

**Kleine
Naturwissenschaftliche
Bibliothek**

LEIPZIG



NOWIKOW

**Schwarze Löcher
im All**

Schwarze Löcher im All

I. D. NOWIKOW

4. Auflage

Mit 11 Abbildungen



Verlag MIR, Moskau

BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft

Leipzig 1989

Kleine Naturwissenschaftliche Bibliothek · Band 47

ISSN 0232-346X

Autor:

Igor Dmitrijewitsch Nowikow
Dr. der physik.-math. Wissenschaften,
Institut für kosmische Forschungen, Moskau

Titel der Originalausgabe:

Чёрные дыры во Вселенной
Verlag Snanije, Moskau 1977
Mit Ergänzungen vom Autor, 1980

Deutsche Übersetzung: Dr. S. Gottlöber, Potsdam
Wissenschaftliche Redaktion: Dr. J. Mückel, Potsdam

Novikov, Igor' Dmitrievič:

Schwarze Löcher im All / I. D. Nowikow. Dt. Übers.
S. Gottlöber. Wiss. Red. J. Mückel.–4. Aufl.–Moskau:
Verl. MIR; Leipzig: BSB Teubner, 1989.–88 S.; 11 Abb.
(Kleine Naturwissenschaftliche Bibliothek; 47)
EST: Čěrnje дыry vo Vselennoj <dt.>
NE: GT; EST

ISBN-13: 978-3-322-00326-3

e-ISBN-13: 978-3-322-82213-0

DOI: 10.1007/978-3-322-82213-0

Gemeinschaftsausgabe des Verlages MIR, Moskau, und des
BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig

© Издательство «Знание», 1977 г.

© Verlag MIR, Moskau, und BSB B. G. Teubner
Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1981

4. Auflage

VLN 294-375/109/89·LSV 1499

Lektor: Dipl.-Met. Christine Dietrich

Satz und Druck: UdSSR

Bestell-Nr. 666 035 4

00550

Vorwort

Viele meiner Bekannten, sowohl Physiker als auch Nichtphysiker und Menschen, denen die Naturwissenschaften sehr fernstehen, beginnen, wenn wir uns treffen, in den letzten Jahren des öfteren das Gespräch mit der Frage: „Wie ist das nun mit euch? Habt ihr denn nun die Schwarzen Löcher gefunden?“ oder „Was habt ihr Neues über die Schwarzen Löcher erfahren?“

Das Interesse an diesen Objekten ist nicht zufällig. Sie regen die Vorstellungskraft von Wissenschaftlern an und die aller Menschen, die sich für die modernen Errenschaften der Wissenschaft interessieren.

Die Schwarzen Löcher¹ sind eine der erstaunlichsten theoretischen Entdeckungen der Wissenschaft. Der bekannte theoretische Physiker K. S. Thorne schreibt über die Schwarzen Löcher folgendes: „Von allen Erfindungen des menschlichen Hirns, von den Einhörnern und Chimären angefangen bis zur Wasserstoffbombe, ist sicherlich die phantastischste die Vorstellung eines Schwarzen Loches, das abgetrennt ist vom übrigen Raum durch eine wohlbestimmte Grenze, die durch nichts durchbrochen werden kann; Löcher, die so ein starkes Gravitationsfeld besitzen, daß sogar durch ihren Würgegriff das Licht festgehalten wird; Löcher, die den Raum krümmen und die Zeit bremsen. Ähnlich den Einhörnern und Chimären scheint das Schwarze Loch seinen Platz eher in phantasti-

¹ Da die Bezeichnung „Schwarze Löcher“ für die weiterhin betrachteten Objekte heute allgemein üblich ist, werden wir sie künftig ohne Anführungszeichen benutzen ähnlich den Bezeichnungen für andere neue kosmische Objekte wie Quasare, Pulsare usw. (die auch in Anführungszeichen ihren „Weg“ in die Astronomie begannen).

schen Romanen oder den Legenden des Altertums zu haben als im realen Kosmos. Nichtsdestoweniger fordern die Gesetze der modernen Physik geradezu, daß Schwarze Löcher existieren. Es ist möglich, daß allein in unserer Galaxis Millionen von ihnen enthalten sind.“

Was sind das nun für Objekte, warum besitzen sie soviel erstaunliche Eigenschaften, warum sind sie schließlich so wichtig für die Wissenschaft? Den Antworten auf diese Fragen ist das vorliegende Büchlein gewidmet.

Der Autor

Inhalt

Die Vorgeschichte der Entdeckung	6
Die Gravitationstheorie Einsteins	7
Die Physiker sagen das Schwarze Loch voraus	11
Die Zeit verlangsamt ihren Lauf	14
Die Himmelsmechanik im Schwerfeld eines Schwarzen Loches	17
Der Lichtstrahl im Schwerfeld eines Schwarzen Loches	22
Gesichtslose Schwarze Löcher	23
Das rotierende Schwarze Loch	25
Ein Schwarzes Loch wird niemals kleiner	32
Kann man Energie aus nichtrotierenden Schwarzen Löchern erhalten?	36
Die „Gravitationsbombe“	37
Was ereignet sich innerhalb eines Schwarzen Loches?	40
Nichts ist einfacher und nichts komplizierter als Schwarze Löcher	47
Schwarze Löcher müssen im Weltall existieren	48
Wieviel Schwarze Löcher gibt es in der Galaxis?	53
Wie sucht man Schwarze Löcher?	54
Die mögliche Entdeckung eines Schwarzen Loches	58
„Supermassive“ Schwarze Löcher	62
Schwarze Minilöcher und Weiße Löcher	64
Teilchenerzeugung im Vakuum	65
Schwarze Löcher existieren nicht ewig!	68
Was strahlt ein Schwarzes Loch aus?	71
Der Entstehungsprozeß primordialer Schwarzer Löcher	74
Gibt es primordiale Schwarze Löcher im All?	81
Schwarze Super-Minilöcher	83
Schlußbetrachtung	87

Die Vorgeschichte der Entdeckung

Die Vorgeschichte der Entdeckung der Schwarzen Löcher kann man zur Zeit Newtons beginnen, der das Gesetz von der allumfassenden Schwerkraft aufstellte – das Gesetz, das die Kraft beschreibt, deren Wirkung absolut alles unterworfen ist. Weder zur Zeit Newtons noch heute, Jahrhunderte später, ist ein Beispiel für eine andere in solchem Maße universelle Kraft bekannt.

Alle anderen Arten der physikalischen Wechselwirkung sind mit konkreten Eigenschaften der Materie gekoppelt. Das elektrische Feld z. B. wirkt nur auf geladene Körper, wogegen sich neutrale Körper gegenüber diesem Feld vollkommen gleichgültig verhalten. Allein die Schwerkraft herrscht in der Natur absolut. Das Schwerefeld wirkt auf alles: Auf leichte Teilchen und auf schwere (bei gleichen Anfangsbedingungen zudem in völlig gleicher Weise!), ja sogar auf das Licht. Die Hypothese, daß Licht von massereichen Körpern angezogen wird, stellte bereits Newton auf. Gegen Ende des 18. Jahrhunderts wurde von Laplace die folgende erstaunliche Voraussage gemacht: „Ein strahlender Stern mit einer Dichte, die der Erddichte gleich ist und dessen Durchmesser 250mal größer als der Durchmesser der Sonne ist, erlaubt aufgrund seiner Schwerkraft keinem Lichtstrahl, uns zu erreichen. Deshalb ist es möglich, daß die hellsten Himmelskörper im Weltall aus diesem Grunde unsichtbar sind.“

Worauf gründet sich nun die Behauptung von Laplace? Er berechnete unter Zugrundelegung der Newtonschen Gravitationstheorie den Wert, den wir heute als zweite kosmische Geschwindigkeit auf der Oberfläche eines Sterns bezeichnen. Das ist jene Geschwindigkeit, die man einem Körper erteilen muß, damit er die Schwerkraft überwindet und auf immer vom Stern in den Raum fortfliegt. Sie wird

nach der Formel $V = \sqrt{2GM/R}$ berechnet (G Newtonsche Gravitationskonstante, M Masse des Sterns, R Radius).

Für Sterne mit Parametern, wie sie Laplace angegeben hat, beginnt die zweite kosmische Geschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit zu übersteigen. Folglich kann das Licht von einem solchen Stern aufgrund der Gravitationswirkung nicht in den Kosmos gelangen. Es kann einen Beobachter nicht erreichen, und wir nehmen den Stern nicht wahr, obwohl er Licht ausstrahlt!

Das war eine glänzende Vorhersage. Dennoch besitzen die Schlußfolgerungen von Laplace, wie wir jetzt (in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts) wissen, keine Beweiskraft. Die Grundursache dafür, daß der dargelegte Beweis nicht streng ist, besteht darin, daß Laplace Gravitationsfelder riesiger Stärke beobachtete, in denen fallende Körper bis auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Im Jahre 1915 zeigte Einstein, daß für solche Felder die Gravitationstheorie Newtons nicht anwendbar ist. Er schuf eine Gravitationstheorie, die sowohl für superstarke als auch für sich schnell ändernde Gravitationsfelder gültig ist, und nannte sie Allgemeine Relativitätstheorie.

Wir werden hier natürlich nicht bis ins Detail die Grundlagen der Einsteinschen Theorie darlegen, einer Theorie, von der die sowjetischen Physiker L. D. Landau und E. M. Lifschitz als von der „schönsten aller existierenden physikalischen Theorien“ sprachen, sondern wir geben nur im nötigen Maße einzelne ihrer Folgerungen an, die von den Wissenschaftlern für den Bau der Theorie der Schwarzen Löcher benutzt werden.

Es muß bemerkt werden, daß an der Entwicklung der modernen Vorstellungen über die Schwarzen Löcher viele Wissenschaftler beteiligt waren. Unter ihnen spielen sowjetische Physiker und Astronomen eine hervorragende Rolle. Hier müssen in erster Linie die wissenschaftlichen Schulen, die die Akademiemitglieder J. B. Seldowitsch, W. L. Ginsburg und M. A. Markow anführen, genannt werden.

Die Gravitationstheorie Einsteins

Wodurch unterscheidet sich nun die Einsteinsche Gravitationstheorie von der Theorie Newtons? Wir wollen mit dem einfachsten Fall beginnen. Wir betrachten einen

sphärischen nichtrotierenden Planeten und bestimmen die Beschleunigung eines Körpers, der frei auf die Planetenoberfläche fällt. Die Masse des Planeten bezeichnen wir mit M . Der Radius des Planeten wird durch eine geodätische Messung auf seiner Oberfläche bestimmt (z. B. wenn man die Länge des größten Kreises auf seiner Oberfläche mißt und diese durch 2π teilt). Wir bezeichnen den so gemessenen Radius mit R .

Entsprechend der Newtonschen Theorie ist die Kraft, mit der ein Körper mit der Masse m auf der Oberfläche eines Planeten vom Zentrum angezogen wird, gleich $F_N = GMm/R^2$, wobei G die Newtonsche Gravitationskonstante ist. Die Beschleunigung des freien Falls auf der Oberfläche des Planeten beträgt $a_N = F_N/m = GM/R^2$.

Die Einsteinsche Theorie führt zu anderen Formeln. Entsprechend dieser Theorie ist

$$F_E = \frac{GMm}{R^2 \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 R}}}, \quad a_E = \frac{GM}{R^2 \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 R}}}, \quad (1)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist.

Die Einsteinschen Formeln unterscheiden sich von den Newtonschen durch den zusätzlichen im Nenner stehenden Wurzel Ausdruck. In diesen Ausdrücken erscheint zum ersten Male der geheimnisvolle Wert $2GM/c^2$, der den Wissenschaftlern lange keine Ruhe ließ und erst in den fünfziger und sechziger Jahren unseres Jahrhunderts richtig verstanden und gedeutet wurde. Diese Größe erhielt die Bezeichnung Gravitationsradius: $r_g = 2GM/c^2$. Wenn der Radius eines Himmelskörpers viel größer als r_g ist, stimmen die Formeln der Newtonschen Theorie für F und a mit den Einsteinschen überein, da der Ausdruck unter der Wurzel in letzteren praktisch gleich Eins ist. Mit der Annäherung von R an r_g nehmen die Unterschiede jedoch außerordentlich zu.

Der Wert des Gravitationsradius hängt, wie man aus der Definition selbst ablesen kann, nur von der Masse des Himmelskörpers ab, und er ist sogar für gigantische Massen sehr klein. So ist für die Masse der Sonne $r_g = 3$ km, für die Masse der Erde $r_g = 1$ cm. Der Radius der Himmelskörper ist folglich um vieles größer als ihr Gravitationsradius (der Radius der Sonne beträgt etwa

700 000 km, der Erdradius etwa 6400 km). Damit ist der Wert des Wurzelausdrucks im Nenner der Formeln (1) bei der Untersuchung der Schwerkraft auf der Oberfläche von Himmelskörpern und außerhalb von ihnen (im Vakuum) fast Eins¹. Es ist nicht erstaunlich, daß die Unterschiede zwischen Einsteinscher und Newtonscher Theorie unter üblichen Bedingungen äußerst gering sind.

Wenn sich nun der Radius R dem Wert r_g nähert, dann strebt die Anziehungskraft entsprechend Einstein gegen unendlich. Bevor wir diskutieren, zu welchen Folgerungen dies führt, wollen wir uns mit einigen anderen Ergebnissen der Einsteinschen Theorie vertraut machen. Das Wesen der Theorie Einsteins besteht darin, daß sie die geometrischen Eigenschaften des Raumes und den Zeitfluß untrennbar mit Kräften der Gravitation verband. Diese Beziehungen sind kompliziert und vielfältig. Wir wollen hier nur zwei wichtige Umstände vermerken.

Einerseits fließt die Zeit entsprechend der Einsteinschen Theorie in einem starken Gravitationsfeld, vom Standpunkt eines entfernten Beobachters aus gesehen, langsamer als die Zeit, die weit entfernt von den gravitierenden Massen gemessen wird (wo die Gravitation schwach ist), was durch die Formel $\tau = t\sqrt{1 - r_g/R}$ wiedergegeben wird. Dabei ist t die Zeit weit entfernt von den gravitierenden Massen (im Unendlichen, wie die Physiker sagen) und τ die Zeit, die im Abstand R vom Zentrum der gravitierenden Massen gemessen wird. Hier taucht wieder derselbe Wurzelausdruck auf wie in den Formeln (1). Wir haben ihn nur unter direkter Benutzung der Definition des Gravitationsradius geschrieben. Zum anderen werden in einem starken Gravitationsfeld die geometrischen Eigenschaften des Raumes nicht durch die Euklidische, sondern durch die Riemannsche Geometrie beschrieben. Das bedeutet, daß die gewohnten Beziehungen, z. B. die Beziehung

¹ In allen Ausdrücken, die oben geschrieben sind, braucht man unter R nicht nur den Radius des Planeten, sondern kann auch eine beliebige Entfernung des Beobachters vom Schwerezentrum verstehen. Um Mißverständnissen vorzubeugen, bemerken wir, daß sowohl die Newtonschen als auch die Einsteinschen Formeln für F und a in der Form, wie sie hier geschrieben sind, nur außerhalb von Massen gelten: für die Oberfläche der Himmelskörper und außerhalb von ihnen (im Vakuum). Im Innern der Himmelskörper bei Annäherung an das Zentrum wird die Gesamtschwerkraft, die auf einen Probekörper wirkt, immer schwächer und ist im Zentrum gleich Null.

zwischen Kreisumfang und seinem Radius, nicht mehr anwendbar sind: $l \neq 2\pi R$. Das Verhältnis zwischen Euklidischer und nichteuklidischer „räumlicher“ Geometrie ist analog dem Verhältnis zwischen der Geometrie auf der Ebene und der auf einer gekrümmten Fläche. Diese Analogie werden wir künftig benutzen.

Da die Geometrie im Schwerfeld nichteuklidisch ist, so ist es notwendig zu klären, was man unter der Größe R in den Formeln der Einsteinschen Theorie (1) und in der Formel für τ zu verstehen hat. Früher haben wir gewöhnlich unter R (s. Fußnote Seite 9) den durch 2π geteilten Umfang des Kreises verstanden, der den Himmelskörper gleich einem Gürtel umschlingt. Jedoch ist diese Größe im allgemeinen nicht gleich der Entfernung vom Zentrum des Planeten bis zum entsprechenden Kreis (wegen der „Krümmung“ des Raumes).

Die Verwendung gerade des Kreisumfangs als Maß der Entfernung vom Zentrum der gravitierenden Massen (und nicht der Entfernung vom Zentrum bis zum Kreis selbst) weist eine ganze Reihe von Vorteilen auf. Zum ersten muß man sich nicht für die Messung von R dem Zentrum der gravitierenden Massen nähern. Letzteres ist äußerst wichtig. Man kann z. B. die Äquatorlänge der Erde messen. Es wäre jedoch sehr schwierig, bis zu ihrem Mittelpunkt vorzudringen. Für die Erde besteht auch keine Notwendigkeit, die Entfernung bis zum Mittelpunkt unmittelbar zu messen, da das Schwerfeld der Erde nicht groß ist und mit großer Genauigkeit die Euklidische Geometrie gilt. Die Länge des Äquators, geteilt durch 2π , ist gleich der Entfernung zum Mittelpunkt. In superdichten Sternen mit starkem Gravitationsfeld ist das allerdings nicht so: Der Unterschied zwischen den „Radien“, die mit verschiedenen Methoden bestimmt worden sind, kann sehr beträchtlich sein. Mehr noch, wie wir im weiteren sehen werden, ist es in einer Reihe von Fällen prinzipiell unmöglich, das Schwerzentrum zu erreichen. Zum zweiten schreiben sich die Formeln, wenn man den durch 2π geteilten Kreisumfang benutzt, besonders einfach. Das ist nicht zufällig: Die Punkte des Kreises liegen im gleichen Abstand vom gravitierenden Zentrum, und folglich ist der Einfluß der Schwerkraft auf die „Krümmung“ des Raumes in allen Punkten des Kreises gleich. Wenn man nun unmittelbar die Entfernung vom Zentrum mißt, so ist es notwendig,

Gebiete mit unterschiedlicher Schwerkraft zu durchgehen. Das bedeutet, auch die „Krümmung“ des Raumes wird verschieden sein, so daß alle Beziehungen sehr viel komplizierter würden.

Das von uns betrachtete Schwerfeld um einen kugelförmigen nichtrotierenden Körper erhielt die Bezeichnung Schwarzschildfeld nach dem Namen des Wissenschaftlers, der sofort, nachdem Einstein seine Theorie geschaffen hatte, die Gleichungen für den genannten Fall gelöst hat (die Sphäre mit dem Gravitationsradius r_g trägt die Bezeichnung Schwarzschildsphäre).

Wir wollen jetzt zum Problem der zweiten kosmischen Geschwindigkeit zurückkehren.

Welche Geschwindigkeit muß man einer Rakete, die von der Planetenoberfläche startet, entsprechend der Einsteinschen Theorie geben, damit sie, die Anziehungskräfte überwindend, in den Kosmos fliegt? Die Antwort erwies sich als außerordentlich einfach. Hier gilt dieselbe Formel wie in der Newtonschen Theorie. Das bedeutet, daß das Ergebnis von Laplace, daß es dem Licht unmöglich ist, von einer kompakten gravitierenden Masse fortzugelangen, durch die Einsteinsche Gravitationstheorie bestätigt wurde. Die zweite kosmische Geschwindigkeit ist hier, gerade auf dem Gravitationsradius, gleich der Lichtgeschwindigkeit.

Die Physiker sagen das Schwarze Loch voraus

Entsprechend der Einsteinschen Theorie kann, sobald der Radius eines Himmelskörpers gleich seinem Gravitationsradius wird, das Licht also nicht mehr von der Oberfläche zu einem entfernten Beobachter gelangen, d. h., der Körper wird unsichtbar. Aber dem Leser ist sicher bereits klar geworden, daß diese außerordentlich ungewöhnliche Eigenschaft bei weitem nicht die einzige unter jenen „Wundern“ ist, die mit einem Körper passieren müssen, wenn dessen Abmessungen mit dem Gravitationsradius vergleichbar werden. In Übereinstimmung mit dem im vorangegangenen Abschnitt Gesagten muß auf der Oberfläche eines Sterns mit $R = r_g$ die Schwerkraft unendlich groß werden, ebenso wie die Beschleunigung des freien Falls (1). Wozu kann das nun führen?

Um diese Frage zu beantworten, erinnern wir uns zunächst,

warum unter dem Einfluß der Schwerkraft gewöhnliche Sterne und Planeten zum Zentrum hin nicht zusammenfallen, sondern Gleichgewichtskörper darstellen. Dem Kontraktionsstreben stehen die Kräfte des inneren Druckes der Materie entgegen. In Sternen ist das der Druck des Gases sehr hoher Temperatur, der danach strebt, den Stern auseinanderzutreiben. In Planeten ähnlich der Erde sind das die Spanningskräfte, Elastizität und Druck, die ebenfalls einer Kontraktion entgegenwirken. Die Gleichheit von Gravitationskraft und den entgegenwirkenden Kräften garantiert gerade das Gleichgewicht von Himmelskörpern. Die der Gravitation entgegenwirkenden Kräfte hängen vom Zustand der Materie ab, von ihrem Druck und ihrer Temperatur. Bei Verdichtung der Materie werden sie größer. Wenn man jedoch die Materie auf eine endliche (nicht unendlich große) Dichte komprimiert, so bleiben sie ebenfalls endlich. Anders verhält es sich mit den Gravitationskräften. Mit Annäherung der Größe des Himmelskörpers an den Gravitationsradius strebt die Anziehungskraft, wie wir wissen, gegen unendlich. Die Materiedichte des Körpers ist dabei eine wohlbestimmte endliche Größe, obwohl natürlich hinreichend groß. Folglich ist auch die Druckkraft endlich. Es ist klar, daß die jetzt unendlich große Gravitationskraft nicht durch den endlichen Druck kompensiert werden kann, und der Himmelskörper muß sich unter der Wirkung der Schwerkraft unaufhaltsam zum Zentrum hin zusammenziehen. Das wichtigste Resultat der Einsteinschen Theorie lautet also: Ein kugelförmiger Körper, dessen Größe gleich dem Gravitationsradius oder kleiner als dieser ist, kann sich nicht in Ruhe befinden, sondern muß sich zum Zentrum zusammenziehen. „Aber erlauben Sie“, fragt der Leser, „am Gravitationsradius wird die Gravitationskraft unendlich. Wenn sich nun der Körper auf eine Größe zusammenzieht, die kleiner als der Gravitationsradius ist, wie groß wird denn dann die Gravitationskraft?“ Die Antwort ist ziemlich offensichtlich. Bisher haben wir von der Gravitationskraft auf der Oberfläche eines *nicht kontrahierenden* Körpers gesprochen. Die Gravitationskraft hängt jedoch vom Zustand der Bewegung ab. Allen ist gut bekannt, daß beim freien Fall der Zustand der Schwerelosigkeit eintritt: Für einen frei fallenden Körper ist überhaupt keine Gravitationskraft spürbar. Deshalb ist auf der Oberfläche eines frei in sich

zusammenfallenden Körpers keinerlei Gravitationskraft bemerkbar (sowohl außerhalb als auch innerhalb der Schwarzschildsphäre). Ein durch die Anziehungskraft mitgerissener Körper kann schon unter keinerlei Bedingungen mehr an der Schwarzschildsphäre aufgehalten werden (er wäre dann einer unendlich großen Gravitationskraft ausgesetzt). Um so weniger kann ein Körper im Innern der Schwarzschildsphäre angehalten werden. Ein beliebiges Teilchen oder z. B. eine Rakete mit beliebig starkem Triebwerk muß, sobald sie sich vom gravitierenden Zentrum in einem Abstand kleiner als der Gravitationsradius befindet, unaufhaltsam in eben dieses Zentrum fallen.

Wir haben also die Antwort auf die Frage erhalten, zu welchen Folgen das unendliche Anwachsen der Gravitationskraft bei Annäherung an die Schwarzschildsphäre führt: zur katastrophenartigen, unwiderstehlichen Kontraktion des Körpers. Die Physiker nennen diese Erscheinung einen relativistischen Kollaps.

Es ist damit hinreichend, einen Körper bis auf die Größe des Gravitationsradius zu verdichten: Weiter wird sich der Körper selbst unaufhaltsam zusammenziehen. So entsteht ein Objekt, das den Namen Schwarzes Loch erhielt. Aus ihm können weder Licht noch Teilchen hinausgelangen (dafür wäre eine Geschwindigkeit größer als die Lichtgeschwindigkeit nötig), aber unter der Schwerkraftwirkung fallen sowohl Licht als auch Materie in das Schwarze Loch. Freilich, auf dem Wege, künstlich ein Schwarzes Loch zu schaffen, liegen riesige technische Schwierigkeiten. Je kleiner die Masse ist, die wir in ein Schwarzes Loch verwandeln wollen, desto kleiner sind die notwendigen Abmaße, auf die sie verdichtet werden muß, weil der Gravitationsradius direkt proportional der Masse ist. So wissen wir, daß der Gravitationsradius der Erde etwa gleich 1 cm ist. Um z. B. einen Berg von etwa einer Milliarde Tonnen Masse in ein Schwarzes Loch zu verwandeln, müßte man ihn auf die Größenordnung von Atomkernen verdichten!

In den nachfolgenden Abschnitten werden wir sehen, daß sich im Weltall große Massen im Laufe der natürlichen Entwicklung selbständig in Schwarze Löcher umwandeln können. Bevor wir jedoch darüber sprechen, machen wir uns weiter mit den erstaunlichen Besonderheiten der Schwarzen Löcher bekannt.

Die Zeit verlangsamt ihren Lauf

Wie bereits oben erwähnt wurde, sagte die Einsteinsche Theorie voraus, daß das Tempo des Zeitgangs um so langsamer ist, je näher sich die „Uhr“ am Gravitationsradius befindet. Das bedeutet, daß der entfernte Beobachter, ganz gleich, welche Prozesse im starken Gravitationsfeld ablaufen, sie in verlangsamttem Tempo sieht.

So verlaufen für den entfernten Beobachter die Schwingungen in Atomen, die Licht im starken Gravitationsfeld aussenden, verlangsamt, und die Photonen von diesen Atomen, die den Beobachter erreichen, kommen bei ihm „gerötet“ an: Ihre Frequenz verringert sich. Diese Erscheinung trägt die Bezeichnung gravitative Rotverschiebung (sie diente als Grundlage für einen der Tests zur Überprüfung der Einsteinschen Theorie). Für uns ist jetzt die Tatsache wichtig, daß die Verlangsamung der Zeit und die Rötung des Lichts um so größer sind, je näher das Strahlungsgebiet an der Grenze des Schwarzen Loches ist (an der Schwarzschildsphäre). Dort verlangsamt die Zeit ihren Lauf, und auf der Grenze des Schwarzen Loches selbst ist es so, als würde für den entfernten Beobachter der Zeitlauf einfrieren. Wenn dieser Beobachter z. B. einen Stein verfolgt, der auf das Schwarze Loch zufällt, sieht er, wie sich in der Nähe der Schwarzschildsphäre der Fall des Steins nach und nach verlangsamt, und erst nach unendlich langer Zeit nähert sich der Stein der Grenze des Schwarzen Loches.

Ein analoges Bild wird ein entfernter Beobachter bei dem Entstehungsprozeß des Schwarzen Loches selbst wahrnehmen, wenn unter der Wirkung der Anziehungskraft die Sternmaterie selbst fällt. Für einen Beobachter, der vom Schwarzen Loch entfernt ist, nähert sich die Oberfläche des Sterns erst nach unendlich langer Zeit der Schwarzschildsphäre, als ob sie auf dem Gravitationsradius erstarrt. Deshalb hat man früher die Schwarzen Löcher „erstarrte“ Sterne genannt.

Aber diese Erstarrung bedeutet nicht, daß der Beobachter ewig die erstarrte Oberfläche des Sterns am Gravitationsradius betrachten wird. Erinnern wir uns an die Verlangsamung der Zeit, an die Rötung des Lichts, das aus

einem starken Gravitationsfeld kommt. Mit Annäherung der Sternoberfläche an den Gravitationsradius sieht der Beobachter immer röteres Licht vom Stern, obwohl auf dem Stern selbst dauernd gewöhnliche Photonen erzeugt werden. Weniger energiereiche („gerötete“) Photonen kommen außerdem immer seltener beim Beobachter an. Die Intensität des Lichts nimmt ab.

Zu dem Umstand der Zeitverlangsamung kommt hier noch die Rotverschiebung des Lichts infolge des Dopplereffekts hinzu. Tatsächlich entfernt sich doch die Oberfläche des sich verdichtenden Sterns vom Beobachter. Es ist bekannt, daß das Licht von einer sich entfernenden Quelle ebenfalls rotverschoben empfangen wird (dies ist gerade der Dopplereffekt).

So führt also die gemeinsame Wirkung des Dopplereffekts und die Verlangsamung des Zeitgangs im starken Gravitationsfeld dazu, daß mit Annäherung der Sternoberfläche an die Schwarzschildsphäre der entfernte Beobachter das Licht immer mehr rotverschoben und mit abnehmender Intensität wahrnimmt: Der Stern wird unsichtbar. Seine Helligkeit strebt gegen Null, und mit keinem Teleskop ist es möglich, ihn zu entdecken. Dabei erfolgt das Erlöschen für den entfernten Beobachter praktisch sofort. So erlischt ein Stern mit Sonnenmasse, nachdem er sich auf den zweifachen Gravitationsradius verdichtet hat, für den äußeren Beobachter innerhalb einer hunderttausendstel Sekunde.

Es ist ebenfalls unmöglich, die Oberfläche eines am Gravitationsradius „erstarrten“ Sterns mittels Radarortung zu entdecken. Die Radiosignale werden sich unendlich lange in Richtung auf den Gravitationsradius ausbreiten und niemals zum sendenden Beobachter zurückkehren. Für den äußeren Beobachter „verschwindet“ der Stern vollkommen, und es bleibt nur sein Gravitationsfeld. Der äußere Beobachter sieht niemals, was mit dem Stern nach seiner Verdichtung auf eine Größe kleiner als der Gravitationsradius passiert.

„Halt!“ sagt der Leser, „wie kann denn hier von einer Größe kleiner als der Gravitationsradius die Rede sein, wenn der Prozeß der Kontraktion selbst bis zum Gravitationsradius unendlich lange dauert? Wir haben doch eben davon gesprochen, daß der Stern beim Gravitationsradius ‚erstarrt‘. Wann soll er denn nun kleiner als der

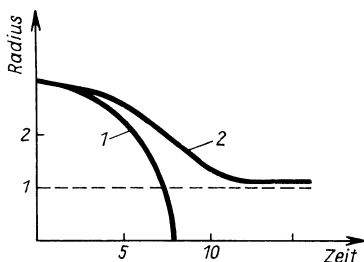
Gravitationsradius werden? Nach einer unendlich langen Zeit?“

Genau hier äußert sich eine der erstaunlichen und wichtigen Aussagen, die von der Relativitätstheorie Einsteins geliefert werden – die Relativität der Zeitintervalle, ihre Abhängigkeit vom Bewegungszustand des Beobachters. Erinnern wir uns, daß bereits in der speziellen Relativitätstheorie, ohne jedes Gravitationsfeld, ein und derselbe Prozeß vom Standpunkt verschiedener Beobachter eine unterschiedliche Zeitdauer besitzt: Vom Standpunkt eines ruhenden Beobachters gehen die Uhren in einer schnell fliegenden Rakete langsamer als in einer ruhenden. Beim Fall in ein Schwarzes Loch äußert sich diese Relativität der Dauer auf eine völlig erstaunliche Art. Wir wollen diese Erscheinung genauer betrachten.

Wir stellen uns eine Reihe von Beobachtern vor, die sich auf der Linie des verlängerten Radius des Schwarzen Loches befinden und gegenüber diesem in Ruhe sind. Sie können sich z. B. in Raketen befinden, deren Triebwerke so arbeiten, daß die Beobachter nicht ins Loch fallen. Weiterhin stellen wir uns noch einen Beobachter vor, der sich in einer Rakete mit ausgeschaltetem Triebwerk befindet und frei zum Schwarzen Loch fällt. Während des Falls passiert er die ruhenden Beobachter mit wachsender Geschwindigkeit. Wenn der Fall zum Schwarzen Loch in großer Entfernung beginnt, so ist diese Geschwindigkeit gleich der zweiten kosmischen Geschwindigkeit. Die Fallgeschwindigkeit strebt gegen die Lichtgeschwindigkeit, wenn sich der fallende Körper dem Gravitationsradius nähert. Es ist klar, daß sich mit wachsender Geschwindigkeit das Tempo des Zeitflusses in der frei fallenden Rakete verringert. Diese Verringerung ist so stark, daß ein unendlicher Zeitabschnitt, der vom Standpunkt eines entfernten und ruhenden Beobachters erforderlich ist, damit die Schwarzschildsphäre erreicht werden kann, nach den Uhren des fallenden Beobachters einem endlichen Zeitabschnitt entspricht (Abb. 1). Solcherart ist ein unendlich langer Zeitabschnitt für den einen Beobachter gleich einem endlichen für einen anderen. Was kann ein anschaulicheres Beispiel für die Relativität des Zeitlaufs sein?

Den Uhren zufolge, die sich auf dem sich zusammenziehenden Stern befinden, erreicht der Stern also den Gravitationsradius in endlicher Zeit und wird sich weiter

Abb. 1. Die Fallzeit eines Körpers in ein Schwarzes Loch nach der Uhr des fallenden (1) und nach der des ruhenden Beobachters (2). Entlang der horizontalen Achse ist die Zeit in Einheiten r_g/c abgetragen, entlang der vertikalen Achse ist die Entfernung in Einheiten r_g angegeben



auf noch kleinere Abmaße zusammenziehen. Ein entfernter äußerer Beobachter wird jedoch diese letzten Etappen der Evolution, wie wir uns erinnern, niemals sehen. Was wird ein Beobachter auf dem sich zusammenziehenden Stern sehen, nachdem er sich unter der Schwarzschildsphäre befindet? Was wird mit dem Stern?

Wir wollen uns diese Fragen noch eine Zeitlang aufheben und jetzt zu dem äußeren Feld des Schwarzen Loches zurückkehren, um zu sehen, wie sich in diesem superstarken Feld die Körper bewegen und wie sich Lichtstrahlen ausbreiten.

Die Himmelsmechanik im Schwerefeld eines Schwarzen Loches

Entsprechend der Newtonschen Gravitationstheorie bewegt sich ein beliebiger Körper im Gravitationsfeld eines Sterns entlang eines der Kegelschnitte: entweder entlang einer Hyperbel oder einer Parabel oder entlang einer Ellipse (in Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen der Bewegung). Bei einem Schwarzen Loch ist in großen Entfernungen das Gravitationsfeld schwach und wird mit großer Genauigkeit durch die Newtonsche Theorie beschrieben. Deshalb sind dort die Gesetze der Newtonschen Himmelsmechanik gültig. Mit Annäherung an das Schwarze Loch werden jedoch die Unterschiede zur klassischen Mechanik immer größer und größer.

Wir wollen uns mit einigen der wichtigsten Besonderheiten der Bewegung von Körpern im Schwerefeld des Schwarzen Loches vertraut machen.

Wichtig ist vor allem, daß die Umlaufbahnen der Körper keine Kegelschnitte mehr sind. In der Newtonschen Theorie bewegt sich ein Körper, wenn seine Geschwindigkeit kleiner als die zweite kosmische Geschwindigkeit ist, auf einer Ellipse. Die Ellipse hat einen zum gravitierenden Zentrum nächstgelegenen Punkt (Periastron) und einen entferntesten Punkt (Apastron). Entsprechend der Einsteinschen Theorie besitzt die Umlaufbahn, sofern die Geschwindigkeit kleiner als die zweite kosmische Geschwindigkeit ist, ebenfalls Periastron und Apastron. Sie ist jedoch keine Ellipse mehr: Die Körper bewegen sich auf keinen geschlossenen Bahnen mehr, während sie sich dem Schwarzen Loch abwechselnd nähern und dann wieder entfernen. Die Umlaufbahn liegt völlig in einer Ebene. In der Nähe des Schwarzen Loches kann sie jedoch ein sehr bizarres Aussehen haben. (Wenn die gesamte Umlaufbahn genügend weit entfernt liegt, stellt sie eine sich langsam im Raum drehene Ellipse dar.)

Für das Weitere ist es sehr interessant und wichtig, die einfachste periodische Bewegung eines Körpers im Feld eines Schwarzen Loches zu betrachten – die Bewegung auf einer Kreisbahn. In der Newtonschen Theorie ist die Bewegung auf einem Kreis in beliebigem Abstand vom Zentrum möglich. Im Fall der Einsteinschen Theorie ist das nicht so. Je geringer der Abstand zum Zentrum ist, desto größer ist die Kreisgeschwindigkeit. Auf dem Kreis mit dem Radius $1,5 r_g$ erreicht die Bahngeschwindigkeit den Wert der Lichtgeschwindigkeit. Näher zum Schwarzen Loch hin ist die Bewegung auf einer Kreisbahn überhaupt nicht mehr möglich. Damit auf noch kürzeren Entfernungen die Zentrifugalkraft den mächtigen Anziehungskräften das Gleichgewicht halten könnte, wären Geschwindigkeiten nötig, die die Lichtgeschwindigkeit übersteigen würden. Es erweist sich jedoch, daß in einer realen Situation eine Bewegung auf einer Kreisbahn um ein Schwarzes Loch auch in größeren Abständen unmöglich ist, beginnend schon beim dreifachen Gravitationsradius, wenn die Bahngeschwindigkeit erst die Hälfte der Lichtgeschwindigkeit beträgt.

Worin liegt nun hier die Ursache?

Es ist so, daß bei Entfernungen kleiner als $3 r_g$ die Bewegung auf einer Kreisbahn instabil ist. Das bedeutet, daß die kleinste Störung, ein beliebig kleiner Anstoß, dazu

führt, daß der Körper die Bahn verläßt und entweder in das Schwarze Loch fällt oder wegfliegt (nichts dergleichen gibt es in der Newtonschen Mechanik). Aber das Interessanteste und Ungewöhnlichste in der Himmelsmechanik der Schwarzen Löcher ist die Möglichkeit, daß durch ein Schwarzes Loch Körper, die aus dem Kosmos kommen, eingefangen werden.

Erinnern wir uns, daß in der Newtonschen Mechanik jeder Körper, der aus dem Kosmos auf die gravitierende Masse zugeflogen kommt, eine Parabel oder Hyperbel um das gravitierende Zentrum beschreibt und (sofern er nicht mit der Oberfläche der Masse „zusammenstößt“) wieder in den Kosmos fliegt. Ein gravitatives Einfangen ist nicht möglich. Anders steht die Sache im Schwerfeld eines Schwarzen Loches. Freilich, wenn sich der herbeifliegende Körper in großer Entfernung von dem Schwarzen Loch bewegt (in einer Entfernung von mehr als dem zehnfachen Gravitationsradius), dort, wo das Schwerfeld schwach ist und mit großer Genauigkeit die Newtonsche Theorie gilt, so bewegt er sich fast genau auf einer Parabel oder Hyperbel. Wenn der Körper jedoch hinreichend dicht an dem Loch vorbeifliegt, so ist seine Bahn ganz und gar nicht einer Parabel oder Hyperbel ähnlich.

Wenn ein Körper weit entfernt von dem Schwarzen Loch eine Geschwindigkeit besitzt, die viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist, und seine Bahn reicht nahe an den Kreis heran, dessen Radius gleich dem Zweifachen des Gravitationsradius ist, dann absolviert er viele Umläufe um das Schwarze Loch, bevor er wieder in den Kosmos fliegt. Ein Beispiel für eine solche Bahn ist in Abb. 2a dargestellt. Schließlich, wenn die Bahn eines solchen Körpers unmittelbar an den besagten Kreis herangeht, dann wird sich diese Bahn unbegrenzt oft darum herumwinden. Der Körper ist gravitativ durch das Schwarze Loch eingefangen und wird nie wieder in den Kosmos fliegen (Abb. 2b). Wenn die Bahn des Körpers noch näher an das Schwarze Loch heranreicht, fällt er in das Schwarze Loch hinein und ist ebenfalls gravitativ eingefangen.

Bevor wir zu anderen physikalischen Erscheinungen im Schwerfeld eines Schwarzen Loches übergehen, wollen wir noch eine Bemerkung machen, die die zweite kosmische Geschwindigkeit betrifft. Wir haben schon früher davon

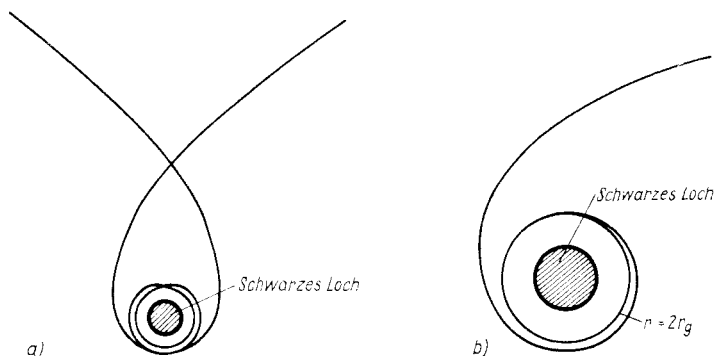


Abb. 2. Die Bahn eines Körpers, der aus dem Unendlichen in ein Schwarzes Loch fällt: a) in der Nähe des Kreises $2r_g$ vorbeifliegend; b) sich unbegrenzt um den Kreis $2r_g$ wickelnd

gesprochen, daß für die zweite kosmische Geschwindigkeit die Formel der Newtonschen Theorie richtig ist und daß ein Körper, der eine solche oder eine größere Geschwindigkeit besitzt, für immer von dem Schwarzen Loch fort in den Kosmos fliegt. Dennoch müssen wir eine kleine Einschränkung machen.

Es ist offensichtlich, daß ein Körper, der sich radial auf das Schwarze Loch zu bewegt, ganz gleich, welche Geschwindigkeit er auch besitzt, in das Schwarze Loch eindringt und nicht mehr in den Kosmos fliegt. Mehr noch, uns ist jetzt bekannt, wenn sich ein Körper nicht direkt auf dem Radius entlang zum Schwarzen Loch bewegt, aber seine Bahn in genügend geringer Entfernung vom Schwarzen Loch verläuft, dann wird er gravitativ eingefangen werden.

Um sich von dem Schwarzen Loch fortreißen zu können, genügt es folglich nicht, eine Geschwindigkeit zu haben, die größer als die zweite kosmische Geschwindigkeit ist. Es ist zudem noch notwendig, daß die Richtung dieser Geschwin-

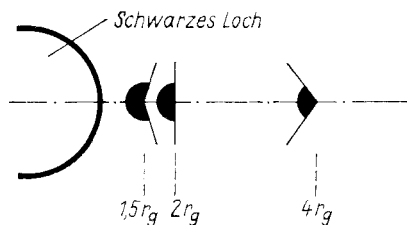


Abb. 3. Die Kegel, die die Möglichkeit des gravitativen Einfangens durch ein Schwarzes Loch angeben. Wenn der Geschwindigkeitsvektor der Körper außerhalb der geschwärzten konischen Oberflächen liegt, fliegt ein Körper mit parabolischer Geschwindigkeit vom Schwarzen Loch fort

digkeit mit der Richtung zum Schwarzen Loch einen Winkel bildet, der einen bestimmten kritischen Wert übersteigt. Wenn der Winkel kleiner ist, wird der Körper eingefangen, wenn er größer ist (und die Geschwindigkeit ist gleich der zweiten kosmischen Geschwindigkeit), so fliegt er fort in den Kosmos. Der Wert dieses kritischen Winkels hängt von der Entfernung zum Schwarzen Loch ab. In Abb. 3 ist schwarz der Einfangkegel gezeichnet: Wenn der Vektor der zweiten kosmischen Geschwindigkeit in diesem Kegel liegt, wird der Körper eingefangen.

Schließlich wollen wir einige Worte zu noch einem wichtigen Prozeß sagen, der bei der Bewegung von Körpern im Feld eines Schwarzen Loches abläuft. Es geht um die Ausstrahlung von Gravitationswellen.

Die Gravitationstheorie Einsteins sagt die Existenz solcher Wellen voraus. Sie sollen bei der beschleunigten Bewegung von massereichen Körpern entstehen. Insbesondere soll ein Körper, der sich auf einer Bahn um einen Stern oder um ein Schwarzes Loch bewegt, Gravitationswellen ausstrahlen. Diese Wellen tragen Energie mit sich fort. Die Intensität der Gravitationsstrahlung hängt von der Masse der Körper ab, die sich um den gemeinsamen Schwerpunkt bewegen, und von der Entfernung zwischen ihnen. Die Abstrahlung von Energie durch Gravitationswellen in einem solchen System führt zu einer stetigen Verringerung des Abstandes zwischen den Körpern. In gewöhnlichen „astronomischen“ Situationen ist die Abstrahlung von Energie durch Gravitationswellen äußerst gering. So wird bei der Bewegung der Planeten im Sonnensystem durch die Gravitationsenergie von nur etwa 10^4 W ($= 10^{11}$ erg/s) abgestrahlt, was um 10^{22} mal kleiner als die Energie des Lichtes ist, die von der Sonne ausgestrahlt wird.

In einigen Fällen kann jedoch der Prozeß der Gravitationsstrahlung, wie wir sehen werden, sehr bedeutend sein.

Jetzt wollen wir nur unterstreichen, daß ein Körper, der sich z. B. auf einer Kreisbahn um ein Schwarzes Loch bewegt, Gravitationswellen ausstrahlt und allmählich den Radius seiner Umlaufbahn verringert. Dies geschieht so lange, bis der Radius den kritischen Wert $3r_g$ erreicht. In kleineren Entfernungen ist die Bewegung, wie wir wissen, bereits instabil. Folglich stürzt ein Körper, der die kritische Kreisbahn erreicht hat, noch einige Umläufe gemacht und

eine gewisse Menge Energie abgestrahlt hat, aus dieser Entfernung in das Schwarze Loch hinein.

Es erweist sich, daß die Gesamtmenge an Energie, die durch den Körper in Form von Gravitationswellen während der ganzen Zeit der Bewegung auf Kreisbahnen und während seiner langsamen Annäherung an das Schwarze Loch abgestrahlt wird, keineswegs klein ist. Sie beträgt 6 % von mc^2 , wobei m die Masse des Körpers ist, der sich auf den Kreisbahnen bewegt hat. Wir bemerken, daß dies weit mehr ist als die Energie, die bei der gleichen Masse an Materie bei allen Arten von Kernreaktionen frei wird.

Wir sehen, daß man im Prinzip Schwarze Löcher auf solch einfache Art als Maschinen zur Energiegewinnung benutzen könnte. Freilich ist eine solche Maschine praktisch fast nutzlos. Die Ursache besteht darin, daß Gravitationswellen nur äußerst schwach mit Materie wechselwirken. Deswegen wäre es sehr schwierig, die in Form von Gravitationswellen abgestrahlte Energie aufzufangen und für praktische Bedürfnisse zu nutzen: Die Gravitationswellen würden sich im kosmischen Raum zerstreuen.

Im weiteren werden wir sehen, daß andere Möglichkeiten existieren, die gigantische Gravitationsenergie der Schwarzen Löcher zu nutzen.

Der Lichtstrahl im Schwerfeld eines Schwarzen Loches

Wir wissen bereits, daß das Schwerfeld auf das Licht einwirkt. Es bewirkt bei den Photonen eine Änderung der Frequenz und führt zur Krümmung der Lichtbahn. Mit Annäherung an ein Schwarzes Loch wird die Lichtbahn immer stärker gekrümmt. In Abb. 4 sind die Bahnen von Lichtstrahlen angegeben, die in verschiedenen Entfernungen vom Schwarzen Loch (senkrecht zu seinem Radius) beginnen. Wir sehen, daß ein kritischer Kreis mit dem Radius $1,5 r_g$ existiert, auf den wir bereits im vorangegangenen Kapitel eingegangen sind. Auf diesem Kreis kann sich ein Photon bewegen, gehalten durch die mächtige Schwerkraft des Schwarzen Loches. Diese Bewegung ist jedoch instabil. Eine noch so kleine Störung, und das

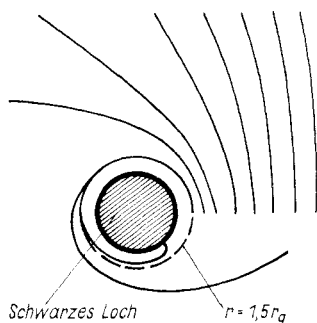


Abb. 4. Die Bahnen, von Lichtstrahlen in der Nähe eines Schwarzen Loches

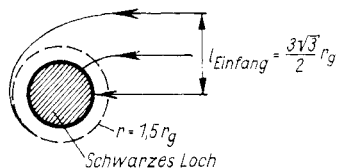


Abb. 5. Gravitatives Einfangen von Lichtstrahlen durch ein Schwarzes Loch. Das Lichtbündel, das im Unendlichen den Querschnitt l_{Einfang} hat, wird durch das Schwarze Loch eingefangen

Photon fällt entweder in das Schwarze Loch oder fliegt in den Kosmos fort.

Die Existenz des kritischen Kreises führt dazu, daß das Licht, wenn es das Schwarze Loch nahe genug passiert, durch dieses gravitativ eingefangen wird (dargestellt in Abb. 5). Ein Strahl, der direkt den Kreis mit dem Radius $1,5 r_g$ berührt, windet sich unbegrenzt um diesen, und wenn er noch näher heranreicht, bleibt er im Schwarzen Loch. Der Strahl, der sich um den Kreis mit dem Radius $1,5 r_g$ wickelt, ist der letzte Strahl, der noch eingefangen wird. Dieser Strahl verläuft entfernt von dem Schwarzen Loch in

einem Abstand $l_{\text{Einfang}} = \frac{3}{2} \sqrt{3} r_g$ von der Geraden, die zu diesem Strahl parallel verläuft und durch das Zentrum des Schwarzen Loches führt. Dieser Abstand l_{Einfang} trägt die Bezeichnung kritischer Stoßparameter.

Gesichtslose Schwarze Löcher

Bisher sprachen wir nur über Schwarze Löcher, die bei der Kontraktion kugelförmiger Körper entstehen und deshalb ein sphärisch-symmetrisches Gravitationsfeld besitzen.

Aber was für ein Schwarzes Loch entsteht bei der Kontraktion eines nichtsphärischen, z. B. eines abgeplatteten Körpers? Wir werden vorerst nur über nichtrotierende Körper sprechen und heben uns die Frage der Rotation für das nächste Kapitel auf.

Bis zur Kontraktion hat der Körper also ein nichtsphärisches Gravitationsfeld besessen. Bedeutet das nun, daß ein abgeplattetes Schwarzes Loch mit einem „abgeplatteten“ Schwerefeld entsteht? Lange Zeit war die Antwort auf diese Frage unbekannt, und die Aufgabe wurde erst vor kurzer Zeit gelöst. Tatsächlich können keine abgeplatteten oder asymmetrischen Schwarzen Löcher entstehen. Die Ursache besteht darin, daß im Verlauf der Kontraktion, wenn sich die Größe des Schwarzen Loches dem Gravitationsradius nähert, eine intensive Abstrahlung von Gravitationswellen vor sich geht. Es erweist sich, daß dabei alle Abweichungen des Gravitationsfeldes von streng sphärischer Symmetrie immer kleiner werden und in Form von Gravitationswellen „abgestrahlt“ werden. Im Ergebnis entsteht ein vollkommen sphärisch-symmetrisches Schwarzes Loch mit einem äußeren vollkommen sphärisch-symmetrischen Gravitationsfeld gemäß Schwarzschild, das, wie bekannt, nur durch eine Größe charakterisiert ist – die Masse des gravitierenden Zentrums.

Es entsteht dann die Frage, was geschieht, wenn der sich zusammenziehende Körper eine elektrische Ladung besessen hat, d. h. neben dem Gravitationsfeld noch von einem elektrischen Feld umgeben war; oder der Körper hatte ein magnetisches oder schließlich irgendein anderes Feld? Wird das entstandene Schwarze Loch diese Felder ebenfalls besitzen?

Die Untersuchung dieser Frage führte zu einem sehr interessanten Ergebnis. Es stellte sich heraus, daß alle Arten physikalischer Felder im Verlauf des relativistischen Kollapses abgestrahlt oder in dem Schwarzen Loch selbst begraben werden. Eine Ausnahme stellt nur das Feld einer elektrischen Ladung dar. Bei der Kontraktion ändert sich dieses Feld, ebenso wie auch das sphärische Gravitationsfeld, überhaupt nicht und bleibt um das entstandene Schwarze Loch bestehen.

Beim relativistischen Kollaps eines beliebigen komplizierten nichtrotierenden Körpers, der von elektrischen, magnetischen und anderen Feldern umgeben ist, entsteht also ein

Schwarzes Loch, das vollständig charakterisiert ist durch insgesamt zwei Parameter – durch die Masse, von der die Stärke des äußeren Gravitationsfeldes abhängt, und durch die elektrische Ladung, die das elektrische Feld bestimmt. Alle anderen bezeichnenden Besonderheiten der Materie, die das Schwarze Loch bildet, verschwinden praktisch. Keinerlei Messungen oder Versuche an dem Schwarzen Loch können uns helfen, eine Antwort auf die Frage zu finden, ob es z. B. aus Materie oder Antimaterie entstanden ist, ob die Materie ein Magnetfeld besaß usw. Auch diese Eigenschaft des „Vergessens“ aller Kennzeichen ist wiederum dadurch gegeben, daß keinerlei Signale aus dem Schwarzen Loch in den äußeren Raum dringen.

Wenn wir das Problem der elektrischen Ladung beiseite lassen, das für Himmelskörper unwesentlich ist, so bleibt als Charakteristikum für die Größe eines Schwarzen Loches nur seine Masse. Alle Schwarzen Löcher ein und derselben Masse sind genaue Kopien voneinander. Eine solche „Gesichtslosigkeit“ war für den bekannten amerikanischen theoretischen Physiker Wheeler Anlaß zur Bemerkung, daß „Schwarze Löcher keine Haare besäßen“. Am Anfang dieses Kapitels haben wir die spezielle Einschränkung gemacht, daß wir nur Schwarze Löcher betrachten, die aus nichtrotierenden Körpern entstanden sind. Diese Einschränkung ist nicht zufällig. Das Problem besteht darin, daß ein rotierender Körper beim Kollaps zu einem „rotierenden“ Schwarzen Loch führt. Wie wir in dem folgenden Abschnitt sehen werden, führt die Rotation zu bestimmten Änderungen des Gravitationsfeldes, und deshalb dient die Rotation als dritter (und letzter) Parameter (neben der Masse und der elektrischen Ladung), der ein Schwarzes Loch charakterisiert.

Das rotierende Schwarze Loch

Entsprechend der Newtonschen Theorie ist das Gravitationsfeld zu einem beliebigen Zeitpunkt vollständig durch die momentane Massenverteilung bestimmt. So sind die Gravitationsfelder einer ruhenden und einer rotierenden Kugel völlig identisch, sofern sie nur die gleiche Masse besitzen. Gemäß der Einsteinschen Theorie ist das nicht so,

und die Gravitationsfelder der betrachteten Kugeln werden sich etwas unterscheiden. Worin besteht nun dieser Unterschied?

Am anschaulichsten (allerdings etwas vereinfacht) kann man sich diesen Unterschied so vorstellen, als ob um den rotierenden Körper ein zusätzliches wirbelförmiges Gravitationsfeld entstehen würde, das alle Körper in eine kreisförmige Bewegung um die Feldquelle mitreißt. Das geschieht in einer Weise, als ob die Schichten des Raumes langsam um einen solchen Körper rotieren, wobei die Winkelgeschwindigkeit ihrer Rotation von der Entfernung abhängt: Weit entfernt ist sie klein und wächst bei Annäherung an den Körper. Für gewöhnliche Himmelskörper sind diese Effekte vernachlässigbar klein. Am einfachsten kann man sie nachweisen, wenn man in die Nähe eines rotierenden Körpers einen Kreiselapparat (Gyroskop) bringt. Wenn der Körper nicht rotiert, so wird der Kreisel unveränderlich in eine Richtung des Raumes relativ zu den entfernten Sternen weisen.

Die Verwendung von Kreiseln, z. B. für die Orientierung von Raumschiffen, ist allgemein bekannt. In der Nähe eines rotierenden Körpers jedoch dreht sich die Achse des Kreisels langsam gegenüber den entfernten Sternen (Präzession). So dreht sich der Kreisel in der Nähe der Oberfläche der rotierenden Erde um etwa $0,1''$ im Jahr. Natürlich kann eine solch kleine Änderungsgeschwindigkeit des Kreisels die Orientierung von Raumschiffen nicht stören. Außerdem ist dieser Effekt bisher experimentell nicht nachgewiesen.

An der Oberfläche von Neutronensternen (Pulsaren) kann die Drehgeschwindigkeit des Gyroskops sehr groß werden, nur um wenig kleiner als die Rotationsgeschwindigkeit des Neutronensterns selbst. Und die Neutronensterne können mit einer Geschwindigkeit von einigen zehn und mehr Umdrehungen je Sekunde rotieren. Damit kann ein Gyroskop in der Nähe eines solchen schnell rotierenden Sterns viele Umdrehungen in einer Sekunde vollenden!

Was wird bei einem relativistischen Kollaps eines Sterns mit dieser wirbelförmigen Feldkomponente geschehen? Es stellt sich heraus, daß sie sich nicht ändert, ebenso wie sich auch das sphärische Gravitationsfeld nicht ändert. Diese wirbelförmige Komponente des Gravitationsfeldes ist vollständig durch den Gesamtdrehimpuls des Körpers, aus

dem das Schwarze Loch entstand, bestimmt. Somit ist der Drehimpuls der dritte numerische Parameter, der das Schwarze Loch charakterisiert.

Der wirbelförmige Anteil des Gravitationsfeldes wächst in der Nähe des Schwarzen Loches, und seine Wirkung in unmittelbarer Nähe der Grenze des Schwarzen Loches führt zu wichtigen Folgen.¹ Zuerst jedoch wollen wir die Oberfläche finden, auf der die Gravitationskraft, die auf einen ruhenden Körper wirkt, unendlich groß wird. Wir erinnern uns, daß bei fehlender Rotation diese Oberfläche die Schwarzschildsphäre ist. Sie ist auch, mit anderen Worten, die Grenze des Schwarzen Loches (oder, wie man sagt, der Horizont), unterhalb der nichts hervorkommen kann. Bei vorhandener Rotation ist das nicht so. Die Schwerkraft wird außerhalb des Horizonts, auf einer Oberfläche, die die Bezeichnung Ergosphäre erhielt, unendlich groß. Auf dieser Oberfläche und unterhalb von ihr kann schon keine Kraft mehr einen Körper in Ruhe halten. Ein beliebiger Körper wird durch die wirbelförmige Komponente der Gravitation in eine Bewegung relativ zum Schwarzen Loch mitgerissen. Jedoch im Unterschied zu Körpern, die sich unter der Schwarzschildsphäre befinden (bei fehlender Rotation), wo sie unhaltbar ins Zentrum fielen, werden die Körper hier, unterhalb der Grenze der Ergosphäre, in eine Rotationsbewegung um das Schwarze Loch gezwungen. Dabei muß sich der Körper nicht unbedingt zum Zentrum bewegen. Er kann sich sowohl dem Schwarzen Loch nähern als auch sich von ihm entfernen, er kann die Grenze der Ergosphäre kreuzen, sich sowohl nach außen als auch nach innen bewegend. Es fragt sich, wie denn die Gravitationskraft auf den Körper unterhalb der Grenze der Ergosphäre wirkt, wenn auf ihn schon auf der Grenze eine unendlich große Gravitationskraft wirkt?

Hier müssen wir daran erinnern, was wir bei der Betrachtung der Gravitationskräfte, die auf der Schwarzschild-Oberfläche wirken, gesagt haben.

Die Gravitationskraft ist auf der Grenze nur für einen ruhenden Körper unendlich groß, und wenn sich ein

¹ Während der gesamten weiteren Ausführungen „vergessen“ wir erst einmal die Möglichkeit, daß eine elektrische Ladung vorhanden sein könnte, da dies für die Himmelskörper unwesentlich ist und außerdem das Wesen der Prozesse, die wir unten betrachten werden, nicht ändert.

Körper beschleunigt bewegt, so ist die Kraft eine andere. Bei der Kreisbewegung um das Schwarze Loch in der gleichen Richtung wie die Rotationsrichtung des Schwarzen Loches erweist sich die Kraft sowohl auf der Grenze der Ergosphäre als auch unterhalb von ihr als endlich. Deshalb kann sich ein Körper innerhalb der Grenze der Ergosphäre auf einer Kreisbahn bewegen, ohne ins Zentrum zu fallen. Somit unterscheidet sich bei vorhandener Rotation die statische Grenze (d. h. die Grenze des Gebietes, wo ein Körper in Ruhe relativ zum Schwarzen Loch sein kann) sehr stark von der Schwarzschildsphäre im Falle fehlender Rotation.

Wir sehen, daß die Grenze der Ergosphäre durchaus nicht die Grenze des Schwarzen Loches darstellt, da man von unterhalb dieser Oberfläche nach außen gelangen kann. Wir wollen sehen, was denn bei weiterer Annäherung an das Schwarze Loch geschieht.

Wenn wir tiefer vordringen, gelangen wir schließlich an die Grenze des Schwarzen Loches, den Horizont. Auf dieser Oberfläche und unterhalb von ihr bewegt sich ein Körper (sowohl beliebige Teilchen als auch Licht) nur noch dem Innern des Schwarzen Loches zu. Hier ist die Bewegung nach außen nicht möglich, und von unterhalb dieses Horizontes kann keinerlei Information zu einem äußeren Beobachter gelangen.

Gerade den Raum zwischen dem Horizont und der statischen Grenze nennt man auch Ergosphäre. Dort zwingt die Gravitationskraft alle Körper, um das Schwarze Loch zu kreisen. (Die Struktur eines rotierenden Schwarzen Loches ist in Abb. 6 dargestellt.)

Wenn man der Oberfläche der Ergosphäre ein Gyroskop langsam immer näher bringt, so wird seine Winkelgeschwindigkeit der Drehung immer größer werden und unmittelbar an der Oberfläche gegen unendlich streben (für ein ruhendes Gyroskop).

Wie werden beim Fall irgendeines Körpers aus großer Entfernung zum rotierenden Schwarzen Loch für einen äußeren Beobachter die Ereignisse ablaufen?

Ein Körper, der auf das Schwarze Loch stürzt, wird zuerst in seiner Bewegung nach der Richtung der Rotation des Schwarzen Loches hin abweichen, schneidet dann die Grenze der Ergosphäre und nähert sich allmählich dem Horizont. Auf dem Horizont besitzen alle Körper ein und

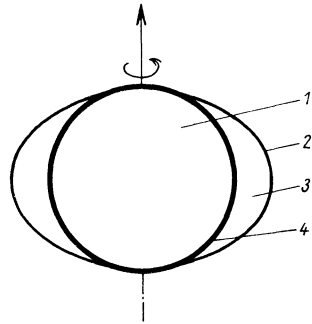


Abb. 6. Ein Schwarzes Loch mit Ergosphäre. 1 Schwarzes Loch; 2 Grenze der Ergosphäre; 3 Ergosphäre; 4 Horizont

dieselbe Umlaufgeschwindigkeit, gleichgültig, an welcher Stelle der fallende Körper den Horizont erreicht hat. Das ist eine sehr wichtige Eigenschaft des rotierenden Schwarzen Loches. In der Ergosphäre selbst können die Winkelgeschwindigkeiten der Bewegung der Körper *verschieden* sein, doch sobald sie die Oberfläche des Schwarzen Loches erreicht haben, besitzen die Körper *dieselbe* Winkelgeschwindigkeit. Sie kreisen gemeinsam mit der Oberfläche des Schwarzen Loches, als wären sie an der Oberfläche eines rotierenden festen Körpers angeklebt.

Für einen äußeren Beobachter wird das von ihnen empfangene Licht sehr schnell immer röter und schwächer, erlischt dann vollständig, und es wird für den äußeren Beobachter unsichtbar: Was unter dem Horizont geschieht, kann er nicht sehen. Wenn ein Beobachter in ein rotierendes Schwarzes Loch frei fällt, so erreicht er in einer endlichen Zeit den Horizont, ebenso wie im Falle eines nichtrotierenden Loches, und er wird weiter ins Innere fallen. Verlassen wir vorerst diesen Beobachter und kehren in den äußeren Raum, die Umgebung des Schwarzen Loches, zurück.

Die für alle fallenden Körper gemeinsame Winkelgeschwindigkeit auf dem Horizont des Schwarzen Loches ist zugleich die Geschwindigkeit seiner Rotation. Sie ist durch den Ausdruck $\Omega = 4\pi I/MS$ gegeben, wobei I der Drehimpuls des Körpers, aus dem das Schwarze Loch entstanden ist, M die Masse des Schwarzen Loches und S die Oberfläche seines Horizontes ist.

Es muß hier vermerkt werden, daß der Drehimpuls eines Schwarzen Loches der gegebenen Masse M nicht beliebig groß sein kann. Die Ursache liegt darin, daß bei der

Kontraktion eines Körpers, der hinreichend schnell rotiert, am Äquator Zentrifugalkräfte entstehen, die seiner Kontraktion in der Äquatorebene entgegenwirken. Der Körper kann sich weiter nur entlang der Rotationsachse zusammenziehen. Dann jedoch verwandelt er sich in einen „Eierkuchen“ mit einem Radius, der um vieles größer als der Gravitationsradius ist, und es entsteht kein Schwarzes Loch. Der maximal mögliche Drehimpuls eines Schwarzen Loches und seine maximale Winkelgeschwindigkeit der Rotation werden dadurch bestimmt, daß bei der Bildung des Schwarzen Loches die lineare Umlaufgeschwindigkeit der Punkte des Äquators nicht die Lichtgeschwindigkeit überschreitet. Die maximale Winkelgeschwindigkeit ist etwa von der Größenordnung des Verhältnisses von Lichtgeschwindigkeit zu Gravitationsradius: $\Omega_{\max} = c/r_g$. Für ein Schwarzes Loch von der Größe einer Sonnenmasse beträgt diese Winkelgeschwindigkeit $\Omega_{\max} \approx 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

Es ist offensichtlich, daß kein Schwarzes Loch mit einer Rotationsgeschwindigkeit, die größer als die maximale ist, entstehen kann. Aber es erhebt sich die Frage, ob man nicht die Rotationsgeschwindigkeit des Schwarzen Loches nach seiner Entstehung vergrößern kann, indem man (auf eine bestimmte Art und Weise) in das Schwarze Loch Teilchen wirft, die einen Drehimpuls mit sich führen.

Grundsätzlich kann man so die Winkelgeschwindigkeit der Rotation vergrößern, aber dabei ändert sich auch die Masse des Schwarzen Loches. Es erweist sich dabei folgendes: Sobald die Rotation des Schwarzen Loches ihren Maximalwert erreicht hat, kann dieses nur solche Teilchen einfangen, die in der Lage sind, Rotation und Masse übereinstimmend zu ändern, so daß die Rotation für die gegebene Masse nicht größer als die maximal mögliche wird. Wirft man in das Schwarze Loch Teilchen mit einem dem des Schwarzen Loches entgegengesetzten Drehimpuls, so verlangsamt es seine Rotation. Wenn sich das eingefangene Teilchen nicht innerhalb der Äquatorebene des Schwarzen Loches bewegt hat, so wird sich auch die Lage der Pole des Schwarzen Loches ändern, d. h. die Orientierung seiner Rotationsachse.

Das gravitative Einfangen von Teilchen durch ein Schwarzes Loch mit Rotation unterscheidet sich von dem gravitativen Einfangen durch ein nichtrotierendes Schwarzes Loch. Am leichtesten werden durch ein Schwarzes Loch

Teilchen eingefangen, die in seiner Nähe in die Richtung fliegen, die der Rotation entgegengesetzt ist. Mit viel größerer Anstrengung werden dagegen Teilchen eingefangen, die an ihm vorbei in Richtung der Rotation fliegen. Anschaulich kann man sich das so vorstellen, als wirke die wirbelförmige Komponente des Gravitationsfeldes ähnlich einer Schleuder, die die Teilchen, die sich am Schwarzen Loch vorbei in Richtung des sich aufwickelnden „Wirbels“ dieses Feldes bewegen, beschleunigt und hinauswirft und umgekehrt die Teilchen bremst und einfängt, die sich gegen den „Wirbel“ bewegen.

Wir wollen als Beispiel das Einfangen eines Lichtstrahls, der sich in der Äquatorebene bewegt, durch ein maximal schnell rotierendes Schwarzes Loch betrachten. Wir erinnern uns, daß im Fall eines nichtrotierenden Schwarzen Loches ein Photon, damit es eingefangen werden kann, an das Schwarze Loch bis auf eine Entfernung von $1,5 r_g$ herankommen muß. Weit entfernt vom Schwarzen Loch ist der Lichtstrahl charakterisiert durch den Stoßparameter

$$l_{\text{Einfang}} = \frac{3}{2} \sqrt{3} r_g.$$

In dem hier betrachteten Fall eines rotierenden Schwarzen Loches muß ein Lichtstrahl in Richtung der Rotation einen viel kleineren Stoßparameter besitzen: $l_{\text{Einfang } 1} = r_g/2$. Dagegen ist für einen Strahl entgegen der Rotationsrichtung der kritische Stoßparameter viel größer: $l_{\text{Einfang } 2} = 4 r_g$. Ebenfalls ändert sich die Situation in bezug auf die Kreisbahnen. Für ein Schwarzes Loch ohne Rotation besitzt die letzte stabile Kreisbahn den Radius $3 r_g$. Ein Teilchen, das sich auf ihr bewegt, hat die Geschwindigkeit $0,5 c$. Und das Allerwichtigste ist: Um auf diese Bahn zu gelangen, muß ein Teilchen der Masse m einen Energiebeitrag von $\Delta E = 6 \% mc^2$ abgeben (z.B. in Form von Gravitationsstrahlung).

Im Falle eines maximal schnell rotierenden Schwarzen Loches liegt die letzte Kreisbahn viel näher zum Horizont hin, tief innerhalb der Ergosphäre. Aber hier kann sich das Teilchen nur in Richtung der Rotation des Schwarzen Loches bewegen. Die Energie ΔE , die ein Teilchen, das auf diese Bahn gelangt, abgibt, ist um vieles größer als die für ein nichtrotierendes Schwarzes Loch und beträgt $42 \% mc^2$. Die letzte stabile Bahn eines Teilchens, das

sich um das Schwarze Loch in entgegengesetzter Richtung bewegt, liegt dagegen außerhalb der Ergosphäre, und ein Teilchen, das auf diese Bahn gelangt, gibt nur $\Delta E = 4\% mc^2$ Energie ab.

Ein Schwarzes Loch wird niemals kleiner

Die Prozesse, die in der Umgebung eines Schwarzen Loches ablaufen und die wir bisher betrachtet haben, lassen die Möglichkeit zu, seine gigantische Gravitationsenergie zu nutzen. So strahlt ein Teilchen der Masse m , das um ein rotierendes Schwarzes Loch kreist, wie wir oben gesehen haben, Gravitationswellen ab, die etwa 40 % der Gesamtenergie des Teilchens $E = mc^2$ mit sich tragen. Jedoch das Teilchen selbst (und ein Teil der Gravitationswellen) fällt schließlich in das Schwarze Loch und vergrößert dessen Masse und Größe.

Natürlich erhebt sich die Frage, ob man sich denn keinerlei Prozesse ausdenken kann, die mit einer Verringerung der Größe des Schwarzen Loches verbunden sind, und damit Energie gewinnen kann, die nicht an ein Objekt, das um das Schwarze Loch kreist, gekoppelt ist, sondern Energie aus dem Schwarzen Loch selbst. Vor allem ist es notwendig, die Frage zu konkretisieren. Die Gesamtenergie des Schwarzen Loches ist seine Gesamtmasse, multipliziert mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit: $E = Mc^2$. In diese Gesamtenergie (oder Masse) geht ebenfalls die Energie der Rotation des Schwarzen Loches ein. Somit bestimmt sich die Gesamtenergie (die Masse) des Schwarzen Loches sowohl durch seine Größe (durch die Fläche seiner Grenze – seines Horizontes) als auch durch seine Rotation. Es erweist sich, daß die Gesamtmasse M folgendermaßen durch die Fläche S des Horizontes und durch den Drehimpuls I des Schwarzen Loches ausgedrückt werden kann:

$$M = \sqrt{\frac{Sc^4}{16\pi G^2} + \frac{4\pi I^2}{Sc^2}}. \quad (2)$$

Wenn die Rotation fehlt ($I = 0$), so bestimmt sich die Gesamtmasse M allein aus der Fläche des Horizontes. Im

allgemeinen Fall ($I \neq 0$) beschreibt der zweite Summand in dem Wurzelausdruck der Formel (2) den Anteil „Rotations“energie an der Masse des Schwarzen Loches. Somit bestimmen die Größe des Schwarzen Loches und seine Masse (Energie) bei vorhandener Rotation einander nicht eindeutig. Deshalb bedeutet eine Änderung der Masse (Energie) des Schwarzen Loches nicht unbedingt eine Änderung seiner Größe. Es ist deshalb notwendig, unsere Frage in zwei andere zu teilen:

1. Existieren Prozesse, die Energie aus dem Schwarzen Loch gewinnen und seine Masse verringern?
2. Existieren Prozesse, die die Größe des Schwarzen Loches verringern?

(Wir sprechen gerade von einer *Verringerung* seiner Größe, da für eine Zunahme ausreichend ist, irgendeinen Körper in das Schwarze Loch zu werfen.)

Beginnen wir mit der ersten Frage. Alles, was wir über Schwarze Löcher erfahren haben, zwingt uns, eine negative Antwort darauf zu erwarten. Tatsächlich wissen wir, daß aus dem Schwarzen Loch nichts hinausgelangt, d. h., unterhalb des Horizontes läßt sich keine Energie gewinnen. Das ist richtig. Aber wir haben bei dieser Schlußfolgerung vergessen, daß ein Teil der Energie des Schwarzen Loches (und das bedeutet ein Teil der Masse) mit der Rotation gekoppelt ist, sich, bildhaft gesprochen, außerhalb des Schwarzen Loches befindet und in der wirbelförmigen Feldkomponente gebunden ist. Und gerade diesen Rota-

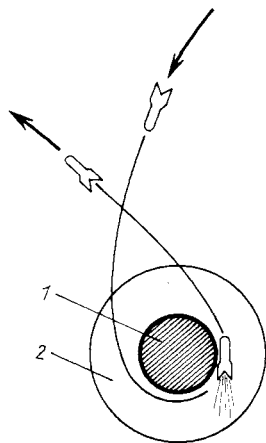


Abb. 7. Die Gewinnung von Energie aus einem rotierenden Schwarzen Loch (Blick vom Pol). 1 Schwarzes Loch; 2 Ergosphäre

tionsanteil der Energie kann man, wie sich herausstellt, dem Schwarzen Loch abgewinnen und dabei seine Masse verkleinern.

Wie ist das zu bewerkstelligen?

Wir wollen uns das folgende Experiment vorstellen (Abb. 7). In die Ergosphäre eines großen rotierenden Schwarzen Loches fliegt eine Rakete ein. Sie bewegt sich um das Schwarze Loch in Richtung der Rotation. In der Nähe des Schwarzen Loches schaltet der Pilot die Düsentriebwerke ein, die einen Gasstrahl auswerfen. Man kann die Bewegung der Rakete so ändern, daß die Gase in das Schwarze Loch fallen, die Rakete jedoch beschleunigt wird und mit riesiger Geschwindigkeit aus der Ergosphäre herausfliegt, wie von einer „Schleuder“ herauskatapultiert. Die riesige Geschwindigkeit der Rakete übersteigt um vieles die Geschwindigkeit, mit der die Rakete in die Ergosphäre hineinfiel, und ist um ein Vielfaches größer als die Geschwindigkeitsänderung, die durch die kurzzeitige Arbeit der Triebwerke der Rakete hervorgerufen wurde.

Was ist geschehen? Wir erinnern uns, daß um das Schwarze Loch herum ein rotierender Gravitationswirbel existiert. Die Raketentriebwerke zwangen die Rakete, auf eine solche neue Umlaufbahn überzugehen, wo sie, durch diesen Wirbel erfaßt, mit riesiger Geschwindigkeit aus der Ergosphäre ausgeschleudert wurde. Die Energie, die von der Rakete fortgetragen wurde, erhielt sie von dem Wirbel, d. h. von der „Rotations“energie des Schwarzen Loches. Die Rotation des Schwarzen Loches verringert sich dabei, und das bedeutet, daß sich auch der Drehimpuls I verringert. Entsprechend kleiner wird auch die Gesamtmasse M des Schwarzen Loches (um den Betrag, der von der Rakete fortgetragen wurde). Auf diese Art und Weise kann man aus dem Schwarzen Loch Energie „schöpfen“.

Was die Fläche des Horizontes betrifft, so führt der beschriebene Prozeß zu einer gewissen Vergrößerung dieser Fläche, da die Gase der Raketentriebwerke, wenn sie in das Schwarze Loch fallen, zusätzliche Masse hineintragen und dadurch seine Abmessungen vergrößern.

Die größte Menge an „Rotations“energie des Schwarzen Loches kann die Rakete forttragen (bei gleicher Arbeitsdauer der Raketentriebwerke), wenn die Triebwerke unmittelbar am Horizont eingeschaltet werden. In diesem Fall ändert sich die Größe des Horizontes nicht (solche Prozes-

se werden als umkehrbar bezeichnet). Eine derartige Einschaltung der Triebwerke kann man vielfach wiederholen, und man kann auf diese Weise dem Schwarzen Loch seine gesamte „Rotations“energie entnehmen, ohne seine eigentliche Größe zu verändern.

Es ist nicht schwer zu bestimmen, wieviel „Rotations“-energie man auf diese Art aus dem Schwarzen Loch „herauspumpen“ kann. Die Masse eines rotierenden Schwarzen Loches ist durch die Formel (2) gegeben. Wenn die gesamte „Rotations“energie abgeführt ist, rotiert das Schwarze Loch nicht mehr ($I = 0$), und es bleibt nur der erste Summand in dem Wurzelausdruck dieser Formel übrig. Bei maximal möglicher schneller Rotation des Schwarzen Loches ist der zweite Summand gleich dem ersten. Daraus erhalten wir leicht, daß man aus einem solchen Schwarzen Loch Energie gewinnen kann mit einem Betrag von $E_{\text{rot}} = (M_{\text{rot}} - M_{\text{nichtrot}}) c^2 = (1 - 1/\sqrt{2}) M_{\text{rot}} \cdot c^2 \approx 29 \% M_{\text{rot}} \cdot c^2$.

So verhält es sich mit der Antwort auf die erste Frage. Die zweite Frage zu beantworten war sehr viel schwerer. Aber auch sie ist heute gelöst. Es hat sich herausgestellt, daß sich die Fläche des Horizontes eines Schwarzen Loches niemals, bei keinerlei Prozessen, verringert. Selbst wenn einige Schwarze Löcher miteinander in Wechselwirkung treten, wird die Summe ihrer Horizontflächen nicht kleiner.

Das ist eine außerordentlich wichtige Eigenschaft. Aus ihr folgt z. B., daß sich ein Schwarzes Loch unter keinerlei Einwirkungen in zwei Schwarze Löcher teilen kann. Wenn so etwas möglich wäre, dann müßte bei Erhaltung der Energie die Summe der Horizontflächen der entstandenen Löcher kleiner sein als die Fläche des ursprünglichen Schwarzen Loches. (Wir werden uns hier nicht mit dem detaillierten Beweis dieses Sachverhaltes aufhalten. Der Leser kann das leicht selbständig durchführen, wenn er die oben angegebenen Formeln benutzt.) Folglich ist es unmöglich, wie sehr auch Gezeitenkräfte an einem Schwarzen Loch zerren mögen, auf welche Art auch immer wir auf dieses einwirken, ein Schwarzes Loch in Teile zu „zerreißen“.

Kann man Energie aus nichtrotierenden Schwarzen Löchern erhalten?

In den vorangegangenen Kapiteln haben wir uns mit einigen Möglichkeiten vertraut gemacht, Schwarze Löcher als Energiequelle zu nutzen. Wir wissen jetzt, wie man einem Schwarzen Loch die „Rotations“energie entziehen kann, und wir wissen, daß es unmöglich ist, die Größe eines Schwarzen Loches zu verringern. Es hat den Anschein, daß, wenn ein Schwarzes Loch nicht rotiert (und keine „Rotations“energie besitzt), man auch keine Energie aus ihm gewinnen kann. Tatsächlich ist das jedoch nicht so: Unterhalb des Horizonts kann man keine Energie gewinnen. Aber ein Schwarzes Loch ist von einem mächtigen Gravitationsfeld umgeben, und man kann, wie sich herausstellt, die Energie dieses Feldes nutzen. Das „reinste“ Experiment, bei dem nur die Gravitationsfelder nichtrotierender Schwarzer Löcher vorhanden sind, ist das folgende. Wir wollen uns zwei nichtrotierende Schwarze Löcher vorstellen, die sich zuerst weit entfernt voneinander befinden, die sich aber entlang der Verbindungsgeraden aufeinander zu bewegen. Entfernt von solchen Schwarzen Löchern sind die Gravitationsfelder schwach und gehorchen der Newtonschen Theorie. Deshalb bewegen sich zwei Schwarze Löcher im Raum, wenn sie weit genug voneinander entfernt sind, ähnlich wie zwei gewöhnliche Sterne. Ihre Geschwindigkeit muß sich jedoch unter der Wirkung der gegenseitigen Anziehung allmählich vergrößern, und nach genügend weiter Annäherung wird die ungestüme, beschleunigte Bewegung der Schwarzen Löcher aufeinander zu von einer mächtigen Strahlung von Gravitationswellen begleitet. Diese Strahlung ist auch der Prozeß, mit dessen Hilfe es möglich ist, Energie aus dem Gravitationsfeld Schwarzer Löcher zu gewinnen. Sich nähernd, vereinigen sich die Schwarzen Löcher zu einem einzigen Schwarzen Loch (im Unterschied zur Zweiteilung eines Schwarzen Loches ist der Vereinigungsprozeß möglich!). Die Masse des sich bildenden Schwarzen Loches ist dabei kleiner als die Summe der Massen der sich vereinigenden Schwarzen Löcher. (Das ist eine direkte Folge dessen, daß ein Teil der Energie durch die Gravitationswellen fortgetragen wird und das neue Schwarze Loch weniger Energie, d. h. auch

weniger Masse, besitzt, da $E = mc^2$.) Bei einem solchen Prozeß können die Gravitationswellen einen beträchtlichen Teil der Summe der Massen der sich vereinigenden Schwarzen Löcher forttragen.

In dem oben angeführten Fall ist bis zum Zusammenstoß und danach nichts vorhanden außer den nichtrotierenden Schwarzen Löchern, ihren Gravitationsfeldern und den Gravitationswellen, die im Ergebnis des Zusammenstoßes abgestrahlt werden. Diese Wellen können im Prinzip durch Gravitationsantennen aufgefangen werden, und ihre Energie könnte in andere Energieformen transformiert werden. Folglich kann man auch Energie aus nichtrotierenden Schwarzen Löchern gewinnen, genauer gesagt, aus den sie umgebenden Gravitationsfeldern.

Zum Schluß dieses Kapitels wollen wir noch unterstreichen, daß nach der Vereinigung zweier Schwarzer Löcher die Horizontfläche des entstehenden neuen Schwarzen Loches größer ist als die Summe der Horizontflächen der Schwarzen Löcher vor ihrer Vereinigung. Damit wird auch hier die wichtigste Eigenschaft, die wir im vorangegangenen Kapitel festgestellt haben, beachtet: *Die Summe der Horizontflächen von Schwarzen Löchern nimmt niemals ab.*

Schwarze Löcher sind nach ihrer Entstehung wie bodenlose Abgründe, die man auf keine Art und Weise verkleinern, durch nichts ausfüllen und durch nichts „verstopfen“ kann. Sie sind ewige „Löcher“ in Zeit und Raum, nur in der Lage, sich durch in sie hineinfallende Materie zu vergrößern.

Tatsächlich ist, wie wir im weiteren sehen werden, nicht alles so düster. Erstens sind Schwarze Löcher, wenn sie unter realen Bedingungen bestehen, wegen ihres riesigen Gravitationsfeldes in der Lage, sehr stürmische Prozesse hervorzurufen. Zweitens bringen Quantenprozesse, die wir bisher nicht berücksichtigt haben, Korrekturen in das von uns gezeichnete Bild. Aber darüber werden wir konkreter erst im weiteren sprechen.

Die „Gravitationsbombe“

Bisher, als wir die Prozesse um ein Schwarzes Loch und Möglichkeiten, aus ihm Energie zu gewinnen, betrachteten,

haben wir nur erfahren, daß man diese Energie entweder in Form von Gravitationswellen gewinnen kann oder in Form kinetischer Energie von Körpern, die aus der Ergosphäre hinausgeschleudert werden. Aber es stellt sich heraus, daß erstaunlichere und unerwartete Möglichkeiten existieren, die Schwarzen Löcher als Energiegeneratoren zu nutzen.

Stellen wir uns einmal vor, daß ein rotierendes Schwarzes Loch mit elektromagnetischen Wellen bestrahlt wird. Was wird dabei geschehen? Auf den ersten Blick ist da nichts Besonderes. Ein Teil der Wellen wird durch das Schwarze Loch gravitativ eingefangen und verschwindet darin für immer. Andere Wellen werden, während sie das Schwarze Loch passieren, ihre Bahn krümmen. Die Änderung der Ausbreitungsrichtung von Wellen wird als Streuung bezeichnet. Die gestreuten elektromagnetischen Wellen werden, wenn sie sich vom Schwarzen Loch entfernen, dieselbe Frequenz besitzen, die sie bei der Annäherung besaßen. Natürlich änderte sich die Frequenz der Wellen bei der Bewegung in der Nähe des Schwarzen Loches in dem starken Gravitationsfeld. Als sich die Wellen zum Schwarzen Loch hin ausbreiteten, vergrößerte sich ihre Energie, die Frequenz wuchs, die Wellen erhielten eine Violettverschiebung. Danach, beim Entfernen vom Schwarzen Loch, erhielten die Wellen eine Rotverschiebung, und weit entfernt vom Schwarzen Loch hatte die Frequenz schließlich wieder ihren ursprünglichen Wert.

Also zeichnet sich das folgende Bild ab: Bei der Bestrahlung des Schwarzen Loches fällt ein Teil der elektromagnetischen Wellen hinein, ein Teil jedoch wird mit derselben Frequenz gestreut. Da ein Teil der elektromagnetischen Wellen für immer von dem Schwarzen Loch eingefangen wird, ist die Intensität der gestreuten Wellen kleiner als die ursprüngliche Intensität des ausgesendeten Wellenbündels. Bisher sieht alles trivial aus. Wie sich herausstellt, ist es jedoch möglich, daß die Intensität der gestreuten Wellen größer wird als die der einfallenden. Dafür ist es notwendig, daß die Frequenz der einfallenden Wellen hinreichend klein ist.

Es sei ω die Frequenz der Wellen, n ihr Orbitalmoment und Ω die Rotationsfrequenz des Schwarzen Loches. Dann wird die Intensität der gestreuten elektromagnetischen Wellen größer sein als die der einfallenden, wenn die Bedingung

$$\omega < n\Omega$$

(3)

erfüllt ist. Dieser Verstärkungsprozeß erhielt die Bezeichnung Superradiation. Die Superradiation ist ihrem Wesen nach analog dem von uns früher betrachteten Vorgang der Energiezunahme eines Körpers, der aus der Ergosphäre herausgeschleudert wird und „Rotations“energie des Schwarzen Loches aufnimmt. (Bei der Superradiation wird ebenfalls „Rotations“energie vom Schwarzen Loch abgeführt.) Es sollte vermerkt werden, daß bei der Bestrahlung eines rotierenden Schwarzen Loches mit elektromagnetischen Wellen deren Verstärkung nicht sehr groß ist. Die maximal mögliche Energieverstärkung einer elektromagnetischen Welle beträgt nur 4,4 %.

Die Erscheinung der Superradiation tritt bei der Bestrahlung eines Schwarzen Loches nicht nur bei elektromagnetischen Wellen auf, sondern auch bei anderen Formen von Strahlung. So werden z. B. niederfrequente Gravitationswellen verstärkt, die auf ein rotierendes Schwarzes Loch fallen. Dabei ist die Bedingung für die Entstehung der Superradiation für alle Formen von Strahlung gleich; sie ist durch die Ungleichung (3) gegeben. Der Verstärkungskoeffizient ist jedoch für verschiedene Arten von Strahlung unterschiedlich. So beträgt er für Gravitationswellen 138 %, d. h., er ist um vieles größer als für elektromagnetische Strahlung. Aber wir wollen zu den elektromagnetischen Wellen zurückkehren.

Wir umgeben ein rotierendes Schwarzes Loch mit einer Sphäre, die elektromagnetische Wellen reflektiert. Im Innern dieser Sphäre soll sich wenigstens eine äußerst geringe Anzahl von elektromagnetischen Wellen befinden, für die die Bedingung der Entstehung von Superradiation erfüllt ist. Diese Wellen werden, sobald sie auf das Schwarze Loch treffen, verstärkt und laufen vom Schwarzen Loch weg. Hier treffen sie auf die reflektierende Sphäre und streben wiederum zum Schwarzen Loch, wo sie erneut verstärkt werden. Dieser Vorgang wiederholt sich immer wieder, und die Energie der sich verstärkenden Strahlung wird lawinenartig anwachsen.

Wenn man in die reflektierende Sphäre eine Öffnung macht, so wird ein Teil der verstärkten Wellen durch diese nach außen dringen. Dadurch wird unsere Einrichtung zu einem Generator von elektromagnetischen Wellen, in dem

die „Rotations“energie des Schwarzen Loches unmittelbar in elektromagnetische Strahlung transformiert wird.

Wir nehmen jetzt an, daß in der reflektierenden Sphäre keine Öffnung vorhanden ist und daß die ganze Sphäre die sich verstärkende Strahlung reflektiert. Dann wird im weiteren Verlauf die elektromagnetische Energie im Innern der Konstruktion katastrophenartig anwachsen, bis der Strahlungsdruck die reflektierende Sphäre zersprengt, d. h., es findet eine Explosion statt. Eine derartige Konstruktion wurde „Gravitations“bombe getauft.

Es muß betont werden, daß die Herstellung derartiger gravitativ wirksamer Konstruktionen, die elektromagnetische Energie erzeugen, heute völlig undenkbar ist, da wir nicht in der Lage sind, mittels überstarker Verdichtung von Materie künstliche Schwarze Löcher zu erzeugen. (Darüber hatten wir bereits in den obigen Ausführungen gesprochen.)

Was ereignet sich innerhalb eines Schwarzen Loches?

Nachdem wir uns mit einigen Prozessen bekanntgemacht haben, die in der Umgebung eines Schwarzen Loches stattfinden können, wenden wir uns nun dem fesselndsten Gebiet zu. Wir werden uns bemühen, zur Grenze des Schwarzen Loches, zum Rand dieses bodenlosen Abgrundes (man kann ihn auf keinerlei Weise füllen!) vorzudringen, und wir werden versuchen hineinzusehen. Übrigens wissen wir, daß das Wort „hineinsehen“ hier nicht am Platze ist. Es ist selbst dann unmöglich zu sehen, was sich in einem Schwarzen Loch ereignet, wenn man seine Grenze erreicht. Um hineinzusehen, muß man sich in das Schwarze Loch begeben. Das ist im Prinzip möglich, z. B., wenn man sich in einem im Schwerfeld des Schwarzen Loches frei fallenden Raumschiff befindet. Solch ein frei fallender Beobachter wird in endlicher Eigenzeit den Horizont erreichen und weiter fallen.

Aber wir wissen bereits, daß solch eine Reise für den Kosmonauten die ernstesten Folgen haben wird. Aus einem Schwarzen Loch kann ja nichts zurückkehren, nichts tritt in den äußeren Raum aus. Und auch der Kosmonaut kann niemals zurückkehren, wie hoch auch die Leistung

der Triebwerke seines Raumschiffes sein möge. Er kann uns auch keinerlei Mitteilung über seine Beobachtungen senden, obwohl er weiterhin Nachrichten von uns empfängt. Nichtsdestoweniger ist solch eine Reise im Prinzip möglich. Was erwartet ihn denn innerhalb eines Schwarzen Loches? Bevor wir uns mit dem Kosmonauten auf die Reise begeben, erinnern wir uns noch an eine uns allen bekannte gravitative Erscheinung. Wir sprechen von den Gezeitenkräften. Diese Kräfte treten auf, da alle Körper, die sich im Schwerfeld befinden, bestimmte Ausmaße besitzen. Das Schwerfeld ist immer inhomogen, und verschiedene Punkte eines Körpers im Schwerfeld unterliegen etwas unterschiedlichen Anziehungskräften.

Angenommen, ein Körper befindet sich im Schwerfeld eines Planeten. Die Punkte des Körpers, die näher am Planeten liegen, werden etwas stärker angezogen als die entfernteren Punkte. Diese Differenz der Anziehungskraft, die als Gezeitenkraft bezeichnet wird, strebt dahin, den Körper auseinanderzudehnen und zu zerreißen. Die Gezeitenkraft ist um so stärker, je mehr sich das Schwerfeld von Punkt zu Punkt ändert. Diese „Kräftedifferenz“ tritt sowohl beim freien Fall als auch bei Ruhe der Körper auf. Darin unterscheidet sie sich deutlich von der Wirkung der Schwerkraft selbst, die im Zustand des freien Falls nicht auftritt.

Selbstverständlich sind die Gezeitenkräfte unter gewöhnlichen Bedingungen, wie etwa in der Kabine eines Raumschiffes, das um die Erde kreist, verschwindend klein. Unmerklich sind sie auch für gewöhnliche Körper auf der Erdoberfläche. Aber die Gezeitenkräfte sind den Ausmaßen des Körpers proportional. Deshalb treten sie (sogar ziemlich deutlich) für die gesamte Erde auf, die der Anziehung von seiten des Mondes ausgesetzt ist. Die erwähnten Kräfte rufen die Gezeiten in den Ozeanen hervor. Daher kommt auch ihre Bezeichnung.

Kehren wir nun zu dem Beobachter zurück, der in ein Schwarzes Loch fällt. Wir wollen unsere Betrachtung mit dem einfachsten Fall eines nichtrotierenden sphärisch-symmetrischen Schwarzen Loches beginnen. Wir plazieren zunächst einen angenommenen Beobachter auf die Oberfläche eines Sterns, der sich im Zustand des relativistischen Kollapses befindet. Dabei leisten die Druckkräfte der Sternmaterie der wachsenden Gravitation praktisch keiner-

lei Widerstand mehr, die Sternoberfläche unterschreitet den Gravitationsradius und zieht sich weiter zusammen. Der Prozeß kann nicht zum Stehen kommen, und innerhalb eines kurzen Zeitintervalls (gemessen auf der Uhr des Beobachters auf der Sternoberfläche) zieht sich diese Oberfläche in einen Punkt zusammen, wobei die Materiedichte unendlich wird. Es wird ein singulärer Zustand, wie die Physiker sagen, erreicht. Wodurch wird dieser Zustand charakterisiert?

Ohne auf Details einzugehen, antworten wir auf diese Frage wie folgt: Bei der Annäherung an eine Singularität streben die Gezeitenkräfte gegen unendlich. Das bedeutet, daß ein beliebiger Körper (einschließlich unseres angenommenen Beobachters) in Stücke zerrissen wird. Wir weisen noch darauf hin, daß auch jeder Körper, der bereits nach dem Kollaps eines Sterns in ein sphärisches Schwarzes Loch fällt, die Singularität erreicht.

Kann man auf irgendeine Weise den Sturz in die Singularität vermeiden, wenn sich der Körper bereits unter dem Horizont befindet? Es stellt sich heraus, daß das unmöglich ist. Der Fall in die Singularität ist dann unvermeidlich. Unabhängig davon, welche Manöver der Kosmonaut in seiner Rakete unternimmt und wie leistungsfähig die Triebwerke sind, fällt die Rakete rasch in die Singularität. Die „längste“ Zeit, die eine Rakete unter dem Horizont eines Schwarzen Loches der Masse M bis zum Fall in die Singularität existieren kann, beträgt $\tau_{\max} = 10^{-5} (M/M_{\odot})$ s, wobei $M_{\odot}$ die Masse der Sonne ist. Um diese „längste“ Zeit zu existieren, muß das Raumschiff folgendes Manöver durchführen. Beim Fall in ein Schwarzes Loch müssen die Triebwerke bei Annäherung an den Horizont auf volle Leistung gestellt werden, so daß am Horizont selbst das Raumschiff nahezu zum Halt kommt. Danach müssen die Triebwerke ausgestellt werden, so daß das Raumschiff entlang des Radius (vom Horizont zur Singularität) frei fällt. Die Zeit eines solchen Falls ist gerade die maximal mögliche Existenzzeit. Ein jeder Versuch des Kosmonauten, mit Hilfe der Triebwerke irgendwie den Fall innerhalb des Schwarzen Loches zu bremsen oder das Raumschiff auf eine Kreisbahn zu bringen, führt nur dazu, daß das Raumschiff schneller als innerhalb der Zeit $\tau_{\max}$ (nach der Uhr des Kosmonauten) in die Singularität fällt. Diese Verkürzung der Fallzeit hängt mit der sog. Lorentzschen

Zeitverkürzung zusammen, die bei der Beschleunigung des Raumschiffes auftritt.

Wir kehren jetzt zu den Gezeitenkräften zurück, die auf den Kosmonauten und das Raumschiff sowohl außerhalb als auch innerhalb des Schwarzen Loches wirken. Zunächst berechnen wir diese Kräfte.

Angenommen, das Raumschiff, in dem sich unser Kosmonaut befindet, fällt frei in ein Schwarzes Loch der Masse M . Wir wollen untersuchen, welche Kräfte auf den Kosmonauten wirken. Wir nehmen an, er sei 1,80 m groß und 75 kg schwer. Der Kosmonaut soll sich aufrecht im Raumschiff befinden, und zwar derart, daß die Richtung vom Kopf zu den Füßen mit der Richtung zum Zentrum des Schwarzen Loches übereinstimmt. Dann wirkt auf den Kosmonauten zwischen Kopf und Füßen folgende Dehnkraft:

$$F_1 = 10^{14} (M/M_{\odot})/R^3 \text{ Pa}, \quad (4)$$

wobei R der Abstand des Raumschiffes, in Kilometern ausgedrückt, vom Zentrum des Schwarzen Loches ist ($1 \text{ Pa} = 10 \text{ dyn/cm}^2$).

Das ist aber noch nicht alles. Die Gezeitenkraft dehnt den Körper nicht nur entlang der radialen Richtung aus, sondern staucht ihn auch senkrecht zu dieser Richtung zusammen. Deshalb wird der Kosmonaut im Querschnitt durch die folgende Kraft zusammengequetscht:

$$F_2 = 10^{13} (M/M_{\odot})/R^3 \text{ Pa}. \quad (5)$$

Wir stellen fest, daß sich ein Mensch in einem Raumschiff einem Schwarzen Loch nähern kann und z. B. seine Grenze (die Kugelschale mit dem Gravitationsradius r_g) erreichen kann, ohne Gefahr zu laufen, von den Gezeitenkräften zerrissen zu werden, wenn das Schwarze Loch genügend groß ist, so daß $R^3 = r_g^3$ in den Formeln (4) und (5) genügend groß ist.

Der menschliche Körper kann Druck- oder Zugkräfte in der Größenordnung bis 10^7 Pa ($= 10^8 \text{ dyn/cm}^2$) aushalten. Mit Hilfe der Formeln (4) und (5) finden wir, daß der Gravitationsradius r_g des Schwarzen Loches größer als 3000 km sein muß und die Masse des Schwarzen Loches dementsprechend größer als 1000 Sonnenmassen, damit der Mensch ohne Gefahr den Gravitationsradius erreichen

kann. Kleineren Schwarzen Löchern kann sich der Mensch nicht lebend nähern.

Es versteht sich von selbst, daß beim Sturz eines Raumschiffes in ein sogar sehr großes Schwarzes Loch, an dessen Grenze der Mensch nicht Gefahr läuft, von den Gezeitenkräften zerrissen zu werden, das Raumschiff schließlich unaufhaltsam in die Singularität fällt. Letztlich zerreißen dann die unbegrenzt wachsenden Gezeitenkräfte früher oder später jeden beliebigen Körper. So wird ein Kosmonaut, der nicht seinem Leben durch Selbstmord ein Ende setzen möchte, nicht aufgrund eigener Initiative versuchen, in ein Schwarzes Loch einzudringen. Es scheint so, als wären wir zu einem äußerst unerfreulichen Schluß gekommen. Selbst wenn irgendein sehr neugieriger Kosmonaut in ein Schwarzes Loch vordringen möchte, um es von innen zu untersuchen, und dabei in Kauf nimmt, nicht in den äußeren Raum zurückkehren zu können, wird er seinen Plan aufgeben, da er bei seiner Annäherung an die Singularität sehr bald von den Anziehungskräften zerrissen würde.

Wir möchten jedoch bemerken, daß wir bisher ein aus einem exakt kugelförmigen Körper entstandenes Schwarzes Loch untersucht haben, und der Schluß über die Unvermeidbarkeit des Falls in die Singularität innerhalb des Schwarzen Loches bezieht sich nur auf dieses vereinfachte Modell.

Auf den ersten Blick mag es ungewöhnlich erscheinen, daß wir erneut zum Problem des relativistischen Kollapses nichtkugelförmiger Körper zurückkehren. Wir wissen ja bereits, daß selbst beim Kollaps eines extrem asymmetrischen (aber nicht rotierenden!) Körpers schließlich ein sphärisch-symmetrisches Schwarzes Loch entsteht. Warum sprechen wir dann von neuem über das Problem der Asymmetrie bei der Erörterung der Singularität im Schwarzen Loch?

Der Grund liegt darin, daß beim Kollaps eines nichtkugelförmigen Körpers *nur* das *äußere* Gravitationsfeld und der Horizont (die Grenze) des Schwarzen Loches sphärisch-symmetrisch werden. Erinnern wir uns daran, daß dieses Bestreben, das äußere Feld zu „glätten“, daher rührt, daß Abweichungen von der idealen Kugelsymmetrie im Zuge des Kollapses als Gravitationswellen in den Raum „ausgestrahlt“ werden und teilweise ins Innere des Schwar-

zen Loches eindringen. Im Ergebnis bleibt außen nur das sphärisch-symmetrische Gravitationsfeld. Wenn wir uns jedoch jetzt dem inneren Gebiet des Schwarzen Loches zuwenden, so stellen wir fest, daß außerhalb des Horizontes keine Gravitationswellen heraustreten können. Deshalb können sie auch keine übriggebliebenen „Abweichungen von der Kugelsymmetrie“ nach außen transportieren. Im Innern des Schwarzen Loches bewegen sich sogar alle Gravitationswellen nach innen, wobei sie zusammentreffen und die Amplituden wachsen.

Auf diese Weise wird die Abweichung von der Kugelsymmetrie bei der Bewegung in die Tiefe des Schwarzen Loches nur anwachsen. Daher ist auch die Schlußfolgerung unrichtig, daß ein nichtrotierendes Schwarzes Loch auch im Innern sphärisch-symmetrisch sein muß. Außen ist es tatsächlich sphärisch-symmetrisch, innen nicht.

Wohin führt die Abweichung von der Kugelsymmetrie im Innern eines Schwarzen Loches? Tritt beim relativistischen Kollaps eines nichtkugelförmigen Körpers eine Singularität auf? Und wenn sie auftritt, fällt dann die in das Schwarze Loch stürzende Materie immer in die Singularität?

Hier gelangen wir in ein Gebiet, in dem es sehr viele ungelöste Probleme gibt und Antworten selbst auf viele der wichtigsten Fragen fehlen. Darüber, was im Innern eines realen Schwarzen Loches (ohne ideale Kugelsymmetrie) geschieht, ist sehr wenig bekannt.

Dennoch ist etwas (und dabei sehr Wichtiges!) bekannt. Bevor wir jedoch unsere Darlegung fortsetzen, bemerken wir, daß sich die Unbestimmtheit unserer Kenntnisse über den inneren Aufbau Schwarzer Löcher in gleichem Maße auch auf rotierende Schwarze Löcher bezieht. Deshalb wird unsere weitere Untersuchung gleichzeitig auch den allgemeinsten Fall eines beliebig rotierenden Schwarzen Loches berühren.

Die Theoretiker stellten z. B. folgendes fest: Wenn sich im allgemeinsten Fall des relativistischen Kollapses eines nichtsphärischen und rotierenden Körpers ein Schwarzes Loch bildet, dann tritt in seinem Innern unvermeidlich eine Singularität auf. Diese wichtige Behauptung wurde von dem englischen Theoretiker R. Penrose bewiesen.

Es gelang aber bisher noch nicht, etwas über die Natur dieser Singularität zu erfahren, und es ist unbekannt, ob dort unendliche Gezeitenkräfte auftreten. Weiterhin ist

unbekannt, ob alle Materieteilchen und Strahlungsquanten unter dem Horizont des Schwarzen Loches unvermeidlich in die Singularität fallen müssen. Die Theorie behauptet lediglich, daß zumindest ein (!) Materieteilchen oder ein (!) Strahlungsquant nicht beliebig lange nach der Entstehung des Horizonts des Schwarzen Loches existieren kann und daß seine Existenz in der Singularität aufhören muß. Das ist alles. Es ist sehr wenig, aber die Physiker wollen natürlich mehr in Erfahrung bringen.

Immerhin werden die Untersuchungen fortgesetzt. Es wurde z. B. der sehr spezifische Fall des Kollapses einer elektrisch geladenen Kugel, in dessen Resultat eine erstaunliche Situation eintritt, untersucht. Die Materie einer solchen Kugel dringt nach der Bildung des Schwarzen Loches tief unter den Horizont ein. Dabei wird aber keine unendliche Dichte erreicht, da zu einer bestimmten Zeit das Zusammenziehen in Ausdehnung übergeht. Das geschieht, weil sich die Singularität in diesem Fall außerhalb der Kugel befindet und die Materie nicht auf die Singularität auftreffen kann.

Es bleibt zu unterstreichen, daß sich die Materie dabei nicht in den äußeren Raum ausdehnt (aus dem sie sich zusammengezogen hat), sondern „in die Tiefe“ des Schwarzen Loches. Die Materie dehnt sich, bildlich gesprochen, in einen „neuen Raum“ aus. Erinnern wir uns daran, daß Raum und Zeit im starken Gravitationsfeld stark gekrümmt sind und eine entsprechend komplizierte topologische Struktur besitzen können. Dem Laien fällt es schwer, sich solch eine Situation anschaulich vorzustellen, aber wir können hier nicht ausführlicher darauf eingehen. Es ist unbekannt, ob beim relativistischen Kollaps eines realen Körpers etwas Ähnliches passiert, wie in den hier betrachteten sehr stark vereinfachten Varianten. Die Mehrheit der Wissenschaftler nimmt an, daß in einer realen Situation alle Materie des Schwarzen Loches nach seiner Bildung die Singularität erreicht, wo die Gezeitenkräfte unbegrenzt wachsen.

In der Nähe der Singularität selbst werden bereits die Gesetze der Quantenphysik wirksam. Über diese Quantenprozesse wird weiter unten berichtet. Vorläufig unterstreichen wir noch einmal: Alle Prozesse, die unter dem Horizont eines Schwarzen Loches ablaufen, kann der äußere Beobachter nie sehen.

Nichts ist einfacher und nichts komplizierter als Schwarze Löcher

Wir haben uns nun mit der Physik der Schwarzen Löcher bekannt gemacht und damit, was in ihrer Umgebung geschieht und in ihrem Innern geschehen kann. Der Leser wird uns sicher darin zustimmen, daß Schwarze Löcher außergewöhnliche Objekte sind, die keinem der bisher bekannten ähneln. Sie sind keine Körper im herkömmlichen Sinne des Wortes und keine Strahlung. Sie sind „Löcher“ in Raum und Zeit, die wegen der sehr starken Krümmung des Raumes und der Änderung des Charakters des Zeitflusses im extrem starken Gravitationsfeld auftreten. In den vorangegangenen Kapiteln haben wir jedoch auch gezeigt, daß Schwarze Löcher in gewisser Hinsicht sehr einfache Objekte sind. Ihre Eigenschaften hängen in keiner Weise von den Eigenschaften der kollabierenden Materie, von der ganzen Kompliziertheit des Aufbaus der Materie, ihrer atomaren Struktur oder den in ihr enthaltenen physikalischen Feldern ab. Sie hängen nicht davon ab, ob die Materie aus Wasserstoff oder aus Eisen war usw. Bei der Bildung des Schwarzen Loches verschwinden für den äußeren Beobachter alle Eigenschaften des kollabierenden Körpers, sie beeinflussen weder die Grenze des Schwarzen Loches noch irgend etwas anderes im äußeren Raum. Es bleibt bloß das Gravitationsfeld übrig, das nur durch zwei Parameter – Masse und Drehimpuls – charakterisiert wird. (Wir haben schon gesagt, daß Himmelskörper üblicherweise keine globalen elektrischen Ladungen besitzen.) Durch diese Parameter werden sowohl die Form des Schwarzen Loches als auch seine Größe und alle übrigen Eigenschaften bestimmt. Man kann also mit absoluter Gewißheit sagen, daß nichts einfacher als ein Schwarzes Loch ist. Der menschliche Körper z. B. ist unvergleichlich komplizierter.

Es ist aber auch nichts komplizierter als ein Schwarzes Loch. Die menschliche Phantasie ist doch gar nicht in der Lage, sich vorzustellen, wie weit die Raumkrümmung und die Veränderung des Zeitflusses gehen, die so stark sind, daß in ihnen ein „Loch“ entsteht. Das Beschäftigen mit der Physik Schwarzer Löcher erlaubt es, unsere Vorstellungen über die fundamentalen Eigenschaften von Raum und Zeit

zu erweitern. Wie wir im weiteren sehen werden, treten in der Umgebung Schwarzer Löcher z. B. Quantenprozesse auf, die die komplizierte Struktur des sog. physikalischen Vakuums aufdecken. Noch gewaltigere Quantenprozesse finden im Innern des Schwarzen Loches selbst statt (in der Umgebung der Singularität). Die experimentelle Entdeckung Schwarzer Löcher in der Natur wäre für die Naturwissenschaft ungeheuer wichtig. Wir könnten neue Gesetze untersuchen, die die Eigenschaften von Raum und Zeit in starken Gravitationsfeldern bedingen, neue Gesetze, die die Bewegung der Materie unter außergewöhnlichen Bedingungen beschreiben. Die Schwarzen Löcher sind, bildlich gesprochen, das „Tor“ zu einem neuen, sehr ausgedehnten Gebiet unserer Erkenntnis der physikalischen Welt.

Wie real sind nun die Schwarzen Löcher? Wir sagten bereits, daß es vorläufig unmöglich ist, sie künstlich herzustellen. Wie es sich herausstellte, ist jedoch ihre Entstehung im All auf natürlichem Wege möglich. Wir wenden uns jetzt der Frage zu, wie das in der Wirklichkeit geschieht, wie im All jene Eigenschaften Schwarzer Löcher in Erscheinung treten, mit denen wir uns bekannt gemacht haben.

Schwarze Löcher müssen im Weltall existieren

Die Theorie der Sternentwicklung behauptet, daß Schwarze Löcher in den späten Entwicklungsstadien massereicher Sterne auftreten müssen. Wir wollen uns in allgemeinen Zügen in Erinnerung bringen, wie die Sternentwicklung verläuft.

Auf einen Stern, der eine Gaskugel ist, wirken zwei entgegengesetzt gerichtete Kräfte: die Schwerkraft und der Druck des Gases bei hohen Temperaturen. Der stabile Zustand des Sterns wird dadurch garantiert, daß beide Kräfte gleich groß sind. Ein heißer Stern strahlt ständig Energie von seiner Oberfläche ab. Wenn dieser Verlust nicht kompensiert würde, würde der Stern seine Wärmeenergie verlieren und zu kontrahieren beginnen. Das passiert allerdings nicht, da in der Umgebung des Sternenzentrums, wo die Temperaturen hoch genug sind, Kernreak-

tionen ablaufen, die von der Freisetzung einer riesigen Energiemenge begleitet werden. Dabei unterliegen zunächst Wasserstoff und Helium, später auch die schweren Elemente Kohlenstoff, Sauerstoff usw., dem „Kernbrennen“. Die Kernreaktionen sind die Quelle für die Energie, die die Sterne in den Raum ausstrahlen. Im Zuge des Verbrennens des „Kernbrennstoffs“ erschöpft sich der Vorrat des Sterns an Kernenergie. Die Dauer des „Kernbrennens“ – dieser aktiven Periode im Leben des Sterns – wird von der Geschwindigkeit des Energieverlustes durch Strahlung und den Vorräten an Kernbrennstoff bestimmt. Sowohl das eine wie auch das andere hängen von der Masse des Sterns ab. Deshalb wird auch die Lebensdauer eines Sterns durch seine Masse bestimmt. Ein Stern mit einer Sonnenmasse lebt ungefähr zehn Milliarden Jahre. Die Sonne ist etwa fünf Milliarden Jahre alt. Schwerere Sterne leben kürzer. So lebt ein Stern mit drei Sonnenmassen eine Milliarde Jahre, ein Stern mit 10 Sonnenmassen nur 100 Millionen Jahre. Nachdem die Kernenergie eines Sterns verbraucht ist, kontrahiert er langsam, wobei er weiterhin Energie durch Strahlung verliert. Wenn seine Masse nicht größer als 1,2 Sonnenmassen ist, wird die Kontraktion, sobald der Radius des Sterns einige tausend Kilometer beträgt, beendet. Die Materiedichte kann dabei 10^9 g/cm^3 erreichen. Diese Sterne erhielten die Bezeichnung Weiße Zwerge. Sie sind den Astronomen schon lange bekannt. Nachdem sich ein Stern in einen Weißen Zwerg verwandelt hat, erkaltet er, wobei sich seine Ausmaße praktisch nicht verringern. Der Gasdruck, der die weitere Kontraktion des Weißen Zwerges verhindert, wird durch die Quantenkräfte gewährleistet, die zwischen den hinreichend dicht gepackten Elektronen des Plasmas, aus dem sich der Stern zusammensetzt, auftreten. Dieser Druck hängt unter den Bedingungen des Sterns auf keine Weise von der Temperatur der Sternmaterie ab. Deshalb kann ein Weißer Zwerg vollständig erkalten und sich in einen Schwarzen Zwerg verwandeln, ohne seine Größe zu verändern. Wenn die Sternmasse größer als 1,2 Sonnenmassen ist, dann übersteigt die Materiedichte im Zuge der Kontraktion 10^9 g/cm^3 . Bei einer solchen Dichte treten thermonukleare Reaktionen auf, die viel Energie absorbieren. Das Gleichgewicht von Schwerkraft und Druck wird gestört, der Stern beginnt rasch zu kontrahieren.

Während dieser Kontraktion kann sich eine Kernexplosion ereignen, die wir als Aufleuchten einer Supernova beobachten. Dabei wirft der Stern die Hülle ab und verwandelt sich in einen sog. Neutronenstern. Unter dem Einfluß der Schwerkraft kontrahiert er so weit, bis die Dichte im Zentrum mit der Dichte des Kerns von 10^{14} bis 10^{15} g/cm^3 vergleichbar wird. (Der Radius eines solchen Sterns beträgt nur 10 bis 15 km.)

Ein Neutronenstern ist ein eigenartiger Atomkern mit einem Durchmesser von etwa 10 km. In solch einem Stern werden die Kernteilchen, die Nukleonen, sehr eng aneinander gedrückt. Wenn seine Masse zwei Sonnenmassen nicht übersteigt, dann ist das entartete Nukleonengas in der Lage, die weitere Kontraktion des Sterns zu verhindern, und das ist der endgültige Zustand dieses erkalteten Sterns. Der Begriff „kalt“ ist allerdings vom Standpunkt irdischer Vorstellungen aus auf Neutronensterne absolut nicht anwendbar, denn in einem derart dichten Gas wirkt sich die Wärme in keiner Weise auf den Betrag des Druckes aus, selbst wenn die Gastemperatur Hunderte Millionen Kelvin beträgt.

Obwohl die Astrophysiker einen Neutronenstern häufig als „kalt“ bezeichnen, kann die Temperatur deshalb in seinem Zentrum Hunderte Millionen Kelvin und an seiner Oberfläche Millionen Kelvin betragen.

Lange suchten die Astronomen die Neutronensterne ohne Erfolg. Das ist ganz gesetzmäßig. Man kann einen Stern mit einem Radius von 10 km und einer Temperatur von 10^6 K nur mit den stärksten Teleskopen sehen, und das auch nur, wenn er uns hinreichend nahe ist. Die strahlende Oberfläche der Neutronensterne ist nämlich sehr klein, und gewöhnlich strahlen sie millionenmal weniger sichtbares Licht aus als unsere Sonne. Selbst wenn wir einen Neutronenstern sehen, bleibt die Frage, wie er von den normalen schwachen Sternen zu unterscheiden ist. Man bemühte sich, Neutronensterne durch die Wirkung ihrer Schwerkraft auf nahegelegene Sterne zu entdecken. Es ist unmöglich, in einem engen Doppelsternsystem einen schwachen Neutronenstern zu bemerken, da er im hellen Licht der benachbarten Komponente „untergeht“. Neutronensterne haben jedoch die gleiche Masse wie die meisten anderen Sterne. Die Astronomen begannen in Doppelsternsystemen Sterne mit normaler Masse, aber sehr

geringer Leuchtkraft zu suchen. Diese Versuche waren jedoch erfolglos.

Die Neutronensterne wurden ganz zufällig 1967 entdeckt, nachdem 33 Jahre seit ihrer theoretischen Vorhersage vergangen waren. Es erwies sich, daß es in der Nähe der Oberfläche der Neutronensterne, die ein starkes Magnetfeld besitzen, aktive Gebiete gibt, die gerichtete Radiowellen ausstrahlen. Das aktive Gebiet rotiert gemeinsam mit der Sternoberfläche, und das Bündel gerichteter Radiowellen läuft wie ein Strahl eines rotierenden Scheinwerfers über den Himmel. Wenn dieser Strahl die Erde trifft, wird ein Radiopuls beobachtet. Das geschieht innerhalb von gleichen Zeitintervallen, die der Umdrehungszeit des Sterns entsprechen. Diese Pulse wurden von englischen Radioastronomen registriert. Die Radiopulse der Pulsare – so wurden die neuen kosmischen Objekte genannt – folgten einander mit sehr kurzen Perioden (ungefähr 1 s und weniger). Nur Sterne mit einem Durchmesser, der einige zehn Kilometer nicht überschreitet, können solch eine Rotationsperiode haben. Tatsächlich würde ein so schnell rotierender Stern mit einem Durchmesser von 1000 km (z. B. ein Weißer Zwerg) von den Zentrifugalkräften einfach auseinandergerissen. Die Radiopulse könnten auch durch radiale Pulsation Weißer Zwerge erzeugt werden, aber die Pulsationsperiode kann nicht so klein sein. So wurde bewiesen, daß Pulsare Neutronensterne sind.

Der Pulsar ist die letzte Etappe des aktiven Lebens eines Sterns mit nicht allzu großer Masse, die kleiner als etwa zwei Sonnenmassen ist. Dieses Stadium kann 1 bis 10 Millionen Jahre dauern, in deren Verlauf alle Prozesse im Neutronenstern allmählich abklingen, und er erkaltet.

Sich selbst überlassen, kann der Stern bis zur Temperatur der Reliktstrahlung (2,7 K), die das gesamte Universum durchdringt, erkalten. In diesem Zustand kann sich der Stern unbegrenzt lange Zeit befinden.

Im realen Universum wird der Stern jedoch vom interstellaren Gas umgeben. Es fällt auf den Stern, erhitzt sich beim Stoß auf dessen Oberfläche und strahlt Röntgenstrahlung aus. Wenn der Neutronenstern zu einem Doppelsternsystem gehört und aus der Atmosphäre des zweiten („normalen“) Sterns Gas ausströmt, kann es in das Schwerfeld des Neutronensterns gelangen. In diesem Fall werden der

Gasstrom und die Intensität des Röntgenleuchtens besonders groß. Solche „Röntgenpulsare“ wurden auch in Doppelsternsystemen entdeckt.

Die Existenz der Neutronensterne wurde folglich überzeugend bewiesen. Aber die Berechnungen zeigen, daß selbst die Wirkung der riesigen Druckkräfte der superdichten Kernmaterie den Kontraktionsprozeß nicht aufhalten kann, wenn der Stern nach dem Verbrauch des „Kernbrennstoffs“, nach der Kontraktion und nach eventuellem Abwerfen äußerer Hüllen immer noch eine Masse besitzt, die einen kritischen Wert von etwa zwei Sonnenmassen¹ überschreitet.

Wir wissen bereits, daß sich der Stern in ein Schwarzes Loch verwandelt, sobald die Ausmaße des Sterns den Gravitationsradius unterschreiten. Das muß mit den massereichen Sternen geschehen. Bereits in den Neutronensternen ist der Radius nur einigemale größer als der Gravitationsradius. Sterne mit der Masse von einigen Sonnenmassen und mehr, deren Kontraktion auf keine Weise aufgehalten werden kann, verwandeln sich am Ende ihrer Evolution unvermeidlich in Schwarze Löcher. Es ist zwar gelegentlich die Vorstellung vertreten worden, daß u. U. massereiche Sterne am Ende ihrer Evolution einen großen Teil ihrer Masse in den Raum auswerfen, so daß sich der Rest, dessen Masse kleiner als die kritische ist, in einen Weißen Zwerg oder einen Neutronenstern verwandelt, aber solch ein Evolutionsweg erscheint den meisten Wissenschaftlern äußerst künstlich und unreal. Deshalb kommen wir zu dem Schluß, daß Schwarze Löcher unvermeidlich in den späten Entwicklungsstadien massereicher Sterne entstehen müssen.

Können nun im Universum auch Schwarze Löcher anderer „nichtstellarer“ Herkunft existieren? Sehr wahrscheinlich ja. Wir werden uns im weiteren mit diesen häufig recht interessanten und ungewöhnlichen Möglichkeiten bekannt machen. Allerdings sind die Schlußfolgerungen über die Existenz „nichtstellarer“ Schwarzer Löcher bedeutend

¹ Der genaue Wert der kritischen Masse ist unbekannt, da diese Masse von den Eigenschaften der Materie bei einer Dichte, die gleich der Dichte im Atomkern ist, abhängt. Diese Eigenschaften sind aber ungenügend untersucht. Der Grenzwert liegt etwa bei zwei Sonnenmassen und ist offensichtlich kleiner als vier Sonnenmassen.

unzuverlässiger als die über die Unvermeidbarkeit der Entstehung Schwarzer Löcher im Zuge der Evolution massereicher Sterne. Wir werden sogar im weiteren sehen, daß wenigstens ein Schwarzes Loch von den Astronomen wahrscheinlich schon entdeckt wurde. Deshalb sparen wir uns die Bekanntschaft mit anderen „nichtstellaren“ Schwarzen Löchern für später auf und wenden uns der Frage zu, wie Schwarze Löcher „stellaren Ursprungs“ gesucht werden können.

Wieviel Schwarze Löcher gibt es in der Galaxis?

Man kann berechnen, wieviel Schwarze Löcher sich in der Galaxis, seit sie existiert, ungefähr gebildet haben müssen. Dazu ist es offensichtlich notwendig auszurechnen, wieviel massereiche Sterne, deren Masse die kritische Masse von etwa zwei Sonnenmassen überschreitet, während der Existenzzeit unserer Galaxis ihren Lebensweg beendet und sich in Schwarze Löcher verwandelt haben. Das Alter unserer Galaxis ist bekannt—es sind ungefähr 10 Milliarden Jahre. Aus astronomischen Beobachtungen ist auch bekannt, wieviel hinreichend massereiche Sterne in der Galaxis vorhanden sind. Wir kennen auch die Lebensdauer dieser Sterne, nämlich ungefähr eine Milliarde Jahre. Wenn wir dies alles berücksichtigen, können wir berechnen, daß alle zehn Jahre in der Galaxis ein massereicher Stern „sterben“ muß, folglich ein Schwarzes Loch „geboren“ werden muß. Indem wir diese Geburtsfrequenz der Schwarzen Löcher mit dem Alter der Galaxis multiplizieren, ergibt sich, daß sich gegenwärtig in der Galaxis ungefähr eine Milliarde Schwarze Löcher befinden müssen.

Wir müssen darauf hinweisen, daß wir bei unserer Berechnung angenommen haben, daß sich jeder massereiche Stern in ein Schwarzes Loch verwandelt. Das ist vielleicht nicht an dem. Ein Teil der massereichen Sterne wirft möglicherweise während ihrer Entwicklung viel Masse ab und vermeidet dadurch die Verwandlung in ein Schwarzes Loch. Wahrscheinlich verhindern bei einem Teil der Sterne Effekte, die mit der Rotation verbunden sind,

und andere Prozesse die Verwandlung in ein Schwarzes Loch. Wie wir aber schon früher bemerkten, wird die Berücksichtigung dieser Effekte schwerlich das erhaltene Resultat sehr stark verändern. Wir haben auch angenommen, daß sich das „Sterbetempo“ der Sterne während der gesamten Lebenszeit der Galaxis nicht ändert. Das ist natürlich auch nur eine grobe Näherung. Selbst wenn wir uns bei unseren Berechnungen wegen all der vereinfachenden Annahmen um das Hundert- oder Tausendfache geirrt haben, muß nichtsdestoweniger eine riesige Menge Schwarzer Löcher „stellaren Ursprungs“ in unserer Galaxis existieren.

Wie kann man sie entdecken?

Wie sucht man Schwarze Löcher?

Bis zum Anfang der sechziger Jahre hat sich anscheinend keiner der Astronomen ernsthaft darum bemüht, Neutronensterne zu suchen, geschweige denn Schwarze Löcher. Stillschweigend wurde angenommen, diese Objekte seien ziemlich exzentrisch und höchstwahrscheinlich nur eine Erfindung der Theoretiker. Man zog es sogar vor, über sie nicht zu sprechen. Manchmal hat man sich daran erinnert, daß sie sich vielleicht doch bilden könnten, daß das aber höchstwahrscheinlich nicht geschieht. Und wenn es sie gäbe, dann könnte man sie jedenfalls nicht entdecken. Solche außergewöhnlichen Objekte haben das für die Astronomen gewohnte Bild des Weltalls zerstört. Die Mehrheit der Astronomen hat bezüglich der Schwarzen Löcher überhaupt zweifelnd den Kopf geschüttelt. Sogar eine allgemein anerkannte Bezeichnung für diese Objekte gab es nicht.

In den sechziger Jahren hat allerdings eine Reihe von Entdeckungen die Astronomen veranlaßt, ihre Ansicht über viele Prozesse im Weltall zu ändern. Die aktiven Kerne der Galaxien, die Quasare und die Reliktradiostrahlung, die von den ersten Augenblicken der Ausdehnung des Kosmos übriggeblieben ist, wurden entdeckt. Danach schienen die Neutronensterne und die Schwarzen Löcher schon nicht mehr so exzentrische Objekte zu sein.

Und dann wurden schließlich 1967, wie wir oben schon berichtet haben, die Neutronensterne, d.h. die Pulsare, entdeckt.

Jetzt waren die Schwarzen Löcher an der Reihe. Wie aber sollte man sie entdecken? Sie strahlen ja kein Licht aus und reflektieren es auch nicht.

Die Astronomen hatten allerdings bei der Untersuchung nichtstrahlender Objekte schon Erfahrungen gesammelt. Darunter fallen z.B. die dunklen Staubwolken. Sie sind als schwarze Flecken auf dem Hintergrund der Sterne oder Nebel zu sehen. Nur sind Staubwolken Objekte mit riesigen Ausmaßen, Schwarze Löcher „stellaren Ursprungs“ haben aber alles in allem nur einen Durchmesser von etwa 10 km. Da Schwarze Löcher aus massereichen Sternen entstehen, muß sich das nächste Loch in einem Abstand von der Größenordnung einiger Parsec von uns befinden. Folglich beträgt sein Winkeldurchmesser $0,0000001''$, und es ist absolut unmöglich, solch ein Schwarzes Loch als schwarzes Fleckchen zu sehen.

Ein Schwarzes Loch lenkt zwar die vorbeiführenden Lichtstrahlen ab, aber damit dieser Effekt hinreichend deutlich wird, müssen die Lage der Lichtquelle (irgendein entfernter Stern), des Schwarzen Loches und des Beobachters auf so spezielle Weise gewählt werden, daß an eine zufällige Realisierung dieses Ereignisses nicht zu denken ist. Man kann dann nur noch die Tatsache benutzen, daß Schwarze Löcher Massen besitzen, die denen großer Sterne vergleichbar sind, die aber selbst absolut nicht leuchten. Gerade so gingen 1964 die sowjetischen Astrophysiker¹ auf die Suche nach Schwarzen Löchern. Sie schlugen vor, Schwarze Löcher als Bestandteile von Doppelsternsystemen zu suchen, wobei sie annahmen, daß es Systeme gibt, in denen ein Stern „normal“ ist und leuchtet, während der andere ein Schwarzes Loch ist. Beide Objekte müssen um den gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Aber das Schwarze Loch ist unsichtbar, so daß die sichtbare Komponente

¹ Die Arbeiten der folgenden sowjetischen Wissenschaftler trugen sehr wesentlich zur Ausarbeitung verschiedener astrophysikalischer Suchmethoden für Schwarze Löcher und zu deren Erforschung bei: W. L. Ginsburg, J. B. Seldowitsch, I. S. Schklowski, G. S. Bisnowaty-Kogan, O. Ch. Gussejnow, W. M. Ljuty, L. M. Osernoi, R. A. Sjunjaew, A. M. Tscherepaschtschuk, N. I. Schakura, W. F. Schwarzmann, E. K. Scheffer und viele andere.

scheinbar um ein „Nichts“ kreist. Natürlich kann man die Bahnbewegung von Sternen in großer Entfernung in keinem Teleskop sehen. Man kann jedoch eine in der Astrophysik weit verbreitete spezielle Methode benutzen. Wenn sich ein Stern, der sich in einer Umlaufbahn bewegt, uns nähert, sind die Linien im Spektrum zur violetten Seite verschoben, wenn er sich entfernt, zur roten. Den Astronomen sind seit langem die sog. spektroskopischen Doppelsterne bekannt, deren Doppelsterncharakter mit der beschriebenen Methode entdeckt wurde. In spektroskopischen Doppelsternsystemen, die aus üblichen Sternen bestehen, sind die Linien in entgegengesetzter Richtung verschoben, wenn sich ein Stern auf uns zu bewegt und der andere von uns weg. Häufig werden periodische Linienverschiebungen im Spektrum von nur einem Stern beobachtet, während die Linien im Spektrum des zweiten Sterns überhaupt nicht sichtbar sind. Es schien so, als müsse man hier die Existenz eines Schwarzen Loches vermuten. In der Mehrzahl der Fälle wird das jedoch trivial dadurch erklärt, daß der zweite Stern zwar leuchtet, jedoch merklich schwächer als der erste. Er ist dann unsichtbar, da sein Licht im Lichte des hellen Nachbarn „untergeht“.

Die sowjetischen Astrophysiker schlugen vor, erloschene Sterne in solchen spektroskopischen Doppelsternsystemen zu suchen, in denen die Masse des unsichtbaren Begleiters, die aus der beobachteten Bewegung des sichtbaren Sterns berechnet wird, größer als die des sichtbaren Nachbarn ist. Das würde bedeuten, daß der unsichtbare Begleiter kein normaler, sondern ein erloschener Stern wäre. Wenn nämlich der Begleiter ein normaler Stern wäre, so würde er, da seine Masse die des Nachbarn übertrifft, heller leuchten als dieser und könnte nicht unsichtbar sein.

Der erloschene Stern kann jedoch auch ein Weißer Zwerg oder ein Neutronenstern sein. Um aus den entdeckten erloschenen Sternen gerade die Schwarzen Löcher auszusondern, mußte deshalb noch bewiesen werden, daß die Masse des unsichtbaren Begleiters die kritische Masse ($2M_{\odot}$) überschreitet. Wie wir bereits wissen, kann die Masse eines Weißen Zwerges 1,2 Sonnenmassen nicht übersteigen und die eines Neutronensterns zwei Sonnenmassen. Wenn die Masse des erloschenen Sterns größer als der kritische Wert ist und, sagen wir, fünf Sonnenmassen

beträgt, so kann es sich folglich nur um ein Schwarzes Loch handeln.

In der UdSSR und später in den USA wurde, diesen Hinweisen folgend, die Suche nach Schwarzen Löchern in spektroskopischen Doppelsternsystemen aufgenommen.

Diese Versuche führten jedoch nicht zum Ziel. In allen verdächtigen spektroskopischen Doppelsternsystemen gelang es, die Unsichtbarkeit des Begleiters auf natürlichem Wege zu erklären, ohne Zuflucht zu Schwarzen Löchern zu nehmen. Die vorgeschlagene Suchmethode erwies sich als zu schwierig und indirekt, da man sich fast immer eine Erklärung dafür ausdenken kann, weshalb etwas unsichtbar ist. Die „Unsichtbarkeit“ dient im allgemeinen nur als schlechter Beweis der Existenz irgendeines Objektes. Das ähnelt der alten Anekdote über den Titel einer Dissertation: „Das Fehlen der Telegrafentangen und -drähte bei archäologischen Ausgrabungen als Beweis der drahtlosen Telegrafie bei den Völkern des Altertums“.

Außerdem stellte sich heraus, daß die genannte Methode prinzipiell kaum zum Erfolg hätte führen können. Der Grund dafür liegt in dem besonderen Charakter der Sternentwicklung in engen Doppelsternsystemen. Im Laufe der Evolution muß Gas von einem Stern zum anderen überfließen, in dessen Resultat der zunächst massereichere Stern, der seine Entwicklung beendet und sich in ein Schwarzes Loch verwandelt, einen Teil seiner Masse an den weniger massereichen abgibt. Schließlich stellt sich heraus, daß der sichtbare Stern eine größere Masse besitzt als das entstehende Schwarze Loch. In solch einem Doppelsternsystem kann man nicht feststellen, warum der Begleiter unsichtbar ist: Entweder ist er ein normaler Stern, der schwächer als sein Nachbar leuchtet (aufgrund der geringeren Masse), oder er ist ein erloschener Stern und eventuell ein Schwarzes Loch.

Man mußte unbedingt solche physikalischen Erscheinungen finden, in denen das Schwarze Loch sich aktiv verhalten würde.

Eine derartige Erscheinung wurde auch gefunden, nämlich der Sturz von Gas im Schwerfeld eines Schwarzen Loches. Im interstellaren Raum gibt es ausgedehnte Gasnebel. Wenn sich in diesem Nebel ein Schwarzes Loch befindet, wird Gas in sein Schwerfeld stürzen. In dem einfallenden Gas ist noch ein Magnetfeld vorhanden. Während des

Sturzes entwickeln sich Turbulenzen. Die Energie des Magnetfeldes des Gases muß im Laufe des Sturzes in Wärme übergehen. „Erhitzte“ Elektronen, die sich in Magnetfeldern bewegen, strahlen elektromagnetische Wellen aus. In der Nähe des Horizonts des Schwarzen Loches kommen allgemeinrelativistische Effekte ins Spiel. Ein Teil der Strahlung wird von dem Schwarzen Loch eingefangen. Der Hauptteil der Strahlung, der für einen entfernten Beobachter sichtbar ist, wird in einer Entfernung von einigen Gravitationsradien ausgestrahlt. Das erhitzte Gas strahlt also noch auf dem Weg in das Schwarze Loch, bevor es hineinstürzt, Energie in den umgebenden Raum ab. Könnte diese Strahlung ausreichen, um ein Schwarzes Loch aus großer Entfernung nachzuweisen?

Die gesamte Strahlungsmenge (oder, wie die Astrophysiker sagen, die Leuchtkraft) hängt von der Menge des einfallenden Gases ab. Unter den für das interstellare Medium typischen Bedingungen ist die Leuchtkraft des in ein Schwarzes Loch stürzenden Gases von der gleichen Größenordnung wie die Leuchtkraft eines „normalen“, nicht allzu hellen Sterns. Das bedeutet, daß es sehr schwer ist, auf diese Weise Schwarze Löcher zu finden. Sie gehen in der riesigen Anzahl schwacher Sterne in der Galaxis unter. Die turbulenten Bewegungen in dem in ein Schwarzes Loch stürzenden Gas führen zu raschen Helligkeitsschwankungen mit einer Dauer des Aufleuchtens von hundertsteln bis zehntausendsteln Sekunden. Möglicherweise könnte dieses Aufleuchten helfen, einzelne Schwarze Löcher in der Galaxis zu entdecken? Bisher wurden aber auf diese Weise keine Schwarzen Löcher gefunden.

Die mögliche Entdeckung eines Schwarzen Loches

Im Jahre 1964 wurde von sowjetischen Astrophysikern auf noch eine Methode zur Suche Schwarzer Löcher verwiesen. Um sie verständlich zu machen, beantworten wir zunächst die Frage, warum die Leuchtkraft des in ein Schwarzes Loch stürzenden Gases verhältnismäßig klein ist. Das liegt daran, daß die Dichte des Gases im interstellaren Raum

klein ist, folglich wenig auf das Schwarze Loch stürzen kann. Könnten in der Galaxis auch Bedingungen realisiert werden, unter denen viel mehr Gas einfällt?

Es stellt sich heraus, daß das möglich ist. Diese Bedingungen werden verwirklicht, wenn z.B. ein Schwarzes Loch zu einem sehr engen Doppelsternsystem gehört, dessen zweite Komponente ein „normaler“ Riesenstern ist. In diesem Falle strömt Gas aus der Hülle des „normalen“ Sterns unter der Schwerewirkung des Begleiters in mächtigem Strom auf diesen. Wir sprachen bereits über diesen Prozeß, als wir die Röntgenpulsare in Doppelsternsystemen erörterten.

In solch einem Doppelsternsystem kann das Gas nicht einfach zum Schwarzen Loch stürzen: Wegen der vorhandenen Orbitalbewegung dreht es sich, wobei es um das Schwarze Loch eine Scheibe bildet. Infolge der Reibung der Gasschichten wird es bis zu einer Temperatur von 10^6 K erhitzt, noch bevor es in das Schwarze Loch hineinstürzt. Bei dieser Temperatur strahlt das Gas Röntgenstrahlen aus. Die Schwarzen Löcher müssen folglich als Röntgenquellen in engen Doppelsternsystemen gesucht werden. Das wurde bereits 1964 von sowjetischen Astrophysikern vorausgesagt.

Zur Suche von Röntgenquellen am Himmel müssen die Röntgenteleskope über die Erdatmosphäre gebracht werden. Für längere Beobachtungen muß das Teleskop an Bord eines Satelliten montiert werden. (Der Flug von Höhenraketen ist nämlich zu kurz.) Mit solch einem Teleskop, das sich auf dem Satelliten „Uhuru“ befand, wurden 1972 Röntgenquellen als Bestandteile einiger Doppelsternsysteme entdeckt. Sie wurden einer eingehenden Analyse unterzogen, unter anderem auch mit Geräten, die sich an Bord sowjetischer Satelliten oder bemannter Raumschiffe befanden.

Wir werden hier diese Entdeckungen und ihre Interpretation nicht ausführlich beschreiben, sondern nur auf eine eingehen, die einen direkten Bezug zu dem hier diskutierten Problem besitzt.

Wir weisen zunächst darauf hin, daß die Röntgenquellen in Doppelsternsystemen, die streng periodische Pulsare sind, offensichtlich keine Schwarzen Löcher sein können. Es handelt sich hier um rotierende Neutronensterne. Diese Sterne besitzen ein Magnetfeld, und die Magnetpole stim-

men nicht mit den Polen der Rotationsachse überein. Das Gas stürzt entlang der magnetischen Feldlinie auf den Magnetpol. Dadurch entsteht eine gerichtete Röntgenstrahlung. Durch die Drehung werden diese Objekte zu rotierenden Röntgenscheinwerfern. Schwarze Löcher besitzen jedoch, wie wir wissen, keinerlei „aktive Flecken“ auf ihrer Oberfläche. Ein Schwarzes Loch kann deshalb nicht zum Auftreten eines „Scheinwerfers“ führen. Die Teile des heißen Gases in der Gasscheibe um das Schwarze Loch, die in den inneren Gebieten rotieren, könnten ein periodisches Aufleuchten ergeben. Diese Periode müßte sich jedoch ziemlich schnell und stark ändern, da diese Teile nicht an irgendeinem fest rotierenden Objekt befestigt sind, sondern sich infolge der Reibung dem Stern nähern (wodurch sich die Umlaufzeit verringert).

Die Schwarzen Löcher müssen sich, so gesehen, unter den Röntgenquellen in Doppelsternsystemen befinden, die keine Pulsare sind. Wir wollen vorausschicken, daß diese Quellen keine gewöhnlichen Sterne sein können, denn damit das Gas bis zu den Temperaturen erhitzt wird, die für die Emission von Röntgenstrahlung ausreichen, muß das Gravitationsfeld, in dem es sich bewegt, sehr stark sein. Nur kompakte (verdichtete) „tote“ Sterne, wie Weiße Zwerge, Neutronensterne oder Schwarze Löcher, besitzen solche Felder. Wie kann man aber gerade die Schwarzen Löcher unter den „toten“ Sternen herausfinden? Wir wissen, daß die Massenbestimmung ein zuverlässiges Kriterium dafür ist. Wenn die Masse des „toten“ Sterns größer als der kritische Wert von zwei Sonnenmassen ist, so handelt es sich um ein Schwarzes Loch. Die Masse des „toten“ Sterns kann man mit Hilfe der Bahnbewegung der Sterne im Doppelsternsystem messen. Es erwies sich tatsächlich, daß zumindest eine unter den Doppelsternröntgenquellen eine Masse besitzt, die den kritischen Wert wesentlich überschreitet. Das ist die Quelle Cygnus X-1. Der „normale“ sichtbare Stern in diesem Doppelsternsystem ist ein massereicher Stern mit ungefähr zwanzig Sonnenmassen. Der „tote“ Stern, aus dessen Umgebung die Röntgenstrahlung kommt, besitzt eine Masse von ungefähr zehn Sonnenmassen. Das ist viel größer als der kritische Wert. Zahlreiche neue Untersuchungen machen dieses Resultat immer sicherer. Wir können deshalb mit einem hohen Grad an Zuverlässigkeit sagen, daß in dem System,

zu dem die Quelle Cygnus X-1 gehört, wahrscheinlich das erste Schwarze Loch im Weltall entdeckt wurde.

Wir wollen die Prozesse, die in diesem System ablaufen, etwas genauer betrachten. Die Komponenten dieses Systems rotieren mit einer Umlaufzeit von 5,6 Tagen um den Schwerpunkt. Die Schwerkraft des Schwarzen Loches, dessen Masse etwa zehn Sonnenmassen beträgt, veranlaßt das Gas aus der Atmosphäre des „normalen“ Riesensterns, dessen Masse etwa zwanzig Sonnenmassen beträgt, in das Schwarze Loch zu fließen.

Dieses Gas wickelt sich durch die Orbitalbewegung auf. Die Gravitations- und Fliehkräfte formen es zu einer dünnen Scheibe. Die Gasstrahlen bewegen sich wegen der Reibung benachbarter Schichten auf zum Zentrum laufenden Spiralen um das Schwarze Loch. Die zum Zentrum gerichtete Geschwindigkeit ist allerdings wesentlich kleiner als die Geschwindigkeit auf der Umlaufbahn. Das Gas erreicht erst nach einem Monat den inneren, dem Schwarzen Loch am nächsten liegenden Rand der Scheibe. Wie wir bereits wissen, wird hier die Bahnbewegung instabil, und das Gas stürzt in das Schwarze Loch. Während der Bewegung in der Scheibe erhitzt sich das Gas durch Reibung. In den äußeren Schichten der Scheibe beträgt seine Temperatur nur $(2 \text{ bis } 3) \cdot 10^4 \text{ K}$, in den inneren dagegen mehr als 10^7 K . Die gesamte Röntgenleuchtkraft des Gases übertrifft tausendmal die vollständige (in allen Gebieten des Spektrums) ausgestrahlte Leuchtkraft der Sonne. Der Hauptteil der auf der Erde beobachteten Röntgenstrahlung kommt aus den innersten Gebieten der Scheibe mit einem Radius, der 200 km nicht übersteigt. Das Ausmaß des Schwarzen Loches selbst beträgt etwa 30 km.

Die außerordentlich schnellen chaotischen Schwankungen der Röntgenstrahlung innerhalb von tausendstel Sekunden dienen als weiterer sehr wichtiger Beweis dafür, daß die Röntgenstrahlung der Quelle Cygnus X-1 in einem sehr kleinen Gebiet in der Nähe des Schwarzen Loches erzeugt wird. Wenn das strahlende Objekt größer wäre, könnte sich seine Helligkeit nicht so rasch ändern. So also sieht diese erstaunliche Quelle von Röntgenstrahlen aus, die sich in einem Abstand von etwa 2000 Parsec von uns befindet. Die Suche nach Objekten, die Cygnus X-1 ähneln und bei

denen man mit hinreichender Sicherheit von der Existenz eines Schwarzen Loches sprechen könnte, führte vorläufig nicht zum Erfolg. Diese Aufgabe ist jedoch so wichtig, daß die Suche nach Schwarzen Löchern intensiv weitergeführt wird.

„Supermassive“ Schwarze Löcher

In den vorangegangenen Kapiteln sprachen wir nur über Schwarze Löcher „stellaren Ursprungs“. Wenn wir jedoch die Entwicklungsprozesse in anderen kosmischen Objekten und Systemen von kosmischen Objekten analysieren, gelangen wir zu dem Schluß, daß Schwarze Löcher auch von anderer, „nichtstellarer“ Natur sein können. In erster Linie bezieht sich das auf Objekte, die man bedingt als „supermassive“ Sterne bezeichnen kann.

Gewöhnliche Sterne besitzen Massen bis zu 60 Sonnenmassen. Sterne größerer Masse (sagen wir mit 200, aber weniger als 1000 Sonnenmassen) können nicht existieren. Das hängt damit zusammen, daß bei Anwesenheit einer Kernenergiequelle im Zentrum eines solchen hinreichend schweren Sterns Schwingungen auftreten, die wahrscheinlich entweder zum Abwurf von Materie oder zur Zerstörung des gesamten Sterns führen.

„Supermassive“ Sterne mit tausend und mehr Sonnenmassen können jedoch wahrscheinlich existieren. Bei ihrem Gleichgewicht spielen die Rotation und die dadurch hervorgerufenen Zentrifugalkräfte eine wesentliche Rolle. Wir werden hier nicht ausführlich auf diese Frage eingehen. Für uns ist nur eines wichtig: Diese „supermassiven“ Sterne müssen, da sie Energie durch Strahlung verlieren, früher oder später auch ihre Stabilität verlieren, kollabieren und sich in „supermassive“ Schwarze Löcher verwandeln.

Diese „supermassiven“ Sterne können sich sicher nur an den Stellen bilden, an denen Bedingungen zur Ansammlung großer Massen ausreichend dichten Gases herrschen. Solche „bequemen“ Stellen sind anscheinend die Zentralgebiete großer Sternsysteme – Galaxien, möglicherweise auch Quasare oder die Zentren von Kugelsternhaufen. Es ist sehr schwierig zu erforschen, was im Zentrum der Galaxien und insbesondere im Zentrum unserer Galaxis

geschieht, da diese Gebiete gewöhnlich durch Gas- und Staubwolken verdeckt werden. Nichtsdestoweniger zeigen die stürmischen Prozesse in den Kernen der Galaxien, daß dort ungewöhnliche Vorgänge ablaufen.

Neben dem Gas können sich in den Zentren der betrachteten Sternsysteme sehr kompakte Sternhaufen befinden. Die Evolution eines solchen Haufens führt dazu, daß er immer stärker kontrahiert. Häufig kommt es zu Zusammenstößen der Sterne. Letztlich muß der Sternhaufen ähnlich einem riesigen Stern kollabieren und ein „supermassives“ Schwarzes Loch erzeugen.

Ähnliche Prozesse laufen wahrscheinlich auch in den Quasaren ab. Die Quasare sind Objekte, die sich weit hinter den Grenzen der Galaxis befinden. Ihre Leuchtkraft übersteigt die großer Galaxien hundertmal. Gleichzeitig sind sie in ihren Ausmaßen sehr klein. (Die Strahlung entsteht in einem Gebiet, dessen Durchmesser kleiner als ein Lichtjahr ist.) In den Quasaren kann sich also ein gigantisches Schwarzes Loch befinden, dessen Masse Hunderte Millionen Sonnenmassen beträgt.

Der Einfall von Gas im Schwerfeld eines „supermassiven“ Schwarzen Loches, das sich im Kern einer Galaxis oder in einem Quasar befindet, kann die Freisetzung riesiger Energiemengen und verschiedene nichtstationäre Prozesse gewährleisten. Das Gas, das in ein „supermassives“ Schwarzes Loch im Kern einer Galaxis fällt, kann von den Sternen kommen, die sich in seiner Umgebung bewegen. Diese Sterne können auch von den enormen Gezeitenkräften zerstört werden. Ihre Materie fällt dann ebenfalls in das Schwarze Loch.

In bedeutend geringerem Umfang können diese Prozesse auch in den Zentren der Kugelsternhaufen ablaufen. Hier ist auch die Existenz Schwarzer Löcher mit Hunderten Sonnenmassen und mehr möglich. In diesen Haufen werden Röntgenquellen beobachtet, die sich in ihren Eigenschaften sehr von den Röntgenquellen in Doppelsystemen unterscheiden.

Unlängst entdeckten Mitarbeiter des Instituts für kosmische Forschungen der Akademie der Wissenschaften der UdSSR unter Leitung von A. S. Melioranski starke Ausbrüche von Röntgenstrahlen. Ein Teil dieser Röntgenstrahlen kommt wahrscheinlich aus Kugelsternhaufen. Solche Erscheinungen könnten beim Durchgang eines

Sterns durch Gas, das sich im Schwerfeld eines großen Schwarzen Loches bewegt, hervorgerufen werden. Die Gesamtheit der Beobachtungsdaten und theoretischen Fakten macht folglich die Existenz „supermassiver“ Schwarzer Löcher wahrscheinlich. Diese Schlußfolgerung ist allerdings bedeutend weniger gesichert als die Erkenntnis, daß Schwarze Löcher „stellaren“ Ursprungs existieren. Nur weitere Beobachtungen werden Klarheit in dieses Problem bringen.

Schwarze Minilöcher und Weiße Löcher

Schwarze Löcher, deren Masse bedeutend kleiner als eine Sternmasse ist, können unter natürlichen Bedingungen im heutigen Universum nicht entstehen. Wir sagten bereits, daß im Falle derart kleiner Massen die Schwerkraft nicht dafür ausreicht, um die Druckkräfte der Materie zu überwinden, die die Kontraktion verhindern. Um kleine Massen in Schwarze Löcher zu verwandeln, ist eine Verdichtung der Materie bis zu Dichten notwendig, die wesentlich größer als die Dichte der Atomkerne sind. Solche Dichten existieren in kosmischen Objekten nicht. Erinnern wir uns jedoch daran, daß das Weltall expandiert. Vor ungefähr 20 Milliarden Jahren war die Materiedichte des Kosmos unvergleichlich größer als die heutige Dichte. In den ersten Augenblicken nach dem Beginn der Expansion des Weltalls übertraf die Dichte die Kerndichte. Damals war schon eine sehr kleine zusätzliche Verdichtung der Materie in einzelnen Gebieten dafür ausreichend, daß infolge der Schwerkraft diese Gebiete von der Expansion zur Kontraktion übergingen und mikroskopische Schwarze Löcher bildeten. Im Prinzip können diese primordialen Schwarzen Minilöcher, wie sie genannt werden, beliebig kleine Massen besitzen. Von sowjetischen Physikern wurde auf die Möglichkeit der Existenz primordialer Schwarzer Löcher hingewiesen. Sind tatsächlich solche primordialen Schwarzen Löcher im Universum entstanden? Welches Schicksal haben sie, und wie kann man sie entdecken? Es stellt sich heraus, daß man zur Beantwortung all dieser Fragen Quantenprozesse berücksichtigen muß, die in der Umgebung Schwarzer Minilöcher auftreten müssen. Bevor

wir uns ihnen zuwenden, machen wir uns mit einem weiteren Typ von Objekten aus der „Verwandtschaft“ der Schwarzen Löcher bekannt, mit dem sog. Weißen Loch. Weiße Löcher sind eine weitere theoretische Voraussage, die von sowjetischen Physikern gemacht wurde. Was sich die Physiker hier „ausgedacht“ haben, scheint noch erstaunlicher zu sein als die Eigenschaften Schwarzer Löcher. Stellen wir uns einmal vor, daß im Augenblick des Beginns der Expansion des Weltalls nicht die gesamte Materie expandiert, sondern die Expansion einiger Gebiete (Kerne) verzögert wird. Dann entstehen bei der Expansion der übrigen Materie in einzelnen Gebieten singuläre Zustände. Wie wir schon früher erwähnten, laufen in der Nähe solcher Singularitäten Quantenprozesse ab. Diese Prozesse in der Nähe der Singularität im starken veränderlichen Gravitationsfeld führen zu einer stürmischen Paarerzeugung von Teilchen und Antiteilchen. Die Teilchenwolke, die in der Nähe des aufgehaltenen Kerns erzeugt wurde, dehnt sich vom Standpunkt des äußeren Beobachters aus und füllt rasch das gesamte Gebiet innerhalb des Gravitationsradius aus, wobei sie den Kern an der Ausdehnung hindert. Außerdem fällt auf ein solches Objekt von außen heißes Gas. Das alles führt dazu, daß sich das Weiße Loch (Materie, die nicht an der Expansion des Universums teilgenommen hat) in ein Schwarzes Loch verwandelt. Wir werden bei der Beschreibung dieser interessanten Erscheinung nicht weiter verweilen. Wir weisen nur auf das Folgende hin: Wenn Weiße Löcher am Beginn der Expansion des Universums existiert haben und diese zurückgebliebenen Kerne es am Anfang nicht geschafft haben zu expandieren, dann haben sie sich rasch in Schwarze Löcher verwandelt. Jetzt wenden wir uns dem Schicksal der primordialen Schwarzen Löcher zu und jenen Prozessen, die sich in ihrer Umgebung abspielen.

Teilchenerzeugung im Vakuum

Das physikalische Vakuum stellt ein „Meer“ aller möglichen sog. virtuellen Teilchen und Antiteilchen dar. Diese Teilchen können sich bei Abwesenheit äußerer Felder nicht

in reale Teilchen umwandeln. Ein starkes konstantes oder rasch veränderliches Feld (z. B. das elektromagnetische oder Gravitationsfeld) kann allerdings eine solche Umwandlung bewirken.

Die Theoretiker hegen seit langem Interesse an derartigen Prozessen. Betrachten wir zum Beispiel den Teilchenerzeugungsprozeß im veränderlichen Feld. (Dieser Prozeß ist nämlich im Gravitationsfeld von Bedeutung.) Es ist bekannt, daß Quantenprozesse ungewöhnlich sind und sich häufig der Erörterung vom Standpunkt des „gesunden Menschenverstandes“ aus entziehen. Bevor wir deshalb über die Teilchenerzeugung im veränderlichen Gravitationsfeld sprechen, betrachten wir ein einfaches Beispiel aus der Mechanik, das die weitere Darstellung verständlicher macht.

Stellen wir uns ein Pendel vor. Das Gewicht hängt an einem Faden, der über eine Rolle gezogen ist, so daß man durch Ziehen oder Loslassen des Fadens die Länge des Pendels verändern kann. Wir stoßen das Pendel an, es beginnt zu schwingen. Die Schwingungszeit T hängt von der Länge des Pendels l ab: $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, wobei g die Fallbeschleunigung ist.

Jetzt werden wir sehr langsam an dem Faden ziehen. Die Länge des Pendels wird verkürzt, die Schwingungszeit verkürzt sich ebenfalls, aber die Schwingungsweite (Amplitude) vergrößert sich.

Langsam führen wir das Pendel in den ursprünglichen Zustand zurück. Die Schwingungszeit kehrt zu ihrem ursprünglichen Wert zurück, ebenso die Amplitude der Schwingungen.

Solche Änderungen der Amplitude werden als adiabatisch bezeichnet. Wenn man die Dämpfung der Schwingung infolge der Reibung vernachlässigt, so ist die Energie, die in der Schwingung enthalten ist, im Endzustand der ursprünglichen gleich (der Energie des Pendels, die es vor dem gesamten Zyklus der Längenänderungen besaß). Man kann jedoch die Länge des Pendels auch so ändern, daß die Amplitude nach der Rückkehr zur Ausgangslänge verändert ist. Dazu muß man an dem Faden mit der doppelten Frequenz des Pendels ziehen. (So gehen wir vor, wenn wir eine Schaukel in Schwingung versetzen.) Diese Erscheinung wird parametrische Resonanz genannt.

Auf ähnliche Weise kann man elektromagnetische Wellen

in einem Resonator „aufschaukeln“. Wenn sich eine elektromagnetische Welle in einem Hohlraum mit verspiegelten Wänden und einem Kolben befindet, so können wir ihre Amplitude ändern, indem wir den Kolben mit der doppelten Frequenz der elektromagnetischen Welle hin- und herbewegen. Wenn wir die Phase der Bewegung des Kolbens bezüglich der Phase der Welle auf verschiedene Weise wählen, kann man die Amplitude der elektromagnetischen Welle vergrößern oder verkleinern. Wenn man aber Versuche bei allen möglichen Phasen durchführt, erhält man im Mittel immer eine Verstärkung der Welle. Folglich führt ein nichtadiabatischer Prozeß zum „Hineinpumpen“ von Energie in die Schwingungen.

Wenn sich elektromagnetische Wellen aller möglichen Frequenzen im Resonator befinden, so wird sich unabhängig davon, wie wir den Kolben bewegen, immer eine Welle mit der Frequenz finden, die der charakteristischen Zeit der Änderung der Bewegung des Kolbens entspricht.¹ Die Amplitude dieser Welle wächst. In der Sprache der Quantenphysik bedeutet die Vergrößerung der Amplitude eine Zunahme der Anzahl der Photonen in der Welle. Nichtadiabatische Prozesse rufen demnach die Erzeugung neuer Photonen, der Teilchen des elektromagnetischen Feldes, hervor.

Nach der Bekanntschaft mit diesen einfachen Beispielen kehren wir zum physikalischen Vakuum zurück, zum „Meer“ aller möglichen virtuellen Teilchen. Wir werden der Einfachheit halber nur über eine Sorte Teilchen sprechen, nämlich die virtuellen Photonen, d. h. die Quanten des elektromagnetischen Feldes.

Es stellt sich heraus, daß ein nichtadiabatischer Prozeß, der in der klassischen Physik zur Verstärkung bereits vorhandener Schwingungen (Wellen) führt, in der Quantenphysik zur „Verstärkung“ virtueller Schwingungen führen kann, d. h. zur Umwandlung virtueller Teilchen in reale. So muß die zeitliche Änderung des Gravitationsfeldes die Erzeugung von Photonen hervorrufen, deren Frequenz

¹ Wir weisen darauf hin, daß im geschlossenen Resonator eine maximale Wellenlänge existiert, die dem Ausmaß des Resonators entspricht, folglich auch eine minimale Frequenz der Welle. Deshalb muß man den Kolben mit einer Frequenz, die größer als die minimale ist, bewegen, um Energie „hineinzupumpen“.

von der Größenordnung der charakteristischen Zeit der Änderung des Feldes ist. Im allgemeinen sind diese Effekte verschwindend klein, da die Gravitationsfelder schwach sind. Am Beginn der Ausdehnung des Universums mußten diese Effekte allerdings sehr wesentlich sein, da die Gravitationskräfte und die Geschwindigkeit ihrer Änderung enorm groß waren. Möglicherweise haben die Quantenprozesse, die noch in der Nähe der ursprünglichen Singularität abgelaufen sind, die Grundzüge des heutigen Universums bestimmt.

Teilchen können nicht nur in der Nähe der Singularität erzeugt werden. Es ist schon seit langem bekannt, daß Teilchen in der Nähe Schwarzer Löcher erzeugt werden können. Wenn ein Körper geladen war, so bleibt nach seiner Umwandlung in ein Schwarzes Loch im äußeren Raum ein elektrisches Feld bestehen. Im hinreichend starken elektrischen Feld können Paare geladener Teilchen erzeugt werden – Elektronen und Positronen. Im Schwerfeld eines rotierenden Schwarzen Loches, das aus einem rotierenden Körper entstanden ist, werden ebenfalls Teilchen erzeugt. Beide Prozesse werden durch das Feld um das Schwarze Loch hervorgerufen und führen zu einer Veränderung dieser Felder. Sie verkleinern jedoch nicht das Schwarze Loch selbst, d.h., sie verkleinern das Gebiet nicht, aus dem weder Licht noch eine beliebige andere Strahlung, noch Teilchen austreten können.

Schwarze Löcher existieren nicht ewig!

Die Berechnungen der Quantenprozesse in der Umgebung eines Schwarzen Loches, die unlängst von dem englischen Theoretiker S. Hawking durchgeführt wurden, zeigten, daß im Gravitationsfeld des Schwarzen Loches selbst ein Quantenprozeß der Teilchenerzeugung existiert, der zu einer Verringerung der Masse und der Ausmaße des Schwarzen Loches führt. Auf den ersten Blick erscheint das merkwürdig, denn bei der Bildung des Schwarzen Loches verlangsamten sich alle Prozesse auf dem kontrahierenden Stern rasch. Für den äußeren Beobachter „erstarren“ sie,

das Gravitationsfeld wird überall statisch.¹ In solch einem Feld können aber keine Teilchen erzeugt werden.² Wenn folglich das veränderliche Feld während der Bildung des Schwarzen Loches irgendeine (sehr kleine) Anzahl Teilchen produziert, so muß der Teilchenstrom von dem entstehenden Schwarzen Loch, wie alle anderen Prozesse, sehr schnell abklingen, je näher die Oberfläche des Sterns an den Gravitationsradius herangeht. Hawking behauptet dagegen, daß das nicht so sei, der Strom würde nicht abklingen. Worum handelt es sich dann hier?

Es stellt sich heraus, daß man den kontrahierenden Stern niemals als absolut „erstarrt“ betrachten kann. Das Erstarren geht ziemlich schnell vonstatten, aber es ist nur ein asymptotisches Erstarren, bei dem die Geschwindigkeit aller Prozesse ungefähr in der Zeit $\tau = r_g/c$ um die Hälfte abnimmt. Diese Zeit ist ein konstantes Charakteristikum der Geschwindigkeit der Verlangsamung des Prozesses. Es ist klar, daß solch eine exponentielle Verlangsamung, wie die Physiker sagen, ewig dauert. Vom Standpunkt aller Prozesse, außer der quantenphysikalischen Teilchenerzeugung, kann man den Stern bereits nach einem Zeitintervall, das gleich einigen τ ist, als vollständig erstarrt betrachten. Für Quantenprozesse trifft diese Erklärung jedoch nicht zu. Der Grund dafür liegt in den ungewöhnlichen Eigenschaften des physikalischen Vakuums. In diesem Vakuum bewegen sich virtuelle Teilchen aller Energien, aller Frequenzen. Das veränderliche Gravitationsfeld im Innern des erstarrten Sterns wandelt die virtuellen Teilchen in reale mit gerade der Frequenz um, die der charakteristischen Zeit der Änderung des Gravitationsfeldes im Innern des kontrahierenden Sterns entspricht.³

Diese Zeit ändert sich aber nicht und beträgt immer r_g/c . (Wir vernachlässigen hier die sehr langsame Verkleinerung

¹ Wir betrachten der Einfachheit halber ein nichtrotierendes Schwarzes Loch.

² Das wird durch den ganz besonderen Charakter des Gravitationsfeldes im Vergleich zu allen anderen physikalischen Feldern erklärt. Im starken statischen elektrischen Feld können im Unterschied zum Gravitationsfeld geladene Teilchen erzeugt werden.

³ Wir unterstreichen, daß das Schwerefeld gerade im Innern des Sterns veränderlich ist, während es draußen stationär bleibt (bei der sphärischen Kontraktion).

des Gravitationsradius aufgrund der Teilchenerzeugung.) Folglich werden im Feld eines erstarrenden Sterns Photonen erzeugt, die die Frequenz $\nu \approx 1/\tau = c/r_g$ besitzen. Natürlich ist die gravitative Änderung der Frequenz der Quanten um so stärker, je mehr sich die kontrahierende Oberfläche des Sterns dem Gravitationsradius r_g nähert. Im „Meer“ der virtuellen Photonen finden sich aber immer solche, die unter Berücksichtigung der Frequenzänderung die Frequenz $\nu = 1/\tau$ besitzen. Dabei werden auch andere Teilchen der gleichen Frequenz (Neutrinos, Gravitonen) erzeugt, über die wir hier nicht sprechen werden.

Nach den Berechnungen von Hawking erzeugt ein Schwarzes Loch der Masse M (in Gramm) Teilchen wie ein absolut schwarzer Körper, der bis zu einer Temperatur von $(10^{26}/M)$ K erhitzt wurde. Das Schwarze Loch verliert durch die Ausstrahlung der Teilchen an Masse und verkleinert sich. Es versteht sich, daß das nur geschieht, wenn auf das Schwarze Loch von außen keine Materie und Strahlung fällt, die aufgenommen und die Masse des Schwarzen Loches vergrößern würde.

Bei Schwarzen Löchern, die aus Sternen mit mehreren Sonnenmassen entstehen, sind die Effekte der Teilchenerzeugung verschwindend klein. So besitzt ein Schwarzes Loch mit drei Sonnenmassen eine Temperatur von nur 10^{-7} K.

Es ist bekannt, daß das Universum gegenwärtig überall von einer schwarzen Strahlung mit einer Temperatur von 2,7 K durchdrungen wird. In Alltagsbegriffen ist diese Temperatur äußerst gering (-270°C). Sie ist aber bedeutend höher als die Temperatur Schwarzer Löcher, die aus Sternen entstanden sind. Solche Löcher verschlucken im realen Universum bedeutend mehr von der schwarzen Strahlung, als sie selbst an Strahlung emittieren. Ihre Masse wächst jetzt aufgrund der absorbierten Strahlung sogar dann, wenn sie sich weit entfernt von Gaswolken und anderer Materie, die auf sie fallen könnte, befinden. Nur in ferner Zukunft, wenn sich das Universum weiter ausgedehnt hat und die Temperatur weiter gesunken ist, wird die Emission der Schwarzen Löcher, die sich nach dem „Tode“ von Sternen gebildet haben, die Absorption überreffen.

Die Berechnungen zeigen, daß beim Fehlen äußerer Einwirkungen ein Schwarzes Loch stellarer Masse in 10^{66}

$\times (M/M_{\odot})^3$ Jahren „verdampft“. (M ist die Masse des Schwarzen Loches, $M_{\odot}$ die der Sonne.) Das ist nicht so bald, aber es verdampft wenigstens! Die prinzipielle Wichtigkeit der Hawkingschen Entdeckung besteht gerade darin, daß durch sie die Vorstellungen von der Ewigkeit Schwarzer Löcher widerlegt wurden. Sie verschwinden langsam, wobei sie sich in Wärmestrahlung umwandeln, und auf diese Weise verheilen die topologischen „Löcher“ in Raum und Zeit langsam.

Die Temperatur des Schwarzen Loches wächst entsprechend der Verringerung seiner Masse im Laufe des Verdampfens. Das bedeutet, daß sich der Verdampfungsprozeß beschleunigt. Die letzten 10^9 g emittiert das Schwarze Loch innerhalb von 0,1 s. Die freigesetzte Energie $-Mc^2 = 10^9 \text{ g} \times 10^{21} \text{ cm}^2/\text{s}^2 = 10^{23} \text{ W} \cdot \text{s} (= 10^{30} \text{ erg})$ – ist der Explosion von einer Million Megatonnen-Wasserstoffbomben äquivalent!

Was strahlt ein Schwarzes Loch aus?

Ein Schwarzes Loch erzeugt nicht nur Photonen, sondern auch andere Teilchen. Die verhältnismäßig großen Schwarzen Löcher¹, deren Masse einige Sonnenmassen beträgt, haben eine derart niedrige Temperatur, daß sie nur „masselose“ Teilchen produzieren können, also Teilchen, die immer mit Lichtgeschwindigkeit fliegen und keine Ruhmasse besitzen. Zu ihnen gehören die Photonen, die Elektron- und Müon-Neutrinos sowie deren Antiteilchen und schließlich noch die Gravitonen, die Quanten der Gravitationswellen. Ein Schwarzes Loch mit einer für Sterne typischen Masse erzeugt besonders viele Neutrinos aller Sorten (81 % des Gesamtstroms), weiterhin Photonen (17 %) und Gravitonen (2 %) (Abb. 8). Die Tatsache, daß unterschiedliche Teilchen in verschiedenen Mengen ausgestrahlt werden, wird durch ihre unterschiedlichen Eigenschaften erklärt. Neutrinos werden am meisten emittiert, da ihr innerer Drehimpuls (Spin) am kleinsten ist (1/2), Gra-

¹ Das Wort „groß“ hat hier einen übertragenen Sinn. Wir erinnern daran, daß ein Schwarzes Loch mit drei Sonnenmassen einen Radius von gerade 10 km besitzt.

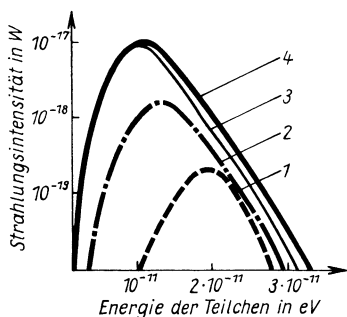


Abb. 8. Spektrum der Strahlung eines Schwarzen Loches mit drei Sonnenmassen (das Maximum der Strahlung aller Teilchen liegt bei 10^{11} eV). 1 Gravitonen; 2 Photonen; 3 Neutrinos; 4 alle Teilchen

vitonen dagegen am wenigsten, da ihr Spin am größten ist (2).

Schwarze Löcher geringer Masse haben eine hohe Temperatur. So ist die Temperatur eines Schwarzen Loches, dessen Masse kleiner als 10^{17} bis 10^{16} g ist, größer als 10^9 bis 10^{10} K. Diese Schwarzen Löcher erzeugen neben den aufgezählten Teilchen auch Elektron-Positron-Paare. Wir weisen darauf hin, daß diese Schwarzen Löcher nur 10^{-11} cm groß sind (1000mal kleiner als ein Atom).

Noch kleinere Schwarze Löcher, deren Masse $5 \cdot 10^{14}$ g nicht überschreitet, können auch Müonen und schwerere Elementarteilchen ausstrahlen. Ein Schwarzes Loch mit der Masse 10^{14} g strahlt 12 % schwere Teilchen und Antiteilchen aus, 28 % Elektronen und Positronen, 48 % Neutrinos aller Arten, 11 % Photonen und 1 % Gravitonen. (Diese Schwarzen Löcher sind kleiner als ein Atomkern.) Wir haben bereits festgestellt, daß diese winzigen Schwarzen Löcher nur in der fernen Vergangenheit des Universums entstehen konnten. Die Quantenprozesse sind gerade für die primordialen Schwarzen Löcher besonders wichtig. Wenn sich am Beginn der Expansion des Universums, als die Materie noch dicht war, Schwarze Löcher, deren Masse kleiner als 10^{15} g war, gebildet haben, so müssen sie bis heute alle verdampft sein. Aus diesem Grund hat der von Hawking entdeckte Prozeß eine für die Kosmologie sehr wichtige Bedeutung. Das Verdampfen der primordialen Schwarzen Löcher führt zur Emission hochfrequenter Photonen, der Gammastrahlung. So müssen Schwarze Löcher mit einer Masse von etwa 10^{15} g Quanten mit einer Energie von ungefähr 100 MeV emittieren.

Die Beobachtung solcher Quanten, die aus dem Kosmos kommen, könnte im Prinzip die Entdeckung der primordialen Schwarzen Löcher bringen. Vorläufig sind sie noch nicht entdeckt worden. Man kann nur behaupten, daß die Anzahl der Schwarzen Löcher mit einer Masse von etwa 10^{15} g im Universum im Mittel nicht größer als zehntausend pro Kubikparsec ist. Wenn ihre Anzahl größer wäre, so wäre die Gesamtmenge der Gammaquanten mit einer Energie um 100 MeV größer als der gegenwärtig beobachtete Gammaquantenstrom aus dem Kosmos. Die Anzahl Zehntausend scheint groß zu sein, erinnern wir uns aber daran, daß die Masse der primordialen Schwarzen Löcher vernachlässigbar, sagen wir, im Vergleich zu der eines Sterns ist.

Eher kann man sich im Sinne einer „Zukunftsvision“ (aber natürlich streng wissenschaftlich) vorstellen, daß in ferner Zukunft im Kosmos kleine Schwarze Löcher künstlich hergestellt werden. Sie könnten die zu ihrer Herstellung aufgewendete Energie aufbewahren und sie dann im gegebenen Tempo und mit gegebener Energie der Teilchen, die durch die Masse des Schwarzen Loches bestimmt werden, wieder ausstrahlen. So würde ein Schwarzes Loch der Masse 10^{15} g 10^{19} W ($= 10^{17}$ erg/s) über einen Zeitraum von 10 Milliarden Jahren freisetzen.

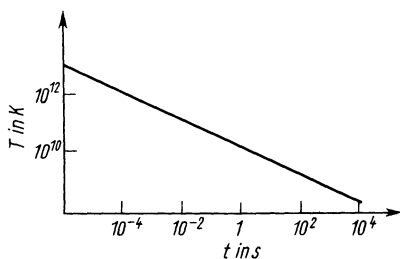
An der neuen Erscheinung ist noch vieles unklar. Es ist z. B. unbekannt, ob ein Schwarzes Loch vollständig ohne Rest verdampft oder ob an seinem Platz ein Teilchen mit der sog. Planckschen Masse 10^{-5} g bleibt. Es ist unklar, ob man den Verdampfungsprozeß Schwarzer Löcher im Universum beobachten kann. Und natürlich sind irgendwelche Experimente mit Schwarzen Löchern in Laboratorien der Physiker vorläufig nur Vorstellungen in unserer Phantasie. Allerdings zwingt uns schon das bisher Bekannte, von neuem viele Aspekte der Entwicklung der Materie im Universum zu überdenken.

Der Entstehungsprozeß primordialer Schwarzer Löcher

Nachdem wir uns mit den Eigenschaften der Schwarzen Minilöcher bekannt gemacht haben, wollen wir uns ausführlicher der Frage widmen, wie sie sich in der Entwick-

lungsgeschichte des Universums gebildet haben könnten. Zunächst stellen wir fest, daß alle Himmelskörper und Systeme, die wir heute beobachten, während einer bestimmten Etappe der Expansion des Universums entstanden sind. Zu Beginn der Expansion konnten sie offensichtlich nicht existieren: Tatsächlich wissen wir, daß infolge der Expansion des Universums die Galaxien und Galaxienhaufen früher enger, also näher aneinander gelegen waren. Noch früher konnten einzelne Galaxien überhaupt nicht existieren, da sie sonst einander „überlappt“ hätten. Nach heutigen Vorstellungen war die Materie während der frühesten Etappen der Expansion des Universums nahezu homogen im Raum verteilt, und zwar als expandierendes Plasma hoher Temperatur. Anscheinend entstand die ganze Vielfalt der uns im Weltall umgebenden Himmelskörper, der Sterne, Galaxien und Galaxienhaufen, durch die unter der Wirkung der Schwerkraft erfolgende Verdichtung zunächst kleiner Inhomogenitäten in der expandierenden Materie des Universums. Unter diesen Objekten können auch Schwarze Löcher sein. Die ganze Vielfalt der kosmischen Objekte entstand vor verhältnismäßig kurzer Zeit, als sich die Eigenschaften der Materie im Universum von den heutigen nur unwesentlich unterschieden. Uns interessieren jedoch die kleinen Schwarzen Löcher, die nur während der sehr frühen Stadien der Entwicklung des Universums entstehen konnten, denn nur damals besaß die Materie im Universum die riesige Dichte, die zur Bildung primordialer Schwarzer Löcher kleiner Masse erforderlich ist. Es stellt sich jedoch heraus, daß die Bildung irgendwelcher isolierter Körper, darunter auch Schwarzer Löcher, aus primordialen kleinen Inhomogenitäten der Materie in dieser Frühphase des Universums unmöglich ist. Die Materie im Universum war nämlich in der Vergangenheit heiß, und ihre Temperatur war sehr hoch. (Die Temperaturänderung mit der Zeit ist in Abb. 9 dargestellt.) Dabei war die Schallgeschwindigkeit nur wenig kleiner als die Lichtgeschwindigkeit. Sie betrug $v_{\text{Schall}} = c/\sqrt{3}$. Solch ein heißes Gas (Plasma) wird als ultrarelativistisch bezeichnet. Unter diesen Bedingungen ist die Schwerkraft nicht dazu imstande, Materieklumpen im expandierenden Gas so stark zu verdichten, daß die Klumpen immer dichter werden.

Abb. 9. Änderung der Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit im expandierenden Kosmos



Jede solche Kontraktion wird durch die mächtigen Druckkräfte der heißen Materie aufgehalten. Dabei spielt der Lichtdruck die Hauptrolle, da die Materie für das Licht völlig undurchlässig war. Die Kontraktion des Klumpens wird aufgehalten und durch die Expansion ersetzt. Dabei verwandelt sich die gesamte Inhomogenität (der Physiker sagt Fluktuation) der Dichte in eine Schallwelle, die aufgrund dissipativer Prozesse allmählich gedämpft wird. Die Entstehung einzelner Himmelskörper war erst während verhältnismäßig später Etappen der Expansion des Universums möglich, nachdem die Temperatur so weit gefallen war, daß sich die Materie aus dem plasmaförmigen Zustand in neutrales Gas verwandelt hat. Das geschah etwa eine Million Jahre nach dem Beginn der kosmologischen Expansion. Die Temperatur des Gases betrug zu dieser Zeit etwa 3500 K. Neutrale Materie ist für die Strahlung durchlässig, und der Strahlungsdruck des Lichtes hindert jetzt die Schwerkraft nicht an der Verdichtung der Materie. Die Schallgeschwindigkeit in solch einem neutralen Gas beträgt nur $v_{\text{Schall}} \approx 1 \text{ km/s}$ anstelle von etwa 10^5 km/s im für Licht undurchlässigen Plasma. Deshalb ist die Elastizität des Gases jetzt klein, und die Bildung dichter Klumpen und schließlich die Bildung der Himmelskörper wird möglich.

Wir kehren jetzt zu den frühen Etappen der Expansion des Universums zurück, als die Dichte und die Temperaturen noch sehr groß waren. Damit sich in jener frühen Epoche, als die Druckkräfte groß waren, kleine primordiale Schwarze Löcher bilden konnten, war es notwendig, daß im Universum von Anfang an an einzelnen Stellen starke Inhomogenitäten des Gravitationsfeldes existierten. Nur solche großen Fluktuationen des Schwerfeldes können die mächtigen Druckkräfte des heißen Gases bezwingen und

die ursprünglich expandierende Materie zu einem Schwarzen Loch verdichten.

Womit kann man die Stärke der Fluktuation des Gravitationsfeldes messen? Mit dem Newtonschen Potential ist das unmöglich. Bei diesen riesigen Materiedichten ist nämlich die Anziehungskraft und die Differenz der Kräfte, die auf verschiedene Teilchen wirken, selbst in verhältnismäßig kleinen Raumgebieten sehr groß, und es ist unmöglich, die Newtonsche Theorie anzuwenden.

Man muß die Einsteinsche Theorie heranziehen. Wir können für unsere Ziele wie folgt vorgehen. Wir erinnern uns, daß starke Gravitationsfelder die Geometrie des Raumes verändern und ihn krümmen. Die Größe der Fluktuation kann man in unserem Fall dadurch charakterisieren, wie stark sich der gekrümmte Raum im gegebenen Volumen vom ungestörten Hintergrundraum unterscheidet. Die maximal denkbare Abweichung tritt dann auf, wenn das gegebene Raumvolumen so stark gekrümmt ist, daß es sich ähnlich einer Kugel selbst abschließt, wobei es eine einzelne abgeschlossene Welt bildet, die sich von dem umgebenden Universum „abspaltet“. Das ist der Grenzfall. Die Größe der Fluktuation des Gravitationsfeldes werden wir durch eine Zahl charakterisieren, die uns das Verhältnis einer gegebenen Fluktuation zu einer vollständig abgeschlossenen Welt angibt.

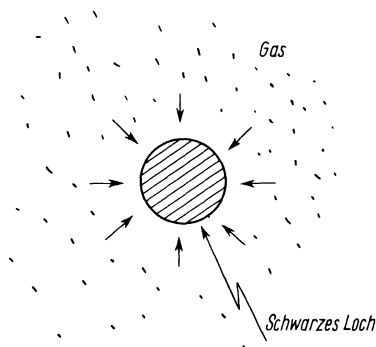
Die erste Aufgabe, die vor der Theorie steht, ist folglich abzuschätzen, wie stark die Fluktuationen des Gravitationsfeldes sein müssen, damit Schwarze Löcher entstehen.

Das ist jedoch noch nicht alles. Es ist nicht minder wichtig zu verfolgen, was mit dem Schwarzen Loch nach seiner Entstehung geschieht. Während der Frühphase der Expansion des Universums ist das Schwarze Loch nämlich von einem dichten, heißen Gas umgeben. Bedeutende Mengen dieses Gases können in das Schwarze Loch fallen. (Dieser Prozeß wird als Accretion bezeichnet.)

In Abb. 10 ist ein Schwarzes Loch mit einfallendem Gas dargestellt. Wie schnell kann der Massenzuwachs des Schwarzen Loches und folglich seine Vergrößerung aufgrund dieses Prozesses sein?

Dazu stellen wir zunächst fest, daß im Augenblick der Entstehung des Schwarzen Loches sein Radius ungefähr der Entfernung gleich sein muß, die das Licht (oder der

Abb. 10. Die Accretion von Gas auf ein Schwarzes Loch in den frühen Expansionsetappen des Universums



Schall, da beide Geschwindigkeiten etwa gleich sind) seit dem Beginn der Expansion des Universums im ultrarelativistischen Plasma zurückgelegt hat. Jede Störung kleineren Ausmaßes wird nämlich, wie die Berechnungen zeigen, in eine Schallwelle verwandelt, während eine Störung größeren Ausmaßes die Expansion (an der sie mit der Materie des Universums teilnimmt) fortsetzen muß. Folglich muß die Ausdehnung des Schwarzen Loches, d. h. sein Gravitationsradius, im Augenblick t der Entstehung des Schwarzen Loches (die Zeit wird vom Beginn der Expansion des Universums an gezählt)

$$r_g \approx ct \quad (6)$$

betragen. Diese Formel zeigt übrigens, in welchem Augenblick sich Schwarze Löcher mit einem bestimmten Radius bilden können. So konnte sich ein Schwarzes Loch mit einer Masse von 10^{15} g und mit einem Radius $r_g \approx 10^{-13}$ cm nur 10^{-23} s nach dem Beginn der Expansion des Universums bilden! Später war die Materiedichte schon zu klein, so daß ein so kleines Schwarzes Loch nicht mehr entstehen konnte.

Wir wollen jetzt untersuchen, mit welcher Geschwindigkeit das heiße Gas aus der Umgebung in das entstandene Schwarze Loch hineinstürzt. Das Gas kann mit Schallgeschwindigkeit (die in unserem Fall nahezu gleich der Lichtgeschwindigkeit c ist) durch die Oberfläche des Schwarzen Loches mit dem Radius r_g in das Schwarze Loch fließen. Dabei wird sich die Masse des Schwarzen Loches vergrößern und folglich auch sein Radius. Wenn das Gas seit dem Augenblick der Entstehung des Schwar-

zen Loches mit Schallgeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit) in dieses hineinstürzt, so stellt sich heraus, daß dabei der Radius r_g des Schwarzen Loches ebenfalls mit Lichtgeschwindigkeit anwächst! Das bedeutet, daß die Formel (6) die gesamte Zeit nach der Entstehung des Schwarzen Loches gültig ist (und nicht nur im Moment seiner Entstehung).¹ Für solch ein Vergrößerungstempo des Schwarzen Loches ist es allerdings notwendig, daß der Materiestrom in das Schwarze Loch unmittelbar nach dessen Entstehung mit Lichtgeschwindigkeit einsetzt. Sonst würde sich die Materiedichte in der Umgebung des Schwarzen Loches infolge der Expansion des Universums verringern. In diesem Fall würde der Materieeinfall in das Schwarze Loch dessen Masse und Ausmaß nicht so schnell vergrößern.

So gelangt man nach einer ersten theoretischen Abschätzung zu dem Schluß, daß die Accretion sogar ein katastrophenartiges Ausmaß annehmen kann. Das Gas würde so ungestüm in das Schwarze Loch stürzen, daß alle Materie innerhalb einer sich mit Lichtgeschwindigkeit ausdehnenden Kugel um das Schwarze Loch in dieses hineinfällt. Ebenso ungestüm würde die Masse des Schwarzen Loches anwachsen. Wenn solche Verhältnisse

¹ Für die an Einzelheiten interessierten Leser geben wir eine Abschätzung für das Wachstumstempo des Schwarzen Loches an. Gas der Dichte ρ fließt mit der Geschwindigkeit c durch die Oberfläche des Schwarzen Loches mit der Fläche r_g^2 . (Bei einer Abschätzung lassen wir die Faktoren der Art 2, π usw. weg.) Dann vergrößert sich die Masse des Schwarzen Loches pro Zeiteinheit um $\rho c r_g^2$. Um zu erfahren, wie sich dabei der Gravitationsradius ändert, muß man diese Masse mit G multiplizieren und durch c^2 dividieren (vgl. mit dem Kapitel „Die Gravitationstheorie Einsteins“, den Faktor 2 lassen wir weg). Der Gravitationsradius vergrößert sich also pro Zeiteinheit um

$$\rho c r_g^2 \frac{G}{c^2}.$$

In diese Formel setzen wir jetzt statt r_g den Ausdruck ct und benutzen die Formel für die Materiedichte im expandierenden Universum $\rho = 1/(Gt^2)$. Wir erhalten

$$\left(\frac{1}{Gt^2}\right) c (ct)^2 \frac{G}{c^2} = c$$

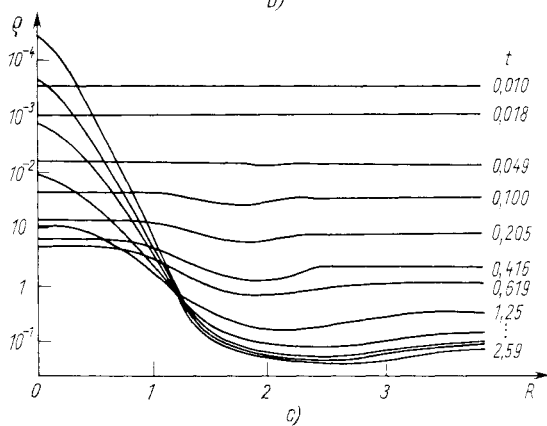
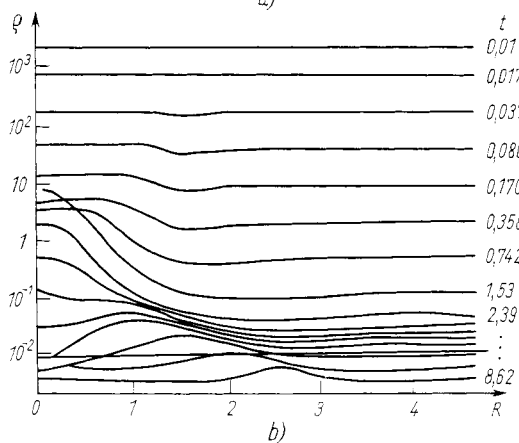
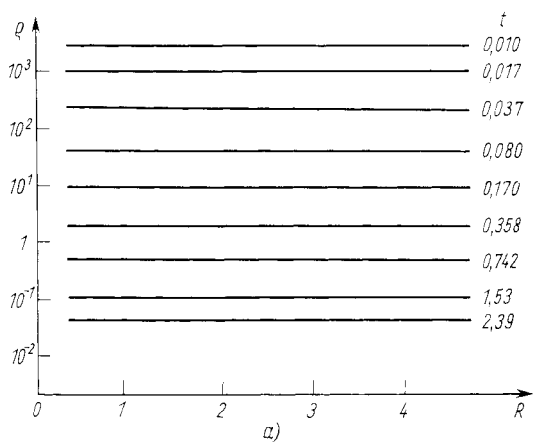
Das bedeutet, daß sich der Gravitationsradius tatsächlich mit Lichtgeschwindigkeit vergrößert.

aufgetreten wären, so müßten heute sogar die Massen der zuerst kleinen Schwarzen Löcher riesig geworden sein, größer noch als die Massen der gewaltigsten Galaxien.

Tritt nun eine derartig starke Accretion tatsächlich auf? Diese Frage kann ebenso wie die Frage nach der Größe der Fluktuationen des Gravitationsfeldes, die zur Entstehung primordialer Schwarzer Löcher erforderlich sind, nur durch numerische Berechnungen auf EDV-Anlagen beantwortet werden.

In Abb. 11 sind Auszüge der Resultate derartiger Berechnungen dargestellt, die von den sowjetischen Astrophysikern D. K. Nadeshin, A. G. Polnarew und dem Autor unter verschiedenen Voraussetzungen über die Größe der Fluktuationen des Gravitationsfeldes gemacht wurden. Auf den Horizontalen ist in den Abbildungen der Abstand vom Zentrum der im expandierenden Universum aufgetretenen Störung aufgetragen, auf den Vertikalen die Materiedichte zu verschiedenen Zeitpunkten. Jede Kurve entspricht einem bestimmten Zeitpunkt im expandierenden Universum. Die Abb. 11a zeigt die Entwicklung, wenn keinerlei Störungen des Gravitationsfeldes vorhanden sind. Dann fällt die Materiedichte überall gleich, und jede Linie auf der Abbildung ist eine Gerade, die aufeinanderfolgenden Zeitpunkten mit abnehmender Dichte entspricht. Die Abb. 11b entspricht einer verhältnismäßig kleinen Fluktuation des Gravitationsfeldes in der Nähe des Zentrums einer Störung. Zuerst fällt die Dichte mit der Expansion in allen Abständen vom Zentrum. Dann entsteht in der Nähe des Zentrums ein immer größerer Dichteüberschuß. Ein Schwarzes Loch bildet sich jedoch nicht. Die Druckkräfte verwandeln die Kontraktion in Expansion, und es entsteht eine Schallwelle. Auf den untersten Kurven ist zu sehen, wie sich die Schallwelle aus dem Zentrum entfernt. Die Abb. 11c entspricht schließlich einer starken Fluktuation des Gravitationsfeldes. Man sieht, wie sich die Materie im Zentrum unaufhörlich zusammenzieht und sich ein primordiales Schwarzes Loch bildet.

Wir erinnern uns daran, daß wir vereinbart hatten, die Größe der Fluktuation des Gravitationsfeldes durch eine Zahl zu charakterisieren, die angibt, welchem Anteil einer vollständig abgeschlossenen Welt die gegebene Fluktuation des Schwerfeldes entspricht. Die Abb. 11b entspricht einer Fluktuation 0,38, Abb. 11c einer Fluktuation 0,45. Die



Berechnungen zeigen folglich, daß für die Entstehung primordialer Schwarzer Löcher sehr starke Fluktuationen des Gravitationsfeldes erforderlich sind, die etwa der Hälfte der durch die Allgemeine Relativitätstheorie maximal zulässigen entsprechen. Außerdem wurde geklärt, daß eine katastrophenartige Accretion von Gas auf das Schwarze Loch nicht auftritt und sich seine Masse in der Zukunft nicht wesentlich ändert.

Gibt es primordiale Schwarze Löcher im All?

Schwarze Löcher können sich also ganz zu Beginn der Expansion des Weltalls bilden. Ist es nun möglich, daß sich sehr viele gebildet haben? Tatsächlich könnten es heute so viele sein, daß über große Räume die Gesamtmasse primordialer Schwarzer Löcher größer wäre als die Gesamtmasse der gewöhnlichen Himmelskörper und der Gasnebel. Da es sehr schwierig ist, kleine primordiale Schwarze Löcher zu entdecken, könnte man so etwas durchaus annehmen. Aber selbst dann, wenn es mehr primordiale Schwarze Löcher als gewöhnliche Materie gäbe, könnte man sie trotzdem nicht mit direkten astrophysikalischen Methoden entdecken.

Eine eingehendere Betrachtung der Entwicklungsgeschichte des Alls hat jedoch gezeigt, daß sich in der Vergan-

Abb. 11. Die Herausbildung primordialer Schwarzer Löcher im expandierenden Universum. Resultate aufgrund von Computerrechnungen. In den Abbildungen ist auf der Horizontalen die Entfernung vom Zentrum der Störung in der expandierenden Materie abgetragen. Als Einheitsentfernung wurde das Ausmaß der Fluktuation zum Anfangszeitpunkt gewählt. Auf der Vertikalen ist die Dichte der Materie zu verschiedenen Zeitpunkten (in relativen Einheiten) abgetragen. Jede Linie entspricht einem bestimmten Zeitpunkt. Als Zeiteinheit wurde die Zeit gewählt, die das Licht benötigt, um eine Entfernung zurückzulegen, die gleich der Größe des gestörten Gebietes ist.

a) Die Dichte der Materie im Universum zu verschiedenen Zeitpunkten im ungestörten Zustand.

b) Betrachtet wird die Fluktuation des Gravitationsfeldes, die 0,38 der maximal möglichen beträgt. Die Störung geht in eine Schallwelle über, es bildet sich kein Schwarzes Loch.

c) Die Fluktuation des Gravitationsfeldes beträgt 0,45. Im Zentrum der Störung, in der Nähe von $R = 0$, entsteht ein Schwarzes Loch, die Materie kollabiert dort unbegrenzt.

genheit kein bedeutender Anteil der Materie in Schwarze Löcher verwandeln konnte. Die Herausbildung Schwarzer Löcher aus heißem Gas hätte sich nämlich im Verlaufe der kosmischen Expansion auf das Expansionsgesetz ausgewirkt. Ein Universum, das aus vielen Schwarzen Löchern besteht, expandiert nicht wie ein Kosmos, der aus heißem Gas besteht. Bei genügend großer Zahl von Schwarzen Löchern wäre die Expansionszeit des Universums kleiner als das Alter der Erde, was unmöglich ist. Unter Berücksichtigung dieses Umstandes zeigt es sich, daß, sofern sich tatsächlich primordiale Schwarze Löcher mit einer Masse um 10^{16} g gebildet haben, ihr Anteil an der Gesamtmasse der Materie zu dieser Zeit nicht größer als ein Trillionstel, d.h. sehr klein war. Wenn wir uns jedoch sehr kleinen Schwarzen Löchern mit einer Masse von weniger als 10^{15} g zuwenden, so erweist sich, daß dann die Quanteneffekte der Verdampfung Schwarzer Löcher sehr wichtig werden, wie sie in den Kapiteln „Schwarze Löcher existieren nicht ewig!“ und „Was strahlt ein Schwarzes Loch aus?“ beschrieben wurden.

Wie sich in diesen Kapiteln herausstellte, besitzen Schwarze Löcher mit einer Masse von etwa 10^{15} g eine Lebensdauer von 10 bis 20 Milliarden Jahren. Dies ist etwa die gleiche Zeit, die seit dem Beginn der kosmischen Expansion vergangen ist. Wenn Schwarze Löcher mit einer solchen Masse unmittelbar zu Beginn der Expansion des Alls entstanden sind, dann werden sie gerade zu unserer Zeit verdampfen und dabei Gammastrahlung mit einer Energie von etwa 100 MeV aussenden. In dem Kapitel „Was strahlt ein Schwarzes Loch aus?“ ist gezeigt worden, daß das Fehlen einer intensiven Gammastrahlung aus dem Kosmos die Schlußfolgerung gestattet, daß weniger als zehntausend primordiale Schwarze Löcher solcher Masse auf ein Kubikparsec kommen. Ihre Gesamtmasse ist im Vergleich zur Gesamtmasse der gewöhnlichen Materie (Gas, Sterne) äußerst gering. Schwarze Löcher mit einer Masse von 10^{15} g müssen beim Verdampfen, wie wir wissen, neben den Gammaquanten auch Elektron-Positron-Paare ausstrahlen. Diese hochenergetischen geladenen Teilchen müßten bei ihrer Bewegung in den interstellaren Magnetfeldern unserer Galaxis synchrotrone Radiostrahlung erzeugen. Wenn es viele solcher Schwarzen Löcher gäbe, so wäre die Intensität der Radiostrahlung

merklich größer als die beobachtete synchrotrone Radiostrahlung der Elektronen aus der kosmischen Strahlung unserer Galaxis. Eine solche zusätzliche Radiostrahlung ist jedoch nicht entdeckt worden. Folglich weist auch das Fehlen der intensiven Synchrotronstrahlung darauf hin, daß die Zahl der Schwarzen Löcher mit einer Masse von 10^{15} g, die in unserer Zeit verdampfen, sehr gering ist, sofern es überhaupt welche gibt. Demnach haben die Versuche, im Universum kleine primordiale Schwarze Löcher mit Hilfe der direkten Beobachtung der Produkte ihres Verdampfungsprozesses zu finden, nicht zum Erfolg geführt.

Schwarze Super-Minilöcher

Wir wollen uns jetzt der Frage zuwenden, ob im Weltall Schwarze Löcher mit einer Masse kleiner als 10^{15} g entstanden sind. Auf den ersten Blick läßt sich dazu überhaupt nichts sagen, da solche superkleinen Schwarzen Löcher eine Lebensdauer von weniger als 10^{10} Jahren besitzen. Wenn sie tatsächlich ganz zu Beginn der kosmischen Expansion entstanden sind, so müssen sie heute vollständig verdampft und verschwunden sein; sie zu finden ist unmöglich.

Es stellt sich jedoch heraus, daß die Verdampfung solcher superkleinen Schwarzen Löcher sehr stark auf die physikalischen Prozesse während der vergangenen Entwicklung des Kosmos eingewirkt hätte. Die Änderung solcher Prozesse wäre nicht unbemerkt abgelaufen, sondern hätte sich auf den heutigen Zustand des Universums ausgewirkt. Um zu verstehen, womit wir es hier zu tun haben, müssen wir für einen Augenblick die Schwarzen Löcher verlassen und uns einer Periode der fernen Vergangenheit in der Geschichte des Universums zuwenden, den ersten Minuten nach Beginn seiner Expansion. In diesen ersten Minuten fand der Prozeß der Synthese der leichten chemischen Elemente im Kosmos statt. Wir haben bereits davon gesprochen, daß zu Beginn der Expansion die Materie äußerst dicht und heiß war. Mit der Expansion fand eine Abkühlung der Materie statt. In der ersten Sekunde überstieg die Temperatur 10 Milliarden K. Bei einer

derartig hohen Temperatur können natürlich keine neutralen Atome existieren, die gesamte Materie ist vollständig ionisiert. Bei einer solchen Temperatur können auch keine aus mehreren Nukleonen bestehenden Atomkerne existieren. Ein beliebiger komplizierter Kern, der aus Neutronen und Protonen besteht, würde sofort durch hochenergetische Teilchen, die eine riesige Temperatur besitzen, in seine Bestandteile zerschlagen. Deshalb sind die Protonen und Neutronen nicht in komplizierteren Systemen gebunden. Sie treten in Wechselwirkung mit den sie umgebenden Elektronen, Positronen, Neutrinos und Antineutrinos. Im Resultat dieser Wechselwirkung wandeln sich Protonen und Neutronen sehr schnell ineinander um:



Es laufen auch andere ähnliche Reaktionen ab.

Unmittelbar zu Beginn der Expansion war die Zahl von Protonen und Neutronen gleich. Mit der Abkühlung wurden es immer mehr Protonen als Neutronen. Das hängt damit zusammen, daß das Neutron eine größere Masse als ein Proton besitzt und seine Bildung in den Reaktionen (7) dadurch erschwert ist. Wenn die Temperatur unter einige Milliarden Kelvin fällt, verlangsamt sich die Reaktion der Verwandlung eines Neutrons in ein Proton und umgekehrt so sehr, daß sie praktisch überhaupt nicht mehr stattfindet. Nach den ersten Sekunden der Expansion beträgt der Anteil der Neutronen gegenüber der Gesamtzahl von Neutronen und Protonen etwa 15%. Wenn die Temperatur noch weiter fällt, bis auf eine Milliarde Kelvin, können sich die Neutronen und Protonen schon zu den einfachsten Atomkernen verbinden. Bei einer solchen Temperatur werden die Kerne bei Zusammenstößen mit den sie umgebenden Teilchen schon nicht mehr zerstört. Die Energie der Teilchen reicht nicht mehr dazu aus, die Atomkerne zu zertrümmern. Praktisch werden alle vorhandenen Neutronen durch die Protonen eingefangen, bilden jeweils Paare ($n + p$) und vereinigen sich zu Heliumatomen. Außerdem bildet sich sehr wenig Deuterium, Lithium und Helium-3. In diesem Stadium endet der Prozeß der Synthese von Elementen. Solche schweren Elemente wie Kohlenstoff, Stickstoff oder das noch

schwerere Eisen entstehen in diesen Prozessen praktisch überhaupt nicht. Diese Elemente werden erst sehr viel später in den Sternen gebildet. Es ist nicht schwer zu berechnen, wieviel Helium sich zu Beginn der kosmischen Expansion gebildet hat. Fast alle Neutronen wurden für die Synthese der Heliumkerne verbraucht. Ein Heliumkern besteht aus zwei Neutronen und zwei Protonen. Demnach haben sich die 15 % Neutronen, die in der Materie enthalten waren, mit einer eben solchen Menge an Protonen vereinigt, wobei $2 \cdot 15 \% = 30 \%$ Helium (nach Masseanteil gerechnet) entsteht. Die übrigen 70 % der Materie bestehen dann aus Wasserstoff.

Moderne Beobachtungen zeigen, daß die Materie der Gasnebel und Sterne tatsächlich etwa 30 % Helium enthält. Die Theorie der Synthese der chemischen Elemente zu Beginn der kosmischen Expansion wird also durch die Beobachtungen bestätigt. Es erhebt sich nun die Frage: Was sollen hier die primordialen Schwarzen Löcher? Das Problem besteht darin, daß bei Existenz vieler solcher Schwarzer Löcher ihr Verdampfungsprozeß während der ersten Minuten der kosmischen Expansion wesentlich die Synthese der chemischen Elemente beeinflußt und deren Endprodukt geändert hätte.

Wir wollen untersuchen, was mit der Synthese der chemischen Elemente bei der Verdampfung der Schwarzen Löcher geschehen wäre. Primordiale Schwarze Löcher mit einer Masse von 10^9 g verdampfen in den ersten Sekunden der kosmischen Expansion, wenn die Reaktionen der wechselseitigen Umwandlung von Protonen und Neutronen ablaufen. Neutrinos und Antineutrinos, die bei der Verdampfung erzeugt werden, beeinflussen die Reaktionen (7), was zu einer größeren Konzentration der Neutronen führt. Der prozentuale Anteil der Neutronen erweist sich dann höher als 15 %. Im Resultat der Vereinigung aller Neutronen mit Protonen und der Heliumsynthese entsteht mehr als 30 % Helium. Dies widerspricht der beobachteten Heliumverteilung im Universum und bedeutet, daß es nur wenige solcher Schwarzen Löcher geben konnte. Eine analoge Schlußfolgerung kann man bezüglich etwas massiverer Schwarzer Löcher durchführen, die in einer Periode verdampfen, wenn die Temperatur im Universum auf einige hundert Millionen K gefallen ist. Die Kernsynthese ist zu dieser Zeit praktisch schon abgeschlossen. Beim Verdamp-

fen wenig massiver Schwarzer Löcher werden auch sehr energiereiche Neutronen und Protonen abgestrahlt. Diese zerstören die sich schon gebildeten Heliumatome. Dabei entstehen viele freie langsame Neutronen, die sich mit Protonen zu Deuteriumkernen vereinigen.

Deuterium gibt es jedoch in der Natur relativ wenig, nach Masseanteilen etwa 0,005%. Man kommt damit zu dem Schluß, daß es Schwarze Löcher mit einer Masse im Intervall von 10^9 bis 10^{12} g ebenfalls nicht in einer merklichen Menge gegeben haben kann.

Wenden wir uns zuletzt den kleinsten Schwarzen Löchern zu mit Massen, die weniger als 10^9 g betragen. Sie sind lange vor der kosmologischen Kernsynthese verdampft. Ihre Strahlung hätte im Verlauf der Wechselwirkung mit der Materie zur Aufheizung geführt, sich also in Wärme verwandelt, und dies bedeutet, daß die Ursache dieser Strahlung nicht mehr reproduzierbar wäre. Es hat damit den Anschein, als könnte man keine Aussage darüber machen, ob sich die Materie durch die Strahlung der Schwarzen Löcher oder durch irgendwelche anderen Ursachen erhitzt hat. Es erweist sich jedoch, daß man auch über diese Schwarzen Löcher etwas aussagen kann. Der Grad der Erhitzung der Materie bei einem solchen Prozeß kann nämlich nicht sehr groß gewesen sein. Heute beobachten wir im Kosmos die sogenannte Hintergrund- oder Reliktstrahlung, die aus der Epoche herrührt, in der das Universum noch heiß war. Die Reliktstrahlung hat sich bei der kosmischen Expansion abgekühlt und besitzt heute nur noch eine Temperatur von etwa 3 K. Wenn jedoch in der fernen Vergangenheit die verdampfenden Schwarzen Löcher die Materie sehr stark erhitzt hätten, würden wir heute eine höhere Temperatur der Reliktstrahlung als 3 K messen. Das heißt, daß es auch von diesen Schwarzen Löchern nur sehr wenige gegeben haben kann. Damit wollen wir zum Resultat unserer Betrachtung kommen. Konnten primordiale Schwarze Löcher zu Beginn der kosmischen Expansion entstehen? Ja, sie hätten entstehen können. Die vorhandenen Beobachtungen schränken jedoch den möglichen Anteil an Masse, der auf die in der Vergangenheit existierenden Schwarzen Löcher entfällt, sehr stark ein. Sofern zu Beginn der kosmischen Expansion tatsächlich starke Fluktuationen des Gravitationsfeldes existierten, die

zur Bildung primordialer Schwarzer Löcher führten, so war die Anzahl dieser Fluktuationen sehr gering. Diese Schlußfolgerung ist sehr wichtig in bezug auf die Klärung der Frage, was unmittelbar zu Beginn der Expansion des Universums geschah, als die Zeit noch nicht einmal nach Sekunden, sondern nach verschwindenden Zeitintervallen von 10^{-43} s gemessen wurde.

Wir sehen, daß uns die Schwarzen Löcher helfen zu „ertasten“, welche Bedingungen unmittelbar zu Beginn der kosmischen Expansion herrschten. Sie helfen uns damit, uns Schritt für Schritt auf die Lösung des Problems der Anfangsexpansion des Universums vorwärts zu bewegen, dem grundlegendsten Problem und einer der erstaunlichsten Geheimnisse der Natur.

Schlußbetrachtung

Fassen wir kurz das in dieser Broschüre Gesagte zusammen.

Wir haben uns mit den Schwarzen Löchern bekannt gemacht, mit Objekten, die von den Theoretikern vor Jahrzehnten vorausgesagt wurden. Da Schwarze Löcher äußerst ungewöhnliche Objekte sind, betrachtete man diese Voraussage mit Skepsis. Die historische Erfahrung der Wissenschaft, besonders die Erfahrung der letzten Jahrzehnte, hat die Fruchtbarkeit der Voraussagen der theoretischen Astrophysik überzeugend gezeigt. (Beispiele für die Entdeckung außergewöhnlicher Objekte aufgrund theoretischer Voraussagen haben wir in diesem Büchlein angeführt.)

Gerade jetzt geschieht unter unseren Augen eine der erstaunlichsten Entdeckungen, der mögliche Nachweis eines Schwarzen Loches durch die Astronomen.

Die Beobachter sind wahrscheinlich dem endgültigen Beweis dafür nahe, daß einige der Röntgenquellen Schwarze Löcher „stellaren Ursprungs“ sind. Die Suche nach „supermassiven“ Schwarzen Löchern und nach primordialen Schwarzen Löchern wird fortgesetzt.

Ein zuverlässiger Beweis für die Existenz Schwarzer Löcher würde nicht nur die Entdeckung neuer interessanter Objekte bedeuten, sondern wäre auch ein Beweis für eine ganz

ungewöhnliche topologische Struktur des realen Raum-Zeit-Kontinuums, da Schwarze Löcher nicht nur eine bildliche Bezeichnung sind, sondern auch in Wirklichkeit besondere Gebiete dieses Kontinuums. Deshalb ist die Entdeckung der Schwarzen Löcher neben der Entdeckung der Expansion des Universums eine der größten Errungenschaften der Naturwissenschaft im 20. Jahrhundert.