pi R_S r_H^+ \end{aligned}$$

Hier sind R_S bzw. r_H^+ die Radien der Ereignishorizonte für ein statisches bzw. rotierendes Loch:

$$\begin{aligned} R_S(M) &= 2GM/c^2 \\ r_H^+(M, a) &= \frac{GM}{c^2} + \sqrt{\left(\frac{GM}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{J}{Mc}\right)^2} \end{aligned}$$

Die Gleichung für A_H muss nur mit Naturkonstanten skaliert werden, um die so genannte Bekenstein-Hawking-Entropie S_H zu erhalten:

$$\begin{aligned} S_H(M, a) &= \frac{k_B c^3}{4G\hbar} A_H(M, a) \\ &= \frac{2\pi k_B c}{\hbar} M \left(\frac{GM}{c^2} + \sqrt{\left(\frac{GM}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{J}{Mc}\right)^2} \right) \end{aligned}$$

Wie die thermodynamische Entropie nimmt die Bekenstein-Hawking-Entropie niemals ab. Dies ist ein Analogon zum zweiten Hauptsatz der Thermodynamik und der **Zweite Hauptsatz der Theorie Schwarzer Löcher**:

[2] *Die Oberfläche des Ereignishorizont Schwarzer Löcher kann nicht mit der Zeit abnehmen.*

11.3 Zahlenbeispiele für Entropien

Setzt man ein statisches, d. h. nicht rotierendes Schwarzes Loch voraus ($a = 0$) folgt eine reine Massenabhängigkeit: eine **quadratische Skalierung mit der Masse**. Setzen wir typische Massen ein, z. B. eine Sonnenmasse (Astrophysik) oder 1 TeV (Teilchenphysik), so zeigt sich, dass die stellaren Schwarzen Löcher gigantische Entropien aufweisen, während Mini-Löcher, wie sie in modernen Teilchenbeschleunigern entstehen könnten (siehe späteres Kapitel Schwarze Löcher in Teilchenbeschleunigern), noch moderate Bekenstein-Hawking-Entropien haben. Supermassereiche Schwarze Löcher sprengen fast die Entropieskala:

$$\begin{aligned} S_H(M, a = 0) &= \frac{k_B c^3}{4\hbar G} A_H(M, a = 0) \\ &= \frac{4\pi G k_B}{\hbar c} M^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\approx 1.05 \times 10^{77} k_B \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^2 \\ &\approx 4.42 \times 10^{10} k_B \left(\frac{Mc^2}{1 \text{ TeV}} \right)^2 \end{aligned}$$

11.4 Paradox!

Diese Zahlenwerte sind rätselhaft, denn die Größenordnung von $10^{77} k_B$ für ein stellares Schwarzes Loch passt gar nicht zu der wesentlich kleineren Entropie des Vorläufersterns. Dieses Missverhältnis nennt man **Entropieparadox** Schwarzer Löcher. Interpretiert man Entropie als **Information**, so folgt die alternative Bezeichnung desselben Sachverhalts als *Informationsverlustparadox*.

Es sei an dieser Stelle die Nebenbemerkung erlaubt, dass die Gravasterne als reguläre Alternative zu Schwarzen Löchern, die überdies keinen Horizont besitzen, diese Paradoxa lösen, weil sie kleinere Entropien haben! Die Gravastern-Entropie wächst nur linear mit der Masse. Das könnte als Hinweis verstanden werden, dass Gravasterne hinsichtlich der Entropie die Natur besser beschreiben als Schwarze Löcher. Allerdings müssten sich die Astrophysiker dann vom Konzept Schwarzes Loch verabschieden!

11.5 Der neue Temperaturbegriff

Während die Entropie Schwarzer Löcher eher geometrisch interpretiert werden kann, hängt die **Temperatur Schwarzer Löcher** mit der *Oberflächengravitation* zusammen. Diese folgt mathematisch gesprochen dem negativen Gradienten des Logarithmus der Lapse-Funktion (in der Regel mit α bezeichnet)

$$g_H = -\nabla \ln \alpha.$$

Die Oberflächengravitation nimmt mit der Rotation eines Kerr-Loches ab. Dies kann man anschaulich so verstehen, dass mit der Rotation zunehmende Zentrifugalkräfte die Oberflächengravitation absenken. Im Falle eines extremen Kerr-Loches ist sie sogar null: die ganze Masse/Energie steckt dann in der Rotation. In diesem Sinne sind nicht rotierende Schwarze Löcher 'heißer'.

Für die Hawking-Temperatur wurde folgende Gleichung abgeleitet:

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M} \quad (11.1)$$

$$\simeq 6.2 \times 10^{-14} \text{ K} \left(\frac{10^6 M_\odot}{M} \right) \quad (11.2)$$

$$\simeq 6.2 \times 10^{-8} \text{ K} \left(\frac{1 M_\odot}{M} \right) \quad (11.3)$$

$$\simeq 1.2 \times 10^{11} \text{ K} \left(\frac{10^{15} \text{ g}}{M} \right) \quad (11.4)$$

$$\simeq 7.7 \times 10^{29} \text{ K} \left(\frac{1 \text{ TeV}}{M} \right) \quad (11.5)$$

$$(11.6)$$

Man gewinnt sie aus der Bekenstein-Hawking-Entropie durch Bildung der partiellen Ableitung nach der Masse bei konstantem Drehimpuls und anschließender Inversion (*Gibbons & Hawking*, 1977). Dies ist gewissermaßen eine *Maxwell-Relation*, wie man sie aus der klassischen Thermodynamik kennt. Die Hawking-Temperatur folgt also 'automatisch' aus thermodynamischen Konzepten, wenn man sich die Bekenstein-Hawking-Entropie beschafft hat! Das ist das Grandiose an diesen Entdeckungen: Sie zeigen die tiefe Verbundenheit der Konzepte in der Natur, ob sie nun in einem irdischen Gas oder in einem Schwarzen Loch ablaufen!

Es ist ersichtlich, dass die Hawking-Temperatur *nur von der Masse des Schwarzen Loches* und den Naturkonstanten Plancksches Wirkungsquantum h , Vakuumlichtgeschwindigkeit c , Boltzmann-Konstante k_B und Gravitationskonstante G abhängt. Zugrundelegung von beispielhaften Zahlenwerten aus Astrophysik und Teilchenphysik zeigen, dass Minilöcher heißer sind als stellare Schwarze Löcher, diese wiederum heißer als supermassereiche Schwarze Löcher.

11.6 Der 0. Hauptsatz

Damit heißt der **Nullte Hauptsatz der Theorie Schwarzer Löcher**:

[0] *Bei einem stationären Schwarzen Loch ist die Oberflächengravitation konstant auf dem Ereignishorizont.*

11.7 Der 3. Hauptsatz

Der **Dritte Hauptsatz der Theorie Schwarzer Löcher**, der ebenfalls auf die Hawking-Temperatur angewendet wird, heißt:

[3] *Ein Zustand, bei dem die Oberflächengravitation eines Schwarzen Loches verschwindet, ist nie erreichbar.*

11.8 Der 1. Hauptsatz

Der noch fehlende **Erste Hauptsatz der Theorie Schwarzer Löcher** verknüpft sämtliche thermodynamische Größen miteinander und ist letztendlich eine Konsequenz der **Energieerhaltung**. Differenziell lautet er:

$$dM_H = T_H dS_H + \Omega_H dJ_H$$

Wie der erste Hauptsatz der Thermodynamik verknüpft er die Begriffe Temperatur, Entropie und Energie miteinander. Nur sind die Analoga in der Theorie Schwarzer Löcher nun die **Hawking-Temperatur** T_H , die **Bekenstein-Hawking-Entropie** S_H und die **Masse** M_H sowie **Rotation** J_H des Schwarzen Loches. Die Hawking-Temperatur und die Lochrotation übernehmen die Rolle *intensiver Variablen*, wie sie in der Terminologie der Wärmelehre heißen. Die Lochrotation muss am Horizont durch das Drehimpulspotential (ω , siehe auch Boyer-Lindquist-Form) bei $r = r_H$ gegeben sein. Allgemein gilt für die Winkelfrequenz am Horizontradius, dass sie gleich $a/(2r_H)$ ist.

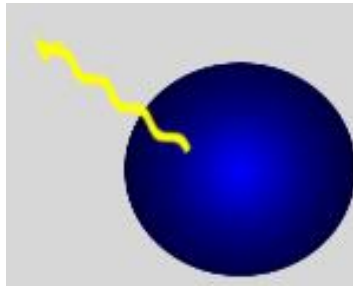


Abbildung 11.1: Hawking-Strahlung.

Wie aus der klassischen Thermodynamik bekannt, emittiert ein Körper endlicher Temperatur **Wärmestrahlung**. Solche Objekte heißen auch Planck-Strahler oder Schwarze Körper (engl. *blackbody*). Man könnte die Hawking-Strahlung einerseits als eine solche Planck-Strahlung interpretieren, die ein Schwarzes Loch mit der Hawking-Temperatur aussendet. Dann wäre sie jedoch nur elektromagnetischer Natur. Hawking-Strahlung besteht aber aus Teilchen, die nahe am Horizont emittiert werden. Eine Erklärung gelingt mit **quantentheoretischen Konzepten**.

11.9 Strahlung aus der Quantenwelt

Hawking ging über die Konzepte der klassischen Theorie Schwarzer Löcher hinaus und machte einen *semiklassischen Ansatz*, indem er Quantenfelder auf dem Hintergrund gekrümmter Metriken untersuchte. Die Felder, die mit Teilchen wie Elektronen, Photonen oder Neutrinos assoziiert sein können, sind quantisiert, **nicht** jedoch die Gravitationsfelder! Sie werden hingegen mit der Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben. In diesem Sinne ist Hawkings Zugang ein Konzept der **semiklassischen Quantengravitation**.

Die Folgen dieser Behandlung sind erstaunlich: während in der klassischen Theorie Schwarze Löcher reine Absorber von Teilchen und Strahlung sind, weil diese hinter dem Ereignishorizont verschwinden, eröffnet der quantenfeldtheoretische Zugang die Möglichkeit, dass Schwarze Löcher auch in einer konstanten Rate Teilchen emittieren, die so genannte **Hawking-Strahlung**. Es sei angemerkt, dass der Terminus *Strahlung* nicht zwingend reine elektromagnetische Emission meint, sondern generell alle möglichen Teilchen. Im Folgenden wird nachskizziert, wie das geschieht - leider sind bei dieser Erklärung einige Grundkenntnisse aus der Quantentheorie vonnöten.

11.10 Skizzierung in Quantensprache

Die Teilchen beschreibt man wie in der Quantenfeldtheorie als **skalare Feldoperatoren**, die die *kanonischen Kommutatorrelationen* erfüllen. Die *Klein-Gordon-Gleichung* wird dann auf gekrümmte Metriken verallgemeinert, indem man gewöhnliche Ableitungen durch kovariante Ableitungen ersetzt. Der Einfachheit halber betrachtet man *masselose* Teilchen. Die Lösungen der **kovarianten Klein-Gordon-Gleichung**

$$\Phi_{;\mu\nu} g^{\mu\nu} = 0$$

haben die vertraute Gestalt mit Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren und ermöglichen die Definition eines Vakuumzustands, also eines energetisch tiefsten Zustands des masselosen Teilchens.

Betrachtet man diesen in verschiedenen orthonormalen Basen, die über die *Bogoliubov-Transformationen* miteinander verknüpft sind, so stellt man fest, dass der Vakuumerwartungswert für den Besetzungszahloperator endlich wird (siehe Gleichung weiter unten). Anders gesagt: eine Anzahl Teilchen ist entstanden! Die Definition eines Vakuumzustands ist in der Relativitätstheorie nicht eindeutig und hängt vom Beobachter ab. Man kann jedoch die Vakuumerwartungswerte vergleichen, wenn man eine gekrümmte Raumzeit annimmt, die in Vergangenheit und Zukunft asymptotisch flach ist. Bei dieser Bilanz stellt man fest, dass **das Gravitationsfeld Teilchen erzeugt** hat, die man Hawking-Strahlung nennt!

11.11 Bitte im Klartext?

Eine anschauliche Interpretationsmöglichkeit lehnt sich an das oben beschriebene quantenfeldtheoretische Konzept eines Quantenvakuums an. Nach der Quantentheorie ist der ganze Raum - auch das Vakuum - gefüllt mit **Paaren virtueller Teilchen** und deren Antiteilchen. Deren Energie ist so gering, dass die Teilchen im Rahmen der **Heisenbergschen Unschärferelation** (Ort-Impuls-Unschärfe, Energie-Zeit-Unschärfe) eine sehr kurze Lebensdauer haben und daher nicht zu messen sind. In diesem Sinne nennt man sie *virtuell*. Ständig annihilieren, d. h. zerstrahlen, diese Teilchen mit ihrem entsprechenden Antiteilchen und bilden sich in Paaren wieder neu. Das Quantenvakuum ist also kein ruhiger Ort, sondern ein komplexes Gebilde, das von virtuellen Teilchen bevölkert ist. In der Fachsprache sprechen die Physiker auch vom *Quantensee*. Indirekt ist dieses Phänomen bei der **Lamb-Shift**, einer Verschiebung der Spektrallinien, im Wasserstoffspektrum messbar. Das bedeutet, dass das Konzept der virtuellen Teilchenpaare *keine Hypothese*, sondern eine im Experiment verifizierte Tatsache ist!

Materialisiert sich nun ein solches Paar nahe des Ereignishorizonts eines Schwarzen Loches, so ist es möglich, dass eines der Teilchen in das Schwarze Loch fällt, während das andere ins Unendliche entweicht. Aus dem virtuellen Teilchen wird so ein reales, ein messbares Teilchen. Stammt die Energie für das virtuelle Teilchenpaar vom Schwarzen Loch, so bietet der Hawking-Effekt eine Möglichkeit Energie aus dem Schwarzen Loch zu extrahieren. Die Lebensdauer Schwarzer Löcher ist also begrenzt! Man sagt, Schwarze Löcher können durch die Emission von Hawking-Strahlung **verdampfen** oder **evaporieren** (engl. *black hole evaporation*).

11.12 Hawking-Strahlung in der Natur

Der Erwartungswert des Besetzungszahloperators der i -ten ausgehenden Mode ist endlich Hawking-Strahlung

$$\langle 0_- | b_i^\dagger b_i | 0_- \rangle = \sum_j |\beta_{ij}|^2.$$

Schwarze Löcher verdampfen also durch die Emission von Hawking-Strahlung. Die Lebensdauer ist allerdings schon für Schwarze Löcher mit Sonnenmasse sehr hoch: es würde

10^{66} Jahre dauern, bis ein solches Schwarzes Loch durch Hawking-Strahlung verdampft wäre! Dies liegt deutlich über dem Alter des Universums (etwa 10^{10} Jahre)!

Die Temperatur eines stellaren Schwarzen Loches ist außerordentlich gering: nur etwa ein Millionstel Kelvin. Supermassereiche Schwarze Löcher in den Kerngebieten von Galaxien und AGN hätten entsprechend noch niedrigere Temperaturen! Eine **direkte Detektion** der Hawking-Strahlung ist damit bei kosmischen Schwarzen Löchern ausgeschlossen. Denn diese schwache Strahlungsform würde durch die heftigen Strahlungsprozesse in der Umgebung, im Vordergrund und im Hintergrund der Quelle einfach untergehen.

Massearme Schwarze Löcher, wie **primordiale Schwarze Löcher** oder **Mini-Löcher**, von denen man annimmt, dass sie sich im frühen Universum bildeten oder noch kleinere, von denen Teilchenphysiker sich versprechen, sie in Teilchenbeschleunigern erzeugen zu können, haben dagegen eine sehr viel kleinere Lebensdauer. Diese Mini-Löcher emittieren mehr als sie absorbieren/akkretieren. Als Konsequenz nimmt ihre Masse sukzessiv ab. Bei einer kritischen Masse von 10^{14} g - was einem kosmisch gesehen sehr kleinen Schwarzen Loch entspricht - würde das Schwarze Loch auf extrem kleinen Zeitskalen von 10^{-23} s seine ganze Ruhemasse abstrahlen: dieser Prozess ist im Prinzip eine Explosion, die 10^{35} erg freisetzt. Diese Energieskala liegt zwar viele Dekaden unterhalb von typischen Supernovae, Hypernovae oder Gamma Ray Bursts, sollte jedoch auf der Distanzskala des frühen Universums beobachtbare, sicherlich rotverschobene Signaturen hinterlassen. Vielleicht detektiert das im Erdbit befindliche Weltraumteleskop *Spitzer* irgendwann diese Spuren primordialer Schwarzer Löcher im Infraroten?

Die Energie der Hawking-Strahlung hängt davon ab, welches Teilchen am Horizont materialisiert. Mit Schrumpfung des Loches durch Hawking-Emission und dem damit verbundenen Temperaturanstieg, wird schließlich die Ruhemasse verschiedener Teilchenspezies überschritten, so dass ein ganzer Teilchenzoo emittiert werden könnte.

Bisher ist der experimentelle Nachweis dieser Strahlung nicht gelungen. Dies liegt vor allem daran, weil diese Strahlung sehr schwach sein muss und von anderen kosmischen Strahlungsquellen, wie zum Beispiel lokalen Quellen (Akkretionsfluss) oder der omnipräsenten kosmischen Hintergrundstrahlung (im lokalen Universum ein Planck-Strahler bei etwa 3 Kelvin) überdeckt wird. Wie die Zahlenbeispiele oben zeigen, ist die direkte Verifikation der Hawking-Strahlung bei kosmischen Schwarzen Löchern höchstwahrscheinlich auszuschließen. Die Hoffnung ihres Nachweises liegt nun vor allem in der Hochenergiephysik. Sollte es gelingen, **künstlich Schwarze Löcher im Labor** zu erzeugen, so müssten Signaturen der Evaporation in modernen Teilchenbeschleunigern messbar sein. Das spekulative Szenario einer **TeV-Quantengravitation** rückt sogar die aktuelle Hochenergiephysik an diese kritische Schwelle. Damit beschäftigt sich das nächste Kapitel.

11.13 Ausblick

Eine offene Frage ist natürlich, wie das Spektrum der Hawking-Strahlung verändert wird, wenn man die man eine **voll quantisierte Behandlung des Problems** ansetzt. Dies erfordert eine quantisierte Gravitationstheorie, eine Quantengravitation. Heute kennt man auf eine solch mächtige Theorie zwei Anwärter: die Stringtheorien und die Loop-Quantengravitation. Das beeindruckende Resultat ist, dass **in beiden Theorien dieselbe Gleichung für die Bekenstein-Hawking-Entropie** abgeleitet werden konnte. Das erweckt den Eindruck, dass die Thermodynamik Schwarzer Löcher auch in diesen neuen Theorien (von

denen die Physiker noch nicht wissen, inwiefern sie die Natur beschreiben) so beschaffen ist, wie sie Hawking vor drei Dekaden semiklassisch abgeleitet hat.

Aus thermodynamischen Gründen ist zu erwarten, dass immer eine Form von Hawking-Emission resultiert, denn ein Körper endlicher Temperatur ist nun mal ein Planck-Strahler. Die exakten mathematischen Zusammenhänge sind eventuell in verschiedenen Quantengravitationstheorien unterschiedlich.

Wie ist weiter vorzugehen? Zunächst muss entschieden werden, ob die aktuellen Kandidaten für eine Quantengravitation wirklich etwas mit der Natur zu tun haben. Das geht nur über den konservativen Weg, den die moderne Naturwissenschaft seit Jahrhunderten geht: Man stelle Hypothesen auf, teste diese an der Natur durch Experimente und Beobachtungen und entwickle daraus eine erfolgreiche Theorie und ein umfassendes naturwissenschaftliches Weltbild.

Erst wenn sich eine Quantengravitation bewährt hat, folgen sichere Aussagen über die Existenz und die Natur der Hawking-Strahlung. Das ist vor allem die theoretische Herangehensweise - von experimenteller Seite muss der Versuch unternommen werden, die Hawking-Strahlung in geeigneten Systemen zu messen. Die neuen Möglichkeiten, die sich hier zu ergeben scheinen, wird das folgende Thema sein.

12 Schwarze Löcher in Teilchenbeschleunigern

Es klingt fantastisch, aber unter gewissen Voraussetzungen könnte es möglich sein, dass Schwarze Löcher als Objekte des Himmels im irdischen Labor hergestellt werden können. Im Unterschied zu den kosmischen Löchern hätten diese Löcher jedoch nur 'Teilchenformat': sie wären winzig klein und vermutlich nur extrem kurzlebig. Das geeignete irdische Labor für diese Aufgabe ist ein Teilchenbeschleuniger. Im Prinzip könnte man sagen: Das, was für die Astronomen das Teleskop ist, ist für den Teilchenphysiker der Teilchenbeschleuniger.

Die Grundidee ist, dass ab einer bestimmten kritischen Energiedichte ein sehr dunkles Objekt erzeugt werden muss, weil es aufgrund seiner Kompaktheit und der damit verbundenen hohen Gravitationsrotverschiebung Strahlung verschluckt. Als Argument muss man nicht einmal *Albert Einsteins* Allgemeine Relativitätstheorie (ART) bemühen, es genügt schon, die Gravitation im Rahmen so genannter metrischer Gravitationstheorien viel allgemeiner zu verstehen. D.h. sobald Gravitation geometrisch gedeutet wird und Massen Krümmungen von Raum und Zeit hervorrufen, **muss** ein nur genügend kompaktes Objekt die Fähigkeit haben, Licht einzufangen.

Die gemachte Einschränkung bezieht sich nun auf folgenden Aspekt: Ob sich tatsächlich ein Ereignishorizont ausbildet oder ein Objekt, dessen Fluchtgeschwindigkeit knapp unterhalb der Lichtgeschwindigkeit liegt, ist eine bisher unbeantwortete Frage. Denn es gibt Alternativen zum klassischen Schwarzen Loch ohne Ereignishorizont, wie Gravastern, Holostern, Bosonenstern oder Fermionenstern. Sie haben eine Fluchtgeschwindigkeit unterhalb der Lichtgeschwindigkeit, so dass sie nicht völlig schwarz sind.

Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie ist anzunehmen, dass bei besonders hohen Energiedichten, die man durch kollidierende Teilchen im Beschleuniger erzeugt, die Raumzeit stark gekrümmt wird. Im klassischen Bild der ART kollidieren bei der Streuung von hochenergetischen Partikeln zwei ebenfrontige Gravitationswellen (so genannte *pp-Wellen*) miteinander. Die Relativisten beschreiben diese Gebilde als 'gravitative Schockwellen' mit einer Aichelburg-Sexl-Metrik (1971). Die Theorie fordert nun, dass bei genügend kleinem Stoßparameter dieser Schockwellen ein Schwarzes Loch entstehen muss. Typische Größenordnungen des kritischen Stoßparameters für die Entstehung eines Schwarzen Loches sind in der Gegend des Schwarzschild-Radius, der sich ergibt, wenn man als Masse die Schwerpunktsenergie der beteiligten hochenergetischen Teilchenbündel annimmt.

12.1 Extradimensionen und reduzierte Planck-Skala

Die entscheidende Frage ist nun, *ab welchen Energien* dies geschieht. Hier kommt eine fundamentale Skala der Physik ins Spiel: die Planck-Skala. Bereits *Max Planck* (1858 - 1947), einer der Gründerväter der Quantentheorie, konnte ableiten, dass bei einer kritischen Masse, der so genannten Planck-Masse, weder Quantentheorie noch Relativitätstheorie eine korrekte Beschreibung liefern. Eine neue quantisierte Gravitationstheorie sei dann nötig, die jedoch noch nicht gefunden wurde. Die Stringtheorien und die Loop-Quantengravitation sind - wie eingangs angedeutet - aussichtsreiche Kandidaten für diese gesuchte Quantengravitation.

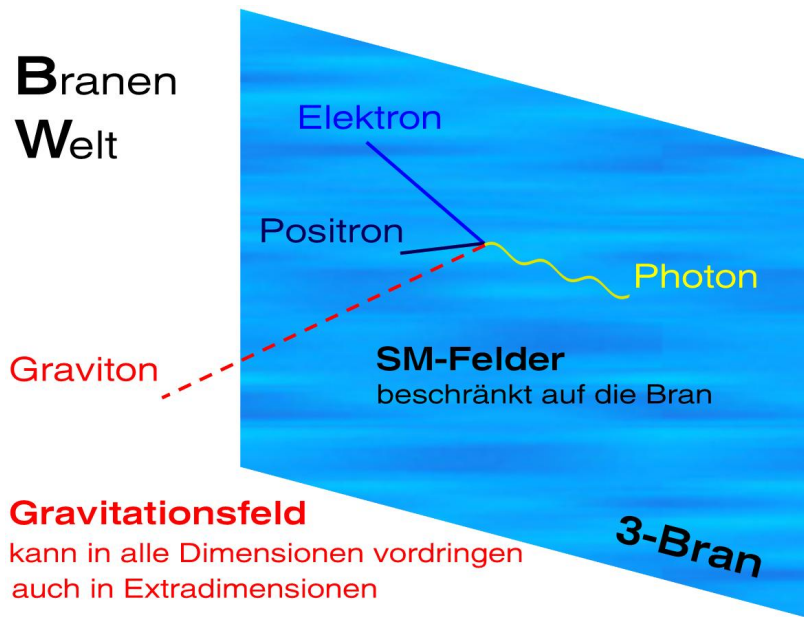


Abbildung 12.1: Dimensionale Beschränkung und Unbeschränkung in der Branen-Welt.

Die Stringtheorien sind höherdimensional und erfordern im Vergleich zur vierdimensionalen Allgemeinen Relativitätstheorie zusätzliche Raumdimensionen. Bislang gibt es diese Extradimensionen nur in der Theorie, und sie konnten **nicht experimentell** bestätigt werden. Die Idee ist, dass sie sich nur bei sehr kleinen Längenskalen auswirken. Die Forscher nennen das **kompaktifizierte Extradimensionen**. Die Kompaktifizierung muss man sich so vorstellen, dass die Extradimensionen 'aufgerollt' sind. Die Gravitation breitet sich in allen Dimensionen aus, so dass bei den typischen Skalen der Extradimensionen Modifikationen zum klassischen Newtonschen Gravitationsgesetz zu erwarten sind. Dies versuchen die Physiker auch in Cavendish-Experimenten mittels hochempfindlicher Drehwaagen und in Experimenten mit Neutronen nachzuweisen - bisher ohne Erfolg.

Die anderen drei Wechselwirkungen - elektromagnetische, schwache und starke Kraft (SM-Felder, also Felder des **Standardmodells** der Teilchenphysik) - sind auf eine Mannigfaltigkeit niedrigerer Dimension beschränkt. Dieses Gebilde nennen Forscher eine 3-Bran und beschreiben es im Rahmen der Stringtheorien. Die Stringtheorien bieten so einen bequemen Formalismus, der die Extradimensionen einbettet.

Die Planck-Masse kann man ableiten, indem man die charakteristischen Längenskalen der Theorien, Gravitationsradius bei der ART und Compton-Wellenlänge bei der Quantentheorie, gleichsetzt. Dann ergibt sich der exorbitant große Wert von 1.2×10^{19} GeV. Diese Energien sind auf absehbare Zeit von keinem Teilchenbeschleuniger zu erreichen. Das Faszinosum ist nun, dass die Extradimensionen die **Planck-Skala reduzieren**: Je mehr Extradimensionen existieren, umso kleiner ist die (nun reduziert genannte) Planck-Masse. Bei typischen angenommenen Werten von 10 Extradimensionen liegt die Planck-Masse bei nur 1 TeV, also einer Billion Elektronenvolt! Das ist gerade die Energieskala der elektroschwachen Theorie: In diesem Energiemilieu vereinigt sich die elektromagnetische mit der schwachen Kraft. Diese verhältnismäßig niedrigen Skalen eröffnen die aufregende Möglichkeit mit

Teilchenbeschleunigern der neusten Generation in dieses Regime zu gelangen und die Extradimensionen zu zählen. Darüber hinaus wären gemessene Extradimensionen ein starker Hinweis (kein Beweis!) auf die Richtigkeit der **Branenmodelle**, also der Stringtheorien.

Die reduzierte Planck-Skala hat eine weitere wichtige Konsequenz: Bereits bei 1 TeV sollten Effekte der Quantengravitation auftreten! Zum Beispiel könnte die Emission von Gravitonen in Teilchenkollisionen angeregt werden. Weil diese wie gesagt nicht nur auf die 3-Bran beschränkt sind, könnte der erstaunliche Effekt eintreten, dass Gravitonen Energie in die Extradimensionen befördern und der Teilchenphysiker einen verletzten Energiesatz misst (siehe Abbildung 12.1, Vorlage von *M. Cavaglia*).

Kommen nun die Schwerpunktsenergien im Kollisionsexperiment in den Bereich der reduzierten Planck-Masse, erwarten Physiker - sollten Extradimensionen wirklich existieren - dass sich so genannte *nicht-perturbative Gravitationsobjekte* (NPGOs) bilden. Hinter diesem Wortungetüm verbirgt sich lediglich, dass die Gravitationsphysik nicht mehr störungstheoretisch zu behandeln ist; als Gravitationsobjekte kommen Branen, Stringbälle und Schwarze Löcher in Frage.

12.2 Gefahr durch Mini-Löcher?

Die Hoffnung vieler Teilchen- und Astrophysiker ist nun, dass bei den Kollisionen hochenergetischer Teilchenstrahlen im irdischen Labor Schwarze Löcher entstehen. Im Rahmen der Stringtheorien tragen sie den englischen Fachausdruck *brane-world black holes*. Wie Berechnungen zeigen, ist die Größe der zu erwartenden Schwarzen Löcher um viele Größenordnungen kleiner als die primordialen Schwarzen Löcher (siehe Die Massenskala Schwarzer Löcher). Der wesentliche Grund ist, dass diese Löcher aus Teilchenstrahlen hervorgehen und daher selbst nur 'Teilchenformat' haben können. Aber sind diese Mini-Löcher nicht trotzdem sehr gefährlich? Verschlingen sie nicht alles, was ihnen zu nahe kommt, sogar den ganzen Teilchenbeschleuniger und schließlich die ganze Erde?

Bei diesen Fragen kommt ein weltbekannter Physiker ins Spiel: *Stephen Hawking*. Der theoretische Astrophysiker begründete in den 1970er Jahren die Thermodynamik Schwarzer Löcher, die im vorangehenden Kapitel besprochen wurde. Mit einem thermodynamischen Argument konnte er ableiten, dass Schwarze Löcher nicht ewig stabil bleiben, sondern durch Teilchenemission langsam zerfallen. Diese heute Hawking-Strahlung genannte Emission ist besonders wichtig bei sehr leichten Schwarzen Löchern, weil diese sehr schnell durch die Aussendung der Strahlung zerfallen (mathematische Einzelheiten unter primordiale Schwarze Löcher im Lexikon). Physiker sagen auch: *Die Schwarzen Löcher evaporieren (zerstrahlen)*. Kurz vor dem Verschwinden des Loches ist die Emission auf sehr kurzen Zeitskalen, so dass es im Prinzip einer Explosion gleichkommt. Mit diesem Argument müssen alle primordialen, etwa bergschweren Schwarzen Löcher, über deren Existenz im frühen Universum spekuliert wird, heute verdampft sein. Die größeren Vertreter der stellaren, mittelschweren und supermassereichen Schwarzen Löcher hingegen können große Zeiträume überdauern.

Die Hawking-Strahlung wurde weder direkt noch indirekt nachgewiesen. Sie wäre jedoch von immenser Bedeutung für künstlich erzeugte Schwarze Löcher in Beschleunigern. Diese 'anthropogenen' - von Menschenhand erzeugten - Schwarzen Löcher sind aufgrund der (makroskopisch beurteilt) geringen Energie der kollidierenden Teilchenstrahlen klein. Deshalb sorgt die Hawking-Strahlung für einen rapiden Zerfall dieser Schwarzen Löcher. Teilchenphysiker berechneten eine Lebensdauer von nur etwa 10^{-24} Sekunden für ein Mini-

Loch von 3 TeV Masse (z. B. *Chamblin et al.* 2004). Diese Lebensdauer ist so kurz, dass die Mini-Löcher keine Gelegenheit haben, in erheblichem Maße Materie aus ihrer Umgebung aufzusammeln. Mit anderen Worten: Mini-Löcher können kaum akkretieren, ehe sie verschwinden.

Verwendet man die Eddington-Akkretionsrate aus den Grundlagen der Akkretionstheorie als Argument, so folgt, dass bei einer typischen Akkretionseffizienz von 10% ein Mini-Loch der Masse 1 TeV gerade einmal 10^{-36} Gramm pro Sekunde aus der Umgebung aufzusammeln könnte. Nimmt man einmal an, dass das Mini-Loch konstant mit dieser Akkretionsrate akkretiert, so hätte es erst nach einigen Trillionen Jahren eine Masse aufgesammelt, die einem einzigen Elektron entspricht! Soviel Zeit hat das Mini-Loch aber nicht, weil es ständig durch die Emission von Hawking-Strahlung Energie und Masse verliert. Anders gesagt: Bei einer Lebensdauer von wenigen Sekundenbruchteilen vermag ein Mini-Loch im Teilchenformat kaum etwas aufzusammeln.

Die Lebensdauer ist weit unterhalb der Hadronisierungszeitskala, so dass ein in der Kollision entstandenes Schwarzes Loch zerfallen wäre, noch bevor sich das umgebende Quark-Gluonen-Plasma (QGP) zu Mesonen und Baryonen umgewandelt (*hadronisiert*) hätte. Typische Schwarze Löcher, die sich am bald eingeschalteten Superbeschleuniger LHC (*Large Hadron Collider*) am CERN bilden könnten, zerstrahlen vollständig bevor sie akkretieren. Insofern stellen diese künstlichen Schwarzen Mini-Löcher **keine Gefahr** für die Beschleunigeranlage und schon gar nicht für die Erde dar.

Es gibt noch ein anderes, davon unabhängiges Argument gegen die Gefährdung der Menschheit: Nicht nur die Menschen stellen energiereiche Strahlung in Teilchenbeschleunigern her; die Natur macht es selbst - und zwar in Form von kosmischer Strahlung. Die dabei erreichten Energien kennen die Hochenergiephysiker aus Beobachtungen mit Luftschauer-Detektoren: Mit 10^7 bis 10^{20} eV Teilchenenergie prasseln die kosmischen Teilchen auf die Erdatmosphäre nieder. Das sind viele Größenordnungen mehr, als die Menschheit wohl jemals künstlich erzeugen können wird. Bei der Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit der Erde kommt es zu heftigen Kollisionen zwischen den Teilchen - und wer weiß: Vielleicht entstand dabei schon so manches Mini-Loch über unseren Köpfen. Einige Forscher spekulieren darüber. In jedem Falle muss vom sicherheitstechnischen Standpunkt festgehalten werden, dass diese Mini-Löcher - sollten sie entstanden sein - die Menschheit offensichtlich *nicht gefährdet* haben (*Carr & Giddings: 'Quantum Black Holes'*, Artikel in *Scientific American* 2005). Das kann die Hochenergiephysiker ermutigen ihre Teilchenenergien zu steigern.

Erst ab gigantischen Energiedichten von 10^{10} GeV/fm⁻³ kann ein Schwarzes Loch durch Partonenabsorption, also 'Verschlucken' umgebender Teilchen, wachsen. Diese Energiedomäne liegt jedoch weit in der Zukunft der Beschleunigerphysik. Sollte die Planck-Masse noch höher liegen als bei 1 TeV, so wird die kritische Energiedichte für Akkretion noch höher.

Als Teilchenstrahlen verwendet man Protonen oder Blei-Ionen. In Blei-Blei-Kollisionen entstehen deutlich mehr Partonen, die absorbiert werden könnten, als in Proton-Proton-Kollisionen, weil die Ausgangskerne nukleonreicher sind. Das Anwachsen des Mini-Lochs durch 'Fressen des QGPs' ist in Blei-Blei-Kollisionen demnach begünstigt.

12.3 So verschwindet ein Mini-Loch

Giddings & Thomas (hep-ph/0106219; neue Publikationen dazu: hep-ph/0205205, hep-th/0409131) stellen folgendes **Szenario für den Ablauf des Zerstrahlens** eines

(möglicherweise rotierenden) Schwarzen Loches zusammen:

- ◇ **Phase 1:** 'Haarausfall' (engl. *balding phase*), d. h. Verlust von Multipolmomenten durch Emission klassischer Gravitationswellen oder Eichbosonen, z. B. Felder des Standardmodells in den 3-Bran oder Gravitonen in alle Dimensionen.
- ◇ **Phase 2:** Verdampfung durch Emission von Hawking-Strahlung, hier mit einer *spin-down Phase* (Verlust des Drehimpulses) und einer *Schwarzschild-Phase* (emittierte Teilchen tragen Signaturen der Entropie und Temperatur des Schwarzen Loches).
- ◇ **Phase 3:** Ende des Schwarzen Loches in der *Planck-Phase* und Emission einiger Teilchen mit charakteristischen Energien für die jeweilige reduzierte Planckskala (abhängig von der Zahl der Extradimensionen).

Sollte sich dieses Szenario als richtig erweisen, würde dies das Ende der Physik kurzer Distanzen (*Giddings & Thomas: end of short-distance physics*) bedeuten, weil sämtliche kleinskalige Effekte hinter dem Ereignishorizont eines Branenwelt-Loches verborgen wären. Möglicherweise wäre dies auch das natürliche Ende der Beschleunigerphysik, weil die Messbarkeit der Teilchenspezies aus diesen Gründen stark beeinträchtigt wäre.

Viele Emissionsprodukte in der Hawkingstrahlung und Folgeereaktionen sind Teilchen des Standardmodells und sollten klassisch beobachtbar sein, aber auch Gravitonen können emittiert werden, die in Extradimensionen entkommen können.

12.4 Moment – Und wenn die Planck-Skala nicht reduziert ist?

Die **Prämisse**, dass Teilchenbeschleuniger zur '**Schwarzlochfabrik**' (engl. *black hole factory*) oder noch allgemeiner gesprochen zur 'Branenfabrik' (engl. *brane factory*) werden, ist also, dass die fundamentale Planck-Skala durch die Existenz von Extradimensionen in den TeV-Bereich gedrückt werden kann (siehe auch ADD-Szenario, DGP-Szenario und Randall-Sundrum-Modelle). Die Dimensionalität ist noch unbekannt und geht als Parameter d ein, der zusätzliche Dimensionen (die Extradimensionen) neben den bekannten vier der klassischen ART zählt. So diskutiert man aktuell $d = 2, 4$ und 7 (entsprechend höherdimensionalen Raumzeiten mit 6, 8 oder 11 Dimensionen). Die kommenden Generationen moderner Teilchenbeschleuniger werden erweisen, wo die Planck-Skala anzusiedeln ist. Aufregend ist in der Tat, dass wir uns mit den modernsten Beschleunigern bereits an der Schwelle einer reduzierten Planck-Skala befinden, um Extradimensionen und Schwarze Löcher im Labor zu testen.

Natürlich ist es im Bereich des Möglichen, dass diese Tests in ein 'Negativ-Resultat' münden, nämlich dass die Existenz von Extradimensionen nicht bestätigt werden kann - das ist das Ergebnis aktueller Experimente zum Nachweis von Zusatzdimensionen (siehe dazu Extradimension). Dies erinnert an das Michelson-Morley-Experiment, dessen Negativ-Resultat die Nichtnachweisbarkeit eines *Weltäthers* war. Der Weltäther wurde damals als das Medium angesehen, in dem sich elektromagnetische Strahlung fortpflanzen sollte. Das Negativ-Resultat *Es gibt keinen Weltäther* inspirierte *Lorentz* zur Lorentz-Transformation und bestätigte *Albert Einstein* in seiner Konzeption einer Relativitätstheorie, die ohne Äther als Trägermedium für Licht auskommt.

Ein Negativ-Resultat für Extradimensionen bestärkt Theorien mit den klassischen drei Raumdimensionen. Eine Theorie, die nun *ohne Extradimensionen* auskommt, ist die Loop-Quantengravitation (LQG). Die LQG quantisiert die Gravitation mit einem völlig anderen Ansatz als die Stringtheorien und wurde seit etwa 1986 im Wesentlichen von den theoretischen Physikern *Abhay Ashtekar*, *Amitaba Sen*, *Ted Jacobson*, *Lee Smolin* und *Carlo Rovelli* entwickelt. Die LQG beschreibt die Raumzeit auf kleinen Skalen. Diese Theorie hat ein anderes theoretisches Fundament als die Stringtheorien: sie basiert auf einer direkten Verknüpfung der Konzepte der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) und der Quantenmechanik (QM). Mit dieser Theorie ist es möglich, die Raumzeit zu quantisieren und ihr eine **körnige Struktur** zuzuweisen. Die kleinsten Einheiten der Raumzeit sind **Volumenquanten**. Ein Ensemble dieser Volumenquanten konstituiert also die Raumzeit und bildet den so genannten Spinschaum. Die Bezeichnung rührt daher, weil die elementaren Bausteine in der LQG, die *Loops*, sich zu so genannten Spin-Netzwerken formieren. Das, was die LQG so attraktiv macht, sind einerseits die sehr anschauliche Quantisierung der Raumzeit, die erneute, alternative Ableitung vieler physikalischer Zusammenhänge (Bekenstein-Hawking-Entropie, Inflation) mit der Möglichkeit einer völlig neuen Interpretation, aber auch klare experimentelle Vorhersagen, die sie macht (geringfügige Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Farbe des Lichts). Sollten die Extradimensionen sich weiterhin einer Nachweisbarkeit in der Natur entziehen, so könnte sich die Loop-Quantengravitation als interessante Alternative erweisen.

12.5 Vertrauen Sie Hawking?

Es bleibt in der Diskussion um die Schwarzen Löcher im Labor eine letzte Unsicherheit: Wer sagt, dass Hawking Recht hat? Hawking-Strahlung wurde bisher nicht experimentell nachgewiesen. Wenn es sie tatsächlich nicht geben sollte, so zerstrahlten Mini-Löcher nicht kurz nach ihrer Erzeugung und könnten grenzenlos wachsen!

Diesem Schreckensszenario sind zwei Gegenargumente entgegenzuhalten: Einerseits muss gesagt werden, dass Hawkings theoretische Abhandlung sehr allgemein ist und auf sehr klaren, physikalischen Annahmen beruht. Es wäre sehr verwunderlich, wenn die gemachten Aussagen über Horizonte keine Gültigkeit hätten. Hawking-Strahlung bei *klassischen* Schwarzen Löchern sollte es tatsächlich geben. Die Hawking-Strahlung ist höchstwahrscheinlich von der *Existenz* eines Ereignishorizonts abhängig - zumindest ist das eine wesentliche Zutat bei der mathematischen Herleitung Hawkings gewesen. Sollte es klassische Schwarze Löcher *mit* Horizont **nicht** in der Natur geben, sondern z. B. die modernen Alternativen Gravastern oder Holostern *ohne* Horizont, so käme vermutlich nicht zur Aussendung von Hawking-Strahlung! Dieses wissenschaftliche Problem bedarf sicher noch einer weiteren Erörterung.

Das klingt dramatisch. Die meisten Astrophysiker favorisieren allerdings nach wie vor die Modelle klassischer Schwarzer Löcher - das ist sozusagen *scientific mainstream*, die wissenschaftliche Hauptströmung. Selbst wenn die modernen horizontlosen Alternativen sich durchsetzen sollten, so gilt andererseits - als zweites Gegenargument - Eddingtons Akkretionsformel, nach der die leichten Mini-Löcher nun mal keine effizienten Akkretoren sind. Selbst ohne Zerstrahlung dauert das Aufsammeln von Material bei 'teilchenartigen Löchern' sehr lange. Deshalb muss aus heutiger Sicht gesagt werden, dass von Schwarzen Mini-Löchern im Labor keine Gefahr droht.

Den letzten Skeptiker in Bezug auf diese Experimente wird beruhigen, dass die Teilchenphysiker an Beschleunigeranlagen sehr gründlich über diese Sicherheitsfragen

nachdenken und die Risiken sowie die Betriebssicherheit abwägen. Anerkannte Experten aus verschiedenen Fachrichtungen prüfen sämtliche Eventualitäten, auch die so genannten *Desasterszenarien*. Es gibt ja nicht nur die potenzielle Gefährdung durch künstliche Schwarze Löcher. Daneben muss auch die Gefährdung durch andere Szenarien geprüft werden, z. B. die Bildung von Vakuuminstabilitäten und Strangelets. Auf der Website des amerikanischen Beschleunigers RHIC gibt es dazu einen interessanten Bericht über Deasterszenarien (in englischer Sprache).

12.6 Bedeutung von Mini-Löchern

Schwarze Löcher im Teilchenformat sind bislang eine Spekulation. Sollte die Produktion von Mini-Löchern gelingen, bietet sich den Physikern ein aufregendes, neues Forschungsfeld: *Black new world!* Dabei sollen die Gefahren wissenschaftlichen Handels klar benannt und Risiken abgewogen werden.

Physik am Rande des Denkbaren birgt immer eine gewisse Unsicherheit und auf experimenteller Seite auch ein gewisses Gefahrenpotenzial. Letztendlich bildet die physikalische Grundlagenforschung keine Ausnahme unter allen Lebensbereichen, wenn man beispielsweise das Gefahrenpotenzial der modernen Medizin (z. B. Gentechnik) oder der Weltpolitik (z. B. Krisenherde) betrachtet.

Es gilt immer das bekannte Prinzip, dass die Risiken mit den Chancen abgewogen werden müssen. Dafür setzen sich Experten weltweit ein und suchen die Diskussion mit der Öffentlichkeit.

Die Chancen der modernen Beschleunigerphysik liegen im Verständnis des Kleinsten, der Elementarteilchen, und im Verständnis des Größten, des Universums. Teilchenbeschleuniger der nächsten Generation rücken viele spannende Konzepte der modernen Physik in die **Reichweite der Überprüfbarkeit**:

- ◇ die Branen-Welt (engl. *brane world*) bzw. die Stringtheorien,
- ◇ die Existenz von Extradimensionen,
- ◇ die Quantisierung der Raumzeit in Loops,
- ◇ Laborphysik mit Schwarzen Löchern,
- ◇ ein **endgültiger Nachweis** des Ereignishorizonts,
- ◇ und die Messung von Hawking-Strahlung, was mit astronomischen Methoden ob ihrer schwachen Intensität nicht möglich ist.

Aktuell suchen die Teilchenphysiker bereits nach Spuren dieser Aspekte in Beschleunigerexperimenten, z. B. am amerikanischen Teilchenbeschleuniger RHIC oder am Tevatron des Fermi-Labs, ebenfalls in den USA. Bedeutsam werden wohl erst die Teilchenbeschleuniger der nächsten Generation sein, z. B. der LHC am CERN, der Ende 2007 den Forschungsbetrieb aufnehmen wird. Eine aufregende Zukunft wird bald Gegenwart: Die Beschleunigerphysik wird die Welt mit spektakulären Meldungen beeindrucken.

13 Zukunft Schwarzer Löcher

Schwarze Löcher haben in unserem Wissen erst vor gut 200 Jahren einen Platz gefunden. Von einer anfangs nebulösen Vorahnung von *John Michell* nahmen sie knapp 100 Jahren in der theoretischen Physik eine wohl definierte Form durch *Karl Schwarzschild* an. Vor etwa 40 Jahren bekamen sie den Namen von *John A. Wheeler* verliehen, unter dem wir sie heute alle kennen und dem wir mit einer Mischung aus Ehrfurcht, Faszination und Unglaublichkeit begegnen.

Schwarze Löcher haben einen **festen Platz in der Astrophysik**. Viele astronomische Beobachtungen kommen nicht ohne diese dunklen, kompakten Massen aus. Die Astronomen vermuten Schwarze Löcher in Röntgendoppelsternen, wie den Mikroquasaren, eventuell sogar in Kugelsternhaufen, jungen Sternhaufen und ULXs, in den Zentren von Galaxien und Aktiven Galaktischen Kernen. Schwarze Löcher unterschiedlicher Massen sind nach herrschender Lehrmeinung unverzichtbar für diese Himmelsobjekte und bisher konkurrenzlos. Die **Rotation** der Schwarzen Löcher spielt in vielen Fällen eine Schlüsselrolle - und ist auch eine natürliche Eigenschaft, weil alle möglichen kosmischen Objekte rotieren.

13.1 Löcher bald im Labor?

Die aktuelle Erforschung Schwarzer Löcher ist auf zwei Bereiche ausgerichtet: Naturgemäß auf das Weltall, aber neuerdings auch auf das irdische Labor, den Teilchenbeschleunigern. Der unzweifelhafte Nachweis künstlich generierter Schwarzer Löcher auf subatomaren Skalen wäre eine physikalische Revolution! Dieser neue Zweig der **Laborphysik Schwarzer Löcher** wäre ein neuer Meilenstein der Physik. Freilich muss dabei die mögliche Gefährdung durch solche Experimente gründlich erörtert werden.

Die aktuellen Modelle der modernen Physik klingen sicherlich abenteuerlich - damit haben sie viel mit avantgardistischen Modellen der Kosmologie gemein. Trotzdem bewegen sie sich im Rahmen des physikalisch Möglichen. Retrospektiv lässt sich sagen, dass es nie einfach war, neue physikalische Konzepte abseits der Hauptforschungstrends zu etablieren. Einsteins Relativitätstheorie sei beispielhaft erwähnt und ist heute über jeden Zweifel erhaben.

13.2 Moderne Alternativen

Neben den klassischen Schwarzen Löchern gibt es weitere kompakte, dunkle Objekte wie Gravasterne, Holosterne, Bosonensterne und Fermionensterne. Diese modernen Alternativen zum klassischen Loch weisen zum Teil sehr attraktive Eigenschaften auf, die die Pathologien Schwarzer Löcher beseitigen: So kommen die Holosterne **ohne Ereignishorizont** aus, und Grava-, Bosonen- und Fermionensterne haben darüber hinaus **keine Krümmungssingularität**. Dennoch ist der Außenraum von der Struktur her vergleichbar zur klassischen, äußeren Schwarzschild-Lösung.

Eine klare Unzulänglichkeit von Grava- und Holostern ist ihre statische Eigenschaft. Das betont die Dominanz der klassischen Kerr-Lösung, die zwar mit Horizont und Singularität ausgestattet ist, die aber **rotiert**. Rotation ist in der Astrophysik die treibende Kraft für beobachtete Phänomene wie Jets. Längst sind die Eigenschaften der Kerr-Geometrie und deren Komplexität nicht vollständig ausgelotet, in Computersimulationen numerisch stabil abgebildet und damit insgesamt verstanden worden. Im Speziellen wird die Berücksichtigung der Strahlungsprozesse in der Akkretionstheorie in Form einer **radiativen** Hydrodynamik und die Magnetohydrodynamik auf dem Hintergrund der Kerr-Metrik der nächste Meilenstein in der theoretischen Forschung Schwarzer Löcher sein. Die Forscher müssen hier zahlreiche Herausforderungen bewältigen, so zum Beispiel kovarianten Strahlungstransport und die komplexe Rückwirkung auf das akkretierte Plasma in Form von Kühlung und Heizung.

13.3 Die kosmologische Bedeutung

In der Kosmologie ist die globale Rolle der Schwarzen Löcher auch noch nicht völlig klar. Ein Hauptproblem ist, wie sie sich und damit die Galaxien in so kurzen Zeiträumen bilden konnten. Wie konnten supermassereiche Schwarze Löcher so schnell entstehen und in so kurzer Zeit so viel Materie ansammeln? Sind die supermassereichen Schwarzen Löcher die 'Geburtshelfer' für Galaxien?

Eine wichtige Erkenntnis ist in diesem Zusammenhang das Schließen der Massenlücke zwischen stellaren und supermassereichen Schwarzen Löchern, indem Astronomen Anzeichen für mittelschwere Schwarze Löcher in Sternhaufen und ULXs fanden. Dieser intermediäre Typus auf der Massenskala könnte durch Verschmelzungsprozesse (*merging*) auf die supermassereichen Spezies führen. Dann wäre hierarchisches Wachstum ein favorisiertes Szenario in der Evolution Schwarzer Löcher. Doch die aktuellen Röntgenbeobachtungen von aktiven Galaxien in den Tiefen des Alls widersprechen dieser Sichtweise: Das Auftreten der leuchtkräftigen Quasare auf der kosmischen Bühne lange bevor Seyfert-Galaxien und normale Galaxien auftauchten, sprechen für ein **antihierarchisches Wachstum der schwersten Löcher**! Diese Form des Wachstums ist mittlerweile auch theoretisch verstanden.

Im Frühen Universum könnten Schwarze Löcher **Kondensationskeime** für Galaxien, Galaxienhaufen und Supergalaxienhaufen gewesen sein. Hier ergibt sich eine ähnliche Problematik, wie bei der Frage: *Wer war zuerst da? Die Henne oder das Ei?*. Denn haben sich zuerst Schwarze Löcher gebildet, die die gravitative Instabilität verstärkten und an denen die Galaxien 'kondensierten'? Oder bildeten sich zuerst die Galaxien, in dessen Zentren dann durch einen Gravitationskollaps und sukzessive Akkretion ein supermassereiches Schwarzes Loch entstand?

Auch auf diese Fragen gibt es Dank moderner Beobachtungstechnologien und Computersimulationen in der Theorie erste Antworten: Die Sternentstehungsrate kulminiert zu deutlich späteren Epochen im Kosmos als die Quasarära! Offensichtlich waren zuerst die Schwarzen Löcher da, und dann erst kamen die ersten Sterne. Diese Resultate sind jedoch noch vorläufig - die Fragen werden in Zukunft mit noch aufwendigeren Beobachtungskampagnen weiterhin gründlich erforscht werden.

Die primordialen Schwarzen Löcher sind noch mehr im Bereich der Spekulationen. Sollten sie tatsächlich existiert haben und sind mittlerweile durch Hawking-Emission zerstrahlt? Könnten sie eine Schlüsselrolle in der Galaxienentstehung oder Kosmologie gespielt haben? Zumindest stellt der Mechanismus der superkritischen Brill-Wellen einen

möglichen Formationsprozess der primordialen Löcher dar. Fortschritt in dieser Problematik versprechen die noch viel kleineren Mini-Löcher der Branenwelt. Ihre mögliche Entdeckung in Teilchenbeschleunigern wird die Erkenntnisse bezüglich Hawking-Strahlung und primordialen Schwarzen Löchern befruchten.

Eine beunruhigende Vorstellung ist es auch, dass Materie und Strahlung, also Energie, im Schwarzen Loch verschwinden. Auf diese Weise wachsen Schwarze Löcher und deren Masseparameter. Damit wächst auch ihr Ereignishorizont, also gewissermaßen die physische Größe Schwarzer Löcher. Wie endet ein Universum? Gibt es irgendwann nur noch einen finsternen Ort, nur noch Schwarze Löcher? Oder sorgt vorher die Kosmologie für einen neuen Urknall, so dass auf wundersame Weise sich der Zyklus des Universums und vielleicht der des Lebens wiederholt? Dem ästhetischen Reiz dieser Idee kann man sich schwer entziehen, doch sollte auf diese Fragen die Physik Antworten liefern. Die aktuelle Antwort der experimentellen Kosmologie ist, dass wir in einem von Dunkler Energie dominierten Kosmos leben, der ewig und sogar beschleunigt expandieren wird. Das Schicksal des Universums ist nach aktuellen Erkenntnissen ein weiteres Auskühlen, an dessen Ende nur noch Schwarze Löcher stehen.

13.4 Masse ohne Materie?

Wenn Materie hinter den Ereignishorizont gelangt: In welcher Form liegt sie dort vor? Kann man irgendwann eine Zustandsgleichung formulieren? Die Gravasterne bieten genau das an: gravitatives Bose-Einstein-Kondensat in Form Dunkler Energie und eine ideale Flüssigkeit - wohl definierte Materiezustände. Auch bei Holosternen ist die Zustandsgleichung im Innern bekannt, nur wird hier ein Konglomerat aus Strings favorisiert. In einfacher Weise bekommt man in beiden Fällen eine Zustandsgleichung. Nach den Erkenntnissen der Quantentheorie wurde es klar, dass die Ringsingularität (Kerr) und auch die Punktsingularität (Schwarzschild) eher eine mathematische Idealisierung als physikalisch, reale Objekte sind. Denn allein aus quantentheoretischen Überlegungen (Unschärferelation) heraus, sollten diese Gebilde eine vielleicht sehr kleine, aber dennoch endliche Ausdehnung haben.

Leider können die Astronomen bisher beobachtungstechnisch weder den Horizont, noch die Singularitäten nachweisen oder widerlegen. Es wird in den nächsten Jahren und Jahrzehnten spannend sein, den Wissenswettlauf zu verfolgen, um zu sehen, welche Vorstellung sich durchsetzen wird. Eine mögliche Erkenntnis könnte dann sein, dass wir uns von der bisherigen Vorstellung Schwarzer Löcher verabschieden müssen.

13.5 Schlussworte

Vor gut 200 Jahren keimte die Idee auf, dass es Schwarze Löcher geben könnte. Vor fast 100 Jahren wurde eine Theorie entdeckt, die eine wissenschaftliche Beschreibung von Schwarzen Löchern gestattet. Vor etwa 40 Jahren wurde den Astrophysikern klar, dass sie ein akkretierendes Schwarzes Loch brauchen, um die hellsten Galaxien im Kosmos verstehen zu können. Vor gut drei Dekaden wurde das erste Objekt am Himmel entdeckt, das die Astronomen für ein Schwarzes Loch halten. Erst seit wenigen Jahren sind sich die Astrophysiker sehr sicher, dass im Zentrum unserer Heimatgalaxie nichts anderes sein kann als ein Schwarzes Loch. In den letzten Jahren wurden Alternativen zum klassischen Schwarzen Loch vorgeschlagen. Wie geht es weiter?

Es gibt kompakte, dunkle Objekte - daran besteht kein Zweifel! Die Kernfrage dabei ist, ob es sich dabei um klassische Schwarze Löcher handelt. Skepsis ist bei neuen Vorschlägen und Ideen ein guter Ratgeber. Mit naturwissenschaftlichen Methoden müssen die Forscher untersuchen, welches Modell schlüssig und überzeugend ist. Dann muss sich diese Theorie erst bewähren - so wie es bei Einsteins Relativitätstheorie der Fall war.

Die Menschen haben in den vergangenen 200 Jahren viel über Schwarze Löcher gelernt. Viele Rätsel bleiben und neue kommen mit jeder gefundenen Antwort hinzu. So ist Wissenschaft.

Wir dürfen versichert sein, dass Schwarze Löcher als das dunkelste Geheimnis der Gravitation für die eine oder andere Schlagzeile immer gut sein werden.

13.6 Hinweis

Im Astro-Lexikon werden online und als pdf-Druckversion 550 Begriffe zum Thema Schwarze Löcher und einiges mehr erläutert. Viele hier genannte Fachbegriffe werden dort eingehend erklärt - viele Links finden Sie bereits im Aufsatz.

13.7 Ein dickes Dankeschön!

- ◇ Dieser Aufsatz über Schwarze Löcher wäre ohne den Fleiß und die Neugier der vielen Forscher nie zustande gekommen. Ihnen gebührt Dank und Anerkennung.
- ◇ Ich möchte meinen ehemaligen Kollegen an der Landessternwarte Heidelberg danken, insbesondere der Theoriegruppe und meinem Doktorvater Prof. Dr. Max Camenzind. Viel hier Gesagtes ist das Resultat meiner Ausbildung, die ich dort genossen habe.
- ◇ Ein großes Dankeschön an Werner Kasper und Sönke Derlin! Unsere mittlerweile langjährigen Diskussionen zu unserem 'Lieblingsthema' und unsere Freude daran die kniffligen Fragen lösen zu wollen, haben diesen Aufsatz sehr befruchtet.
- ◇ Ebenso danke ich den vielen aufmerksamen Lesern meiner Website, die mit fast unzählbaren Hinweisen und Anfragen zum Gelingen dieses Artikels beigetragen haben. Neugier ist der Motor für Fortschritt und Erkenntnis.
- ◇ Ich fühle mich Dr. Michael Petri (Bundesamt für Strahlenschutz) zu großem Dank verpflichtet, weil wir einige spannende, moderne Aspekte der Schwarzen Löcher erörtern, die im Spannungsfeld zwischen klassischem Schwarzes Loch und Holostern stehen.
- ◇ Besten Dank an Dr. Bernd Aschenbach (MPE) für die aufschlussreichen Diskussionen über die Kerr-Geometrie.
- ◇ Mit Prof. Dr. Richard Conn Henry (Johns Hopkins University, USA), habe ich sehr interessante Diskussionen über Krümmungsinvarianten führen können. Diese Verfahren tragen besonders zum Verständnis des Inneren Schwarzer Löcher bei - vielen Dank dafür.
- ◇ Ich danke besonders Prof. Dr. Günther Hasinger, Direktor der Abteilung für Röntgen- und Gammaastronomie am MPE Garching. Durch sein Engagement und Vertrauen ist es mir möglich, weiterhin an der aktuellen Erforschung Schwarzer Löcher mitzuwirken.

- ◇ Schließlich danke ich herzlich Prof. Dr. Roy Patrick Kerr (University of Canterbury, Christchurch, Neuseeland), dass er die Astrophysik mit einer so bedeutenden Lösung der Einstein-Gleichung beglückt hat. Es war ein ganz besonderes Erlebnis für mich persönlich, beim Black Hole Meeting 2006 in Santa Fe mit Roy zu plaudern. Vielen Dank auch für die Autorisation zum Abdruck seines Fotos.

14 Literatur

14.1 vom Autor

- ◇ Müller, A. **Wirbel der Raumzeit - Die Astrophysik rotierender Schwarzer Löcher**, populärwissenschaftlicher Artikel in der Fachzeitschrift *Sterne und Weltraum*, Ausgabe: Oktober 2004; Download pdf
- ◇ Camenzind, M. & Müller, A. **Kerr Black Holes**, Kapitel 7 der Vorlesung *General Relativity*, Universität Heidelberg, 2004
- ◇ Müller, A. & Camenzind, M. **Relativistic emission lines from accreting black holes – The effect of disk truncation on line profiles**, A&A 413, 861-878 (2004) oder astro-ph/0309832 (2003)
- ◇ Müller, A., Dissertation: **Black Hole Astrophysics: Magnetohydrodynamics on the Kerr geometry** (Oktober 2004, komplett in englischer Sprache, 182 Seiten, 33 Farabbildungen, 20 s/w Abbildungen, inklusive Index), Download pdf (9.9 MB)
- ◇ Hasinger, G. & Müller, A. **Active Cores in Deep Fields**, erschienen in: Proceedings zum Symposium der Internationalen Astronomischen Union Nr. 230, *Populations of High Energy Sources in Galaxies*, Aug 15-19 2005, Dublin, Eds E.J.A. Meurs & G. Fabbiano; pdf, preprint pdf
- ◇ Müller, A. & Hasinger, G. **Iron K lines of AGN in the X-ray background**, erschienen in: Proceedings zu *Einstein's Legacy - International conference on relativistic astrophysics and cosmology*, 7.-11.11.05 in München, Editoren: B. Aschenbach, V. Burwitz, G. Hasinger (MPE) & B. Leibundgut (ESO)
- ◇ Müller, A. & Wold, M. **On the Signatures of Gravitational Redshift: The Onset of Relativistic Emission Lines**, A&A 457, 485, 2006; preprint pdf
- ◇ Müller, A. **The onset of General Relativity: Gravitationally redshifted emission lines**, erschienen in den *Astronomischen Nachrichten* 327, 1024-1027, 2006; Proceedings zum ESAC/XMM-Newton Science Operations Centre Workshop *Variable and Broad Iron Lines around Black Holes*, 26.-28.06.06 in Madrid; preprint pdf
- ◇ Müller, A. **Experimental Evidence of Black Holes**, eingeladener Seminarvortrag bei der *School on Particle Physics, Gravity and Cosmology*, 21.08.-02.09.06 in Dubrovnik, erschienen in: *Proceedings of Science* (P2GC) 017, 2007; Editors: L. Bonora, S. Fajfer, R. Iengo, D. Klabucar, S. Pallua, I. Picek; pdf, preprint pdf

14.2 andere Autoren

14.2.1 wissenschaftliche Veröffentlichungen

A

- ◇ Abramowicz, M.A., Kluzniak, W. & Lasota, J.-P., **No observational proof of the black-hole event-horizon**, A& A 396, L31, 2002
- ◇ Alcubierre, M., Benger, W., Brüggmann, B., et al., **The 3D Grazing Collision of Two Black Holes** (2000), gr-qc/0012079
- ◇ Ashtekar, A., **How Black Holes Grow** (2003), gr-qc/0306115
- ◇ Ashtekar, A. & Krishnan, A., **Dynamical Horizons and their Properties** (2003), gr-qc/0308033
- ◇ Ashtekar, A. & Krishnan, A., **Isolated and dynamical horizons and their applications** (2005), gr-qc/0407042
- ◇ Arkani-Hamed, N., Dimopoulos, S. & Dvali, G., **The Hierarchy Problem and New Dimensions at a Millimeter** (1998), hep-ph/9803315
- ◇ Armitage, P.J. & Reynolds, C.S., **The variability of accretion on to Schwarzschild black holes from turbulent magnetized discs**, MNRAS 341, 1041, 2003
- ◇ Aschenbach, B., Grosso, N., Porquet, D. & Predehl, P., **X-ray flares reveal mass and angular momentum of the Galactic Center black hole** (2004), astro-ph/0401589
- ◇ Aschenbach, B., **Measuring mass and angular momentum of black holes with high-frequency quasi-periodic oscillations** (2004), astro-ph/0406545
- ◇ Aschenbach, B., **Mass and Angular Momentum of Sgr A*** (2004), astro-ph/0410328

B

- ◇ Balbus, S.A., **Enhanced Angular Momentum Transport in Accretion Disks** (2003), astro-ph/0306208
- ◇ Banks, T. & Fischler, W., **A Model for High Energy Scattering in Quantum Gravity** (1999), hep-th/9906038
- ◇ Bardeen, J.M., Carter, B. & Hawking, S.W., **The four laws of black hole mechanics**, Commun. Math. Phys. 31, 161, 1973
- ◇ Blandford, R.D. & Znajek, R.L., **Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes**, MNRAS 179, 433, 1977
- ◇ Bolton, C.T., **Identifications of Cyg X-1 with HDE 226868**, Nature 235, 271, 1972
- ◇ Bojowald, M., Goswami, R., Maartens, R. & Singh, P., **A black hole mass threshold from non-singular quantum gravitational collapse** (2005), gr-qc/0503041

- ◇ Bojowald, M., **Nonsingular Black Holes and Degrees of Freedom in Quantum Gravity** (2005), gr-qc/0506128
- ◇ Boyer, R.H. & Lindquist, R.W., J. Math. Phys. 8, 265, 1967

C

- ◇ Camenzind, M., **Centrifugally driven MHD-winds in active galactic nuclei**, A&A 156, 137, 1986
- ◇ Carter, B., **Global Structure of the Kerr Family of Gravitational Fields**, Phys. Rev. 174, 1559, 1968
- ◇ Cavaglia, M., **Black Hole and Brane Production in TeV Gravity: A Review** (2002), hep-ph/0210296
- ◇ Chamblin, A., Cooper, F. & Nayak, G.C., **Interaction of a TeV scale black hole with the quark-gluon plasma at LHC** Phys. Rev. D69, 065010, 2004; hep-ph/0301239
- ◇ Chapline, G., Hohlfeld, E., Laughlin, R.B. & Santiago, D.I., **Quantum phase transitions and the breakdown of classical GR** (2000), gr-qc/0012094
- ◇ Conn Henry, R., **Kretschmann Scalar for a Kerr-Newman Black Hole**, ApJ 535, 350, 2000
- ◇ Cunningham, C.T. & Bardeen, J.M., **The optical appearance of a star orbiting an extreme Kerr black hole**, ApJ 183, 237, 1973

D

- ◇ De Villiers, J.-P. & Hawley, J.F., **Three-dimensional Hydrodynamic Simulations of Accretion Tori in Kerr Spacetimes** (2002), astro-ph/0204163
- ◇ De Villiers, J.-P. & Hawley, J.F., **A Numerical method for General Relativistic Magnetohydrodynamics** (2002), astro-ph/0210518
- ◇ De Villiers, J.-P. & Hawley, J.F., **Magnetically Driven Accretion Flows in the Kerr Metric I: Models and Overall Structure** (2003), astro-ph/0307260
- ◇ Dimopoulos, S. & Landsberg, G., **Black Holes at the LHC** (2001), hep-ph/0106295

E

- ◇ Eckart, A., Ott, T. & Genzel, R., **The Sgr A* Stellar Cluster: New NIR Imaging and Spectroscopy** (1999), astro-ph/9911011
- ◇ Eckart, A., Genzel, R., Ott, T. & Schoedel, R., **Stellar Orbits Near Sagittarius A*** (2002), astro-ph/0201031
- ◇ Eddington, A.S., **On the relation between the masses and luminosities of the stars**, MNRAS 84, 308, 1924

- ◇ Eddington, A.S., **On relativistic degeneracy**, MNRAS 95, 194, 1935
- ◇ Eddington, A.S., **Note on relativistic degeneracy**, MNRAS 96, 20, 1935

F

- ◇ Falcke, H., Melia, F. & Agol, E., **Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center** (1999), astro-ph/9912263
- ◇ Fanton, C., Calvani, M. & Cadez, A., **Detecting Accretion Disks in Active Galactic Nuclei**, PASJ 49, 159, 1997
- ◇ Finkelstein, D., **Past-Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle**, Phys. Rev. 110, 965, 1958

G

- ◇ Gammie, C.F., McKinney, J.C., **HARM: A Numerical Scheme for General Relativistic Magnetohydrodynamics** (2003), astro-ph/0301509
- ◇ Gammie, C.F., **The Magnetorotational Instability in the Kerr metric** (2004), astro-ph/0406532
- ◇ Gebhardt, K., Rich, R.M. & Ho, L.C., **An Intermediate-Mass Black Hole in the Globular Cluster G1: Improved Significance from New Keck and Hubble Space Telescope Observations** (2005), astro-ph/0508251
- ◇ Genzel, R., Pichon, C., Eckart, A., Gerhard, O.E. & Ott, T., **Stellar Dynamics in the Galactic centre: Proper Motions and Anisotropy** (2000), astro-ph/0001428
- ◇ Genzel, R., Schoedel, R., Ott, T., Eckart, A., Alexander, T., Lacombe, F., Rouan & Aschenbach, B., **Near-infrared flares from accreting gas around the supermassive black hole at the Galactic Centre** (2003), astro-ph/0310821
- ◇ Gibbons, G.W. & Hawking, S.W., **Cosmological event horizons, thermodynamics, and particle creation**, Phys. Rev. D 15, 10, 1977
- ◇ Giddings, S.B. & Thomas, S., **High Energy Colliders as Black Hole Factories: The End of Short Distance Physics** (2001), hep-ph/0106219

H

- ◇ Hasinger, G., **The X-ray background and the AGN X-ray luminosity function** (1997), astro-ph/9712342
- ◇ Hasinger, G., **The X-ray background and AGNs** (2003), astro-ph/0310804
- ◇ Hasinger, G., **When Supermassive Black Holes were growing: Clues from Deep X-ray Surveys** (2004), astro-ph/0412576
- ◇ Hasinger, G., Miyaji, T. & Schmidt, M., **Luminosity-dependent evolution of soft X-ray selected AGN** (2005), astro-ph/0506118

- ◇ Hawking, S.W., **Particle creation by black holes**, Commun. Math. Phys. 43, 199, 1975
- ◇ Hawley, J.F. & De Villiers, J.-P., **General Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations of Black Hole Accretion Disks** (2004), astro-ph/0402665
- ◇ Hirose, S., Krolik, J.H., De Villiers, J.-P. & Hawley, J.F., **Magnetically Driven Accretion Flows in the Kerr Metric II: Structure of the Magnetic Field** (2003), astro-ph/0311500

I

- ◇ Ioka, K. & Sasaki, M., **Relativistic stars with poloidal and toroidal magnetic fields and meridional flows** (2003), astro-ph/0305352

J

- ◇ Jacobson, T. & Smolin, L., Phys. Lett. B196, 39, 1987
- ◇ Jacobson, T. & Smolin, L., Nucl. Phys. B299, 295, 1988

K

- ◇ Kerr, R.P., **Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics**, Phys. Rev. Lett. 11, 237, 1963
- ◇ Khanna, R., **On the magnetohydrodynamic description of a two-component plasma in the Kerr metric**, MNRAS 294, 673, 1998
- ◇ Koide, S., Shibata, K. & Kudoh, T., ApJ 522, 727, 1999
- ◇ Koide, S., Meier, D.L., Shibata, K. & Kudoh, T., **General Relativistic Simulations of Jet Formation by a Rapidly Rotating Black Hole** (1999), astro-ph/9907434
- ◇ Komossa, S. & Schulz, H., **The nature of the luminous X-ray emission of NGC 6240** (1999), astro-ph/9902313
- ◇ Komossa, S., **X-rays from the environment of supermassive black holes in active galaxies** (2001), astro-ph/0101289
- ◇ Komossa, S., **X-ray Evidence for Supermassive Black Holes in Non-Active Galaxies** (2001), astro-ph/0109441
- ◇ Komossa, S., Burwitz, V., Hasinger, G., Predehl, P., Kaastra, J.S. & Ikebe, Y., **Discovery of a binary AGN in the ultraluminous infrared galaxy NGC 6240 using Chandra** (2002), 0212099
- ◇ Komossa, S., Halpern, J., Schartel, N., Hasinger, G., Santos-Lleo, M. & Predehl, P., **A Huge Drop in X-ray Luminosity of the Non-Active Galaxy RXJ1242.6-1119A, and First Post-Flare Spectrum - Testing the Tidal Disruption Scenario** (2004), astro-ph/0402468

- ◇ Krolik, J.H., Hawley, J.F. & Hirose, S., **Magnetically Driven Accretion Flows in the Kerr Metric IV: Dynamical Properties of the Inner Disk** (2004), astro-ph/0409231

- ◇ Kruskal, M.D., Phys. Rev. 119, 1743, 1960

L

- ◇ Lynden-Bell, D., **Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars**, Nature 223, 690, 1969
- ◇ Lynden-Bell, D. & Rees, M.J., **On quasars, dust and the galactic centre**, MNRAS 152, 461, 1971

M

- ◇ Manko, V.S., Mielke, E.W. & Sanabria-Gomez, J.D., **Exact solution for the exterior field of a rotating neutron star** (2000), gr-qc/0001081
- ◇ Massey, R. et al., **Dark matter maps reveal cosmic scaffolding**, Nature 445, 286, 2007
- ◇ Mathur, S.D., **Where are the states of a black hole?** (2004), hep-th/0401115
- ◇ Mazur & Mottola, **Gravitational condensate stars: An alternative to black holes** (2001), gr-qc/0109035
- ◇ Mazur & Mottola, **Weyl cohomology and the effective action for conformal anomalies**, Phys. Rev. D64, 104022, 2001
- ◇ McHardy, I.M. et al., **Active galactic nuclei as scaled-up Galactic black holes**, Nature 444, 730, 2006
- ◇ Merloni, A., Heinz, S. & di Matteo, T., **A Fundamental Plane of black hole activity**, MNRAS 345, 1057, 2003
- ◇ Merloni, A., **The anti-hierarchical growth of supermassive black holes**, MNRAS 353, 1035, 2004

N

- ◇ Narayan, R. & Yi, I., **Advection-dominated accretion: A self-similar solution**, ApJ 428, 13, 1994
- ◇ Narayan, R., **Black Holes in Astrophysics** (2005), gr-qc/0506078
- ◇ Newman, E.T., Couch, E., Chinnapared, K., Exton, A., Prakash, A. & Torrence, R., J. Math. Phys. 6, 918, 1965
- ◇ Nordstrøm, G., Proc. Kon. Ned. Akad. Wet. 20, 1238, 1918

O

- ◇ Oppenheimer, J.R. & Volkoff, G., **On Massive Neutron Cores**, Phys. Rev. 55, 374, 1939
- ◇ Oppenheimer, J.R. & Snyder, H., **On Continued Gravitational Contraction**, Phys. Rev. 56, 455, 1939
- ◇ Ott, T., Schoedel, R., Genzel, R., et al., **Inward Bound: Studying the Galactic Centre with NAOS/CONICA** (2003), astro-ph/0303408

P

- ◇ Paczynski, B. & Wiita, P.J., **Thick accretion disks and supercritical luminosities**, A&A 88, 23, 1980
- ◇ Papadopoulos, P. & Font, J.A., **Analysis of relativistic hydrodynamics in conservative form** (1999), gr-qc/9912054
- ◇ Penrose, R., **Gravitational Collapse and Space-Time Singularities**, Phys. Rev. Lett. 14, 57, 1965
- ◇ Petri, M., **The holostar - a self-consistent model for a compact self-gravitating object** (2003), gr-qc/0306066
- ◇ Petri, M., **Charged holostars** (2003), gr-qc/0306068
- ◇ Petri, M., **The holographic solution - Why general relativity must be understood in terms of strings** (2004), gr-qc/0405007
- ◇ Petri, M., **Are we living in a string-dominated universe?** (2004), gr-qc/0405011
- ◇ Porquet, D., Predehl, P., Aschenbach, B., Grosso, N., et al., **XMM-Newton observation of the brightest X-ray flare detected so far from SgrA*** (2003), astro-ph/0307110

R

- ◇ Reissner, H.J., Ann. Phy. 50, 106, 1916
- ◇ Rindler, W., **Visual horizons in world models**, MNRAS 116, 662, 1956

S

- ◇ Schoedel, R., Ott, T. & Genzel, R., **Closest Star Seen Orbiting the Supermassive Black Hole at the Centre of the Milky Way** (2002), astro-ph/0210426
- ◇ Schwarzschild, K., **Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie** (1916), physics/9912033, 1999 ins Englische übersetzt
- ◇ Schwarzschild, K., **Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie** (1916), physics/9905030, 1999 ins Englische übersetzt

- ◇ Shakura, N.I. & Sunyaev, R.A., **Black holes in binary systems. Observational appearance.**, A& A 24, 337, 1973
- ◇ Siebenmorgen, R., Haas, M., Krügel, E. & Schulz, B., **Discovery of 10 micron silicate emission in quasars**, A& A 436, L5, 2005
- ◇ Synge, J.L., **The gravitational field of a particle**, Proc. R. Irish. Acad. A 53, 83, 1950
- ◇ Szekeres, G., Publ. Mat. Debrecen 7, 285, 1960

T

- ◇ Tanaka, Y., Nandra, K., Fabian, A.C., et al., Nature 375, 659, 1995

U

- ◇ Unruh, W.G., Phys. Rev. D14, 870, 1976
- ◇ Unruh, W.G. & Wald, R.M., Phys. Rev. D29, 1047, 1984

V

- ◇ Vigelius, M., **Structure and Stability of Gravastars**, Diplomarbeit LSW Heidelberg 2004
- ◇ Volovik, G.E., **Superfluid analogies and cosmological phenomena**, (2000), gr-qc/0005091

Z

- ◇ Zel'dovich, Y.B. & Novikov, I.D., Sov. Phys. Dokl. 158, 811, 1964

Anmerkung: Hier sind die Papiere als Preprints angegeben, um *jedem* Interessenten den Zugang zu den meisten Ressourcen über das Internet zu erleichtern. Vom ePrint-Server kann das Dokument als pdf oder ps heruntergeladen werden. Unter der Rubrik 'Comments' kann die begutachtete Version der Veröffentlichung im betreffenden Journal aufgefunden werden. Ältere oder andere Werke, die nicht auf dem ePrint-Server liegen, findet man bei ADS.

14.2.2 Bücher

- ◇ Camenzind, M., **Compact Objects in Astrophysics. White Dwarfs, Neutron Stars and Black Holes**, Springer Berlin, 2007
- ◇ Chandrasekhar, S., **The Mathematical Theory of Black Holes** (1983), Clarendon Press, New York
- ◇ Hawking, S.W., **The Event Horizon** (1973), from *Black Holes*, eds. Dewitt, Gordon and Breach
- ◇ Misner, W., Thorne, K.S. & Wheeler, J.A., **Gravitation** (1973), Freeman San Francisco

Bitte beachten Sie auch die Buchbesprechungen unter Literatur für die Astrophysik.

14.2.3 Skripte

- ◇ Camenzind, M., **Physik Rotierender Schwarzer Löcher** (2001), LSW Heidelberg

Kontakt

Dr. Andreas Müller

Technische Universität München (TUM)
Exzellenzcluster Universe
Boltzmannstraße 2
D-85748 Garching
Germany

<http://www.universe-cluster.de>

andreas.mueller@universe-cluster.de

+49 (0)89 - 35831 - 71 - 04