

Urknall-Strahlung, Gravitationskollaps, Quasars

Entwicklungsgeschehen im Universum

Wolfgang Büchel SJ

Die Erforschung der Entwicklung des Universums nimmt denselben Gang wie die Erforschung der Evolution der Organismen: Der grundlegende Gedanke einer geschichtlichen Entwicklung tritt immer klarer hervor, aber zugleich werden stets neue Details bekannt, die unerwartete Fragen aufwerfen.

Expansion des Universums und Rotverschiebung

Die Annahme, daß das ganze uns bekannte Universum sich vor einigen Milliarden Jahren in einem Zustand extrem hoher Dichte und Temperatur befand, findet heute kaum mehr Widerspruch; auch die Vertreter der sog. Steady-State-Theorie, die dieser Annahme bis vor kurzem heftig widersprachen, haben inzwischen ihren Widerstand aufgegeben¹. Es wurde sogar eine Strahlung entdeckt, die anscheinend ein Nachglühen jenes „Feuerballs“ ist, der damals das Universum erfüllte, ähnlich dem Feuerball nach einer Atomexplosion.

Um das Gemeinte zu verstehen, muß man sich kurz vergegenwärtigen, wie die „Expansion des Universums“ aufzufassen ist. Am besten betrachtet man dazu das Modell eines Kinder-Luftballons aus Gummi, der aufgeblasen werden kann; auf den Ballon seien einzelne Farbtupfen aufgetragen. Bläst man den Ballon auf, dann vergrößern alle Farbtupfen ihren Abstand voneinander in demselben Maß, wie der Durchmesser des Ballons wächst: Wenn der Durchmesser auf das Doppelte oder Dreifache angewachsen ist, sind auch alle Abstände zwischen den Farbtupfen auf das Doppelte bzw. Dreifache angewachsen. In diesem Modell stellen die Farbtupfen Sternsysteme (Milchstraßensysteme, Spiral-, „nebel“ usw.) dar, die Ballonoberfläche ist ein modellmäßiges Bild des gekrümmten Weltraums; und in dem Maß, in dem der Raum sich ausdehnt, vergrößern sich alle Abstände zwischen den Sternsystemen².

Aber nicht nur die Abstände zwischen den Sternsystemen wachsen mit der Expansion des Weltraums. Wir wollen Licht betrachten, das von einem Sternsystem A

¹ Vgl. W. Büchel in dieser Zschr. 177 (1966) 119.

² Für Genaueres vgl. W. Büchel, Philosophische Probleme der Physik (Freiburg 1965) 258 ff., 73 ff.

ausgeht und nach langer Wanderung durch den expandierenden Weltraum schließlich bei dem Sternsystem B eintrifft; in der Zeit, welche das Licht für den Weg von A nach B braucht, möge sich der Radius des expandierenden Weltraums gerade verdoppelt haben. Licht besteht bekanntlich aus elektromagnetischen Wellen von derselben Art wie die Wellen, die ein Rundfunksender ausstrahlt; nur ist die Wellenlänge, d. h. der Abstand zwischen zwei benachbarten Wellentälern oder zwei benachbarten Wellenbergen, bei Licht viel kleiner als bei Radiowellen: das dunkelrote Licht hat eine Wellenlänge von knapp 0,0008 mm, das blauviolette Licht eine Wellenlänge von 0,0004 mm. Wenn nun Licht von dem Sternsystem A zu dem Sternsystem B wandert und wenn sich während dieser Wanderung der Radius des expandierenden Weltraums verdoppelt, dann wächst, wie die Physik zeigt, auch die Wellenlänge des wandernden Lichts auf das Doppelte: Wenn das Licht als blaues Licht, also mit einer Wellenlänge von 0,0004 mm, von A ausging, dann kommt es mit einer Wellenlänge von 0,0008 mm, also als rotes Licht, in B an! Das Licht erfährt also infolge der Expansion des Weltraums eine Rotverfärbung oder, wie der Physiker sagt, eine „Rotverschiebung“; und eine derartige Rotverschiebung, also eine Wellenlängenvergrößerung, liegt tatsächlich vor bei dem Licht, das von sehr fernen Sternsystemen, also nach langer Wanderung durch den expandierenden Weltraum, auf unsere Erde kommt.

Urknall-Strahlung

Gehen wir zurück in die Zeit kurz nach dem Beginn der Expansion, kurz nach dem „Urknall“, als die Materie des Alls noch höchst komprimiert war und entsprechend hohe Temperaturen herrschten. Bei derart hohen Temperaturen strahlen alle Atome intensivst elektromagnetische Wellen aus, die somit den ganzen Weltraum überall dicht erfüllen. Wenn dann der Weltraum sich ausdehnt und die Temperatur sinkt, hören die Atome auf, zu strahlen; aber die Strahlung, die vorher ausgesandt wurde, erfüllt nach wie vor den ganzen Weltraum. Infolge der Ausdehnung des Weltraums wird zwar die Wellenlänge dieser Strahlung, wie oben beschrieben, immer größer, aber eines bleibt: Die „Urknall-Strahlung“ ist diffus im ganzen Weltraum verteilt, sie erfüllt den Weltraum überall, und wenn ein Beobachter von der Erde aus in den Weltraum hinausschaut, dann dringt die Urknall-Strahlung von allen Teilen des Weltraums her in sein Auge, der Beobachter „sieht“ die Urknall-Strahlung überall am Himmel, ganz gleich, in welche Himmelsrichtung er seine Augen auch wenden mag – im deutlichen Unterschied zum Licht der Sterne und Sternsysteme, das stets nur aus einer bestimmten Himmelsrichtung in das Auge des Beobachters fällt.

Gibt es tatsächlich eine solche Strahlung, die von allen Himmelsrichtungen her in gleicher Weise auf unsere Erde gelangt? Es ist zu bedenken, daß die Urknall-

Strahlung infolge der Expansion des Weltraums eine gewaltige Wellenlängenvergrößerung erfahren hat; wenn man also etwas von ihr finden will, muß man nicht im Gebiet des sichtbaren Lichtes, sondern bei viel größeren Wellenlängen, etwa bei den Radiowellen, suchen. Und hier, bei einer Wellenlänge von 7,35 cm, hat man tatsächlich eine Strahlung entdeckt, die gleichmäßig aus allen Himmelsrichtungen zu kommen scheint³. Daß man auf eine Wellenlänge von gerade 7,35 cm kam, hat seinen Grund einfach darin, daß die komplizierte Empfangsapparatur auf diesen Wert fest eingestellt war. Die Physiker haben sich aber sofort ausgerechnet: Wenn es sich tatsächlich um die Urknall-Strahlung handelt, dann muß die Strahlung auch bei anderen Wellenlängen zu beobachten sein, und zwar muß die Intensität der Strahlung beim Übergang zu immer kürzeren Wellenlängen in gesetzmäßiger Weise zunehmen, bis die Intensität bei einer Wellenlänge von etwa 0,1 cm ein Maximum erreicht; bei noch kürzeren Wellenlängen nimmt dann die Intensität sehr stark ab. Man hat darum entsprechende Messungen vorgenommen mit einer Empfangsapparatur, die auf eine Wellenlänge von 3,2 cm eingestellt war, und man hat tatsächlich eine Strahlung festgestellt, die aus allen Himmelsrichtungen zu kommen scheint und die berechnete Intensität aufweist⁴. Vermittels indirekter Methoden konnte man es außerdem zumindest sehr wahrscheinlich machen, daß auch bei 0,26 cm eine Strahlung mit der erwarteten Intensität vorliegt⁵. Man wird natürlich noch weitere und genauere Messungen vornehmen müssen; wenn dann die Intensität der Strahlung bei den verschiedenen Wellenlängen tatsächlich jeweils so groß ist, wie die Rechnung verlangt, und wenn die Strahlung wirklich gleichmäßig aus allen Himmelsrichtungen kommt, könnte man kaum daran zweifeln, daß man es mit der Urknall-Strahlung zu tun hat. Wir dürften dann sagen, daß unsere Radioteleskope heute noch den Nachhall des Brodelns des Urbreies auffangen^{5a}.

„Weltalter“

Wieviel Zeit ist seit dem Urknall verstrichen? Die Geschichte dieser Frage ist eine Geschichte der Irrungen und Wirrungen.

Im Prinzip wäre die Antwort einfach, wie sich an unserem Modell des auf-

³ Penzias-Wilson in: *Astrophysical Journal* 142 (1965) 419. – Die Urknall-Strahlung ist ursprünglich eine „schwarze“ Strahlung von der Temperatur T_0 . Durch die Rotverschiebung wird daraus eine schwarze Strahlung von der Temperatur $T = T_0 \cdot R_0/R$ (R_0 = Radius des Weltraums zur Zeit der Emission der Urknall-Strahlung; R = heutiger Radius des Weltraums). Gemäß den Beobachtungen gilt ungefähr $T = 3^\circ \text{K}$.

⁴ Roll-Wilkinson in: *Physical Review Letters* 16 (1966) 405.

⁵ Field-Hitchcock in: *Physical Review Letters* 16 (1966) 817.

^{5a} Durch direkte Messung wurde inzwischen auch bei einer Wellenlänge von 20,7 cm eine Strahlung von der erwarteten Intensität festgestellt; vgl. Howell-Skakeshaft in: *Nature* 210 (1966) 1318. Eine Theorie, welche die beobachtete Strahlung nicht als Urknall-Strahlung deutet, sondern etwas gekünstelt auf heißen intergalaktischen Wasserstoff zurückführt, wurde von M. Kaufmann entwickelt; vgl. Peebles-Dicke und D. Layzer in: *Nature* 211 (1966) 574, 576. Die Theorie von Kaufmann ergibt für den Millimeterbereich eine erheblich geringere Strahlungsintensität als die Urknall-Strahlung; wenn die Hinweise von Field-Hitchcock (Anm. 5) zutreffen, wäre dadurch die Theorie von Kaufmann widerlegt.

geblasenen Luftballons ersehen läßt: Wenn zwei Farbtupfen auf dem Ballon gegenwärtig einen Abstand von 10 cm haben und wenn sie ihren Abstand in jeder Sekunde um 1 cm vergrößern, dann kann man schließen, daß das Aufblasen vor 10 Sekunden begonnen hat – vorausgesetzt, daß die Expansionsgeschwindigkeit immer gleich groß war.

Um diese Überlegung auf die Expansion des Weltraums anzuwenden, muß man den gegenwärtigen Abstand der Sternsysteme von der Erde kennen und die Geschwindigkeit, mit der sie ihren Abstand vergrößern. Die Geschwindigkeit der Abstandsvergrößerung kann man aus der Wellenlängenvergrößerung im Licht ferner Sternsysteme entnehmen; den gegenwärtigen Abstand muß man mit „konventionellen“ astronomischen Methoden bestimmen, und hier gab es viel Hin und Her. Bis 1955 hatte man nämlich den gegenwärtigen Abstand viel zu klein angesetzt; mit den damaligen Werten für die Abstände hätte sich ergeben, daß seit Beginn der Expansion erst 2 Milliarden Jahre vergangen wären, und das ist sicher falsch, da Erde und Sonne wenigstens 4 Milliarden Jahre alt sein müssen. Seit 1955 haben die Astronomen ihre Abstandsschätzungen mehrmals revidiert, so daß sich schließlich Werte ergaben, die auf 13 Milliarden Jahre seit dem Urknall führten. Das war aber wohl zuviel des Guten; denn auf Grund der neuesten Schätzungen gibt man heute eine Expansionsdauer von 10 Milliarden Jahren an⁶.

In dieser Zeitspanne von 10 Milliarden Jahren läßt sich also die Entwicklung von Erde und Sonne bequem unterbringen; aber inzwischen waren die Astronomen auf ein Sternsystem (NGC 188) aufmerksam geworden, dessen Struktur anscheinend auf ein Alter von 15 Milliarden Jahren hinwies. Genauere Untersuchungen ergaben jedoch, daß man auch hier mit 10 Milliarden Jahren auskommen kann, und so herrscht gegenwärtig Übereinstimmung zwischen den Werten, die sich aus den verschiedenen Methoden zur Bestimmung des „Weltalters“ ergeben⁷.

Sternentwicklung

Die Entwicklung eines Sternes stellt man sich heute im wesentlichen wie folgt vor: Zu Beginn der Expansion ist der ganze Weltraum erfüllt von einem heißen, dichten „Brei“ von Neutronen, welche beim Einsetzen der Expansion in Protonen und Elektronen zerfallen. Von den Protonen verbinden sich etwa 30 % miteinander zu Helium-Atomkernen; dieser Verschmelzungsprozeß kommt zum Stillstand,

⁶ Vgl. G. Rosen in: *Physics Letters* 17 (1965) 108.

⁷ Diese Übereinstimmung setzt allerdings voraus, daß man für den Weltraum eine negative (hyperbolische) Krümmung annimmt. Die Annahme einer positiven (sphärischen) Krümmung würde nämlich (wenn man die kosmologische Konstante gleich Null setzt) bedeuten, daß die Expansionsgeschwindigkeit früher erheblich größer war als heute und daß infolgedessen seit dem Beginn der Expansion höchstens 7 Milliarden Jahre vergangen sein könnten. Bei negativer Krümmung nimmt die Expansionsgeschwindigkeit zwar zu Beginn der Expansionsgeschwindigkeit ebenfalls ab, bleibt aber später praktisch konstant.

wenn infolge der Expansion die Temperatur entsprechend abgesunken ist. Durch die weitere Expansion wird das Wasserstoff-Helium-Gemisch zu einem extrem dünnen Gas, in dem sich zufallsbedingt kleinere oder größere Verdichtungen befinden. Diese Verdichtungen ziehen sich unter dem Einfluß ihrer eigenen Schwerkraft in sich selbst zusammen und ziehen zugleich benachbartes kosmisches Gas an sich, so daß sich allmählich größere Gaswolken zusammenballen. Eine solche Gaswolke stellt das „Embryonalstadium“ eines Sternes dar. Sie zieht sich infolge ihrer eigenen Schwerkraft weiter in sich zusammen und erhitzt sich dabei in ihrem Inneren so sehr, daß dort wieder die Verschmelzung von Wasserstoff-Atomkernen (Protonen) zu Deuterium (bei Temperaturen von einigen Millionen Grad) und Helium (bei Temperaturen von einigen Zehnmillionen Grad) anläuft. Am Ende dieser Phase ist der gesamte Wasserstoff im Sternzentrum zu Helium „verbrannt“. Das „Wasserstoffbrennen“ setzt sich dann in den äußeren Schichten des Sternes fort, während der Kern des Sternes sich wieder zusammenzieht und weiter erhitzt, bis dort bei einer Temperatur von über 100 Millionen Grad das „Heliumbrennen“ beginnt, bei dem Helium-Atomkerne zu Kohlenstoff und Sauerstoff verschmelzen. Es herrscht dann also im Kern des Sternes ein Heliumbrennen, in den äußeren Schichten ein Wasserstoffbrennen. Das Wasserstoffbrennen stirbt allmählich ab, wenn es Schichten erreicht, in denen die Temperatur nicht mehr hoch genug ist; das Heliumbrennen im Zentrum hört auf, wenn alles Helium verbrannt ist, und setzt sich, genauso wie vorher das Wasserstoffbrennen, in den äußeren Schichten fort.

Diese Auffassung, die man früher nur in gröberen Zügen durchrechnen konnte, ließ sich neuerdings vermittlels elektronischer Rechenmaschinen in detaillierten Einzelheiten verfolgen, wobei sich eine überraschend gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Erfahrung ergab⁸. Die Astronomen hatten beispielsweise schon seit langem beobachtet, daß es gewisse Sterntypen gibt (die sog. Delta-Cephei-Veränderlichen), deren Leuchtkraft periodisch zu- und abnimmt, was man nahe- liegenderweise als eine Pulsation des Sternes, d. h. als ein abwechselndes Aufblähen und Zusammenfallen, deutete. Man hatte ferner festgestellt, daß zwischen der Pulsationsdauer und der Masse des Sternes ein genauer gesetzmäßiger Zusammen- hang besteht, insofern, grob gesprochen, ein massereicherer Stern langsamer pul- siert. Die Theorie ergab nun, daß ein Stern dann zu pulsieren beginnt, wenn das Wasserstoffbrennen im Zentrum des Kernes beendet ist, und die Durchrechnung lieferte für den Zusammenhang zwischen Masse und Pulsationsdauer genau jene Form, welche man zuvor empirisch ermittelt hatte.

Bei unserer eigenen Sonne dürfte das Gaswolken-Stadium etwa 4,7 Milliarden Jahre zurückliegen; die Verdichtungsphase bis zum Anlaufen der ersten Atom- kernreaktionen dürfte etwa 80 Millionen Jahre betragen haben. Gegenwärtig ist der Wasserstoffvorrat im Zentrum der Sonne noch lange nicht erschöpft, so daß

⁸ Vgl. das Referat von R. Kippenhahn in: Physikertagung 1965 Frankfurt-Höchst, Plenarvorträge (Stuttg. 1965) 184.

die Sonne ihr Pulsationsstadium noch vor sich hat. Wenn das Pulsieren nach Milliarden von Jahren einsetzen wird, wird zumindest alles Leben auf der Erde rettungslos verbrannt werden; es tritt also ein „partieller Weltuntergang“ ein, der aber in kosmischer Perspektive etwas durchaus Normales darstellt, wie oben beschrieben. Man erkennt, wie der moderne Mensch hier erneut eine „kopernikanische Wende“ erlebt: Nicht nur in räumlicher Hinsicht ist die Erde aus dem Mittelpunkt des Universums hinausgerückt; auch in zeitlicher Hinsicht erscheint die Entwicklung des Lebens und des Menschen als eine durchaus vorübergehende Phase in der Geschichte des Universums.

Gravitationskollaps

Für die Entwicklung eines Sternes bis zum Ende des Heliumbrennens im Sternzentrum liegen zur Zeit genaue Berechnungen vor; durch weitere, verfeinerte Rechnungen hofft man, auch über die anschließenden Entwicklungsstadien Aufschluß zu erhalten. Man hat sich aber schon Gedanken darüber gemacht, welches Endstadium eintritt, wenn der Stern – auf irgendeine Weise – alle seine Atomenergie aufgebraucht hat. Dieses Endstadium wird auf jeden Fall darin bestehen, daß der Stern sich unter dem Einfluß seiner eigenen Schwerkraft immer mehr zusammenzieht, bis es nicht mehr weiter geht. Was soll dieses „bis es nicht mehr weiter geht“ im einzelnen bedeuten?

Eine Möglichkeit ist diese⁹: Die Schwerkraft des Sternes möchte seine Atome möglichst eng zusammenballen; dem steht aber die Elektronenhülle entgegen, welche den Atomkern umgibt und normalerweise einen Durchmesser von einigen Zehnmillionstel Millimeter hat, sich also normalerweise nicht enger zusammenpressen läßt. Im Endstadium der Zusammenziehung eines Sternes wird aber der Druck der Schwerkraft so stark, daß die Elektronenhülle „zerbricht“. Die Atome rücken also näher aneinander, als sie es bei intakter Elektronenhülle könnten; aber die „Trümmer“ der Elektronenhülle reichen noch aus, um eine völlige Verschmelzung der Atomkerne miteinander zu verhindern. Derartige Sterne sind den Astronomen als „weiße Zwerge“ bekannt.

Liegt jedoch die Masse des Sternes über dem 1,2-fachen Betrag der Sonnenmasse, dann können auch die Trümmer der Elektronenhülle dem Druck der Schwerkraft nicht mehr länger widerstehen. Der Stern hält sich zunächst noch eine Weile in einem immer labiler werdenden Zustand mit „normaler“ Größe; in einem bestimmten Augenblick kommt es dann zu einem schlagartigen Zusammenbruch, zu einem „Gravitationskollaps“, und am Ende dieses Zusammenbruchs steht ein Gebilde, das nur mehr einen Durchmesser von einigen zehn Kilometern aufweist und

⁹ Für das Folgende vgl. Zeldovich-Novikov in: Soviet Physics Uspekhi 7 (1964/65) 763; 8 (1965/66) 522.

in dem die Protonen durch ihre eigene Schwerkraft so eng zusammengepreßt sind, wie sie sonst nur in einem Atomkern gepackt sind. Dabei verschmelzen die noch vorhandenen Protonen größtenteils mit Elektronen zu Neutronen, so daß man von einem „Neutronenstern“ spricht. Bei dem Zusammenbruch werden ungeheuerere Energien frei, durch welche unter anderem die äußersten Schichten des Sterns als Gaswolke auf Nimmerwiedersehn in den Weltraum hinausgeblasen werden können. Die Astronomen überlegen, ob es sich bei den seit langem bekannten Supernova-Ausbrüchen vielleicht um derartige Sternzusammenbrüche handelt. Aus der ausgestoßenen Gaswolke können sich durch Verdichtung, Zusammenziehung usw. wiederum Sterne der „zweiten Generation“ bilden.

Gravitations-Selbstabschluß

Nochmals eine andere Wendung nimmt das Geschick des Sternes, wenn seine Masse größer ist als die doppelte Sonnenmasse; jedenfalls sagt die allgemeine Relativitätstheorie für diesen Fall ein interessantes Phänomen voraus. Nach der allgemeinen Relativitätstheorie werden alle Vorgänge und Prozeßabläufe in der Nähe schwerer Massen verlangsamt. Diese Verlangsamung hat man sogar auf der Erde feststellen können: Man hat die inneratomaren Schwingungsvorgänge von Atomen verglichen, die sich am Fuß bzw. in der Spitze eines 22 Meter hohen Turmes befanden, und die Schwingungen der Atome am Fuß des Turmes waren in genau dem Maß verlangsamt, wie es die allgemeine Relativitätstheorie behauptet. Auf der Erdoberfläche ist diese Verlangsamung natürlich minimal; aber wenn man sich die gesamte Masse der Sonne auf eine Kugel von 6 km Durchmesser zusammengedrängt denkt, dann wäre auf der Oberfläche dieser Kugel die relativitätstheoretische Verlangsamung „unendlich groß“, d. h. alle Vorgänge und Prozeßabläufe kämen überhaupt zum Stillstand; im Innern der Kugel würde das Naturgeschehen weiterlaufen, aber langsamer als „weit draußen“. Beträgt die Masse eines Sternes das Hundertfache der Sonnenmasse, dann tritt der „Stillstand“ auf der Sternoberfläche schon ein, wenn der Stern sich auf einen Durchmesser von 600 km zusammenzieht. Das sind aber jene Größenordnungen des Durchmessers, welche, wie oben angegeben, bei dem Gravitationskollaps erreicht werden; es erhebt sich also die Frage, wie der Gravitationskollaps bei Berücksichtigung der relativitätstheoretischen Zeitdehnung verläuft.

Betrachten wir einen Stern mit dem Tausendfachen der Sonnenmasse. Der Stillstand aller Prozesse auf seiner Oberfläche tritt dann ein, wenn der Stern sich auf einen Durchmesser von 6000 km zusammengezogen hat. In diesem Augenblick sind aber die Atome des Sternes noch lange nicht so dicht gepackt wie im Innern

eines Neutronensterns¹⁰; der Stern wird also noch weiter in sich zusammensacken. Wie stellt sich dieser Sachverhalt dar für einen Beobachter, der von „weit draußen“ zusieht, und wie für einen Beobachter, der sich auf der Sternoberfläche selbst befindet und mit ihr den Gravitationskollaps durchmacht?

Der Beobachter weit draußen wird feststellen, daß der Zusammenbruch des Sterns sich mehr und mehr verlangsamt in dem Maß, in dem der Sterndurchmesser sich dem kritischen Wert von 6000 km nähert. Dieser kritische Wert selbst wird innerhalb einer endlichen Zeitspanne niemals erreicht, oder anders ausgedrückt: Die Uhren des Beobachters weit draußen müssen unendlich viele Zeigerumläufe machen, ehe sich der Stern auf den kritischen Durchmesser von 6000 km zusammenzieht.

Anders dagegen die Uhren des Beobachters auf der Sternoberfläche. Der Gang dieser Uhren wird in demselben Maß verlangsamt wie alles andere Geschehen auf der Sternoberfläche, und da auch die physiologischen Prozesse im Körper des Beobachters und damit dessen „Zeitgefühl“ entsprechend verlangsamt werden, hat er keineswegs den Eindruck, daß sich das Zusammenbrechen des Sternes verlangsamt; er hat aber den Eindruck, daß die Uhren weit draußen immer schneller liefen. Der Beobachter auf der Sternoberfläche passiert also nach endlich vielen Zeigerumläufen seiner Uhr die kritische Zone des 6000 km-Durchmessers und sieht, wie sein Stern sich anschließend weiter zusammenzieht.

Wenn aber die Sternoberfläche einmal durch die kritische Zone hindurchgegangen ist, kann keine Nachricht mehr von dem Stern nach draußen oder von draußen zum Stern gelangen, nicht einmal ein Lichtsignal¹¹. Denn dieses Lichtsignal müßte die kritische Zone in 3000 km Abstand vom Sternmittelpunkt durchlaufen; in dieser kritischen Zone würde aber auch die Fortpflanzung des Lichtes unendlich verlangsamt, so daß auch das Licht nicht mehr vorwärts käme¹². Wenn also die Sternoberfläche einmal die kritische Zone in 3000 km Abstand vom Sternmittelpunkt durchschritten hat, dann ist der Stern für die übrige Welt und die übrige Welt für den Stern verschwunden. Man bezeichnet diesen Zustand als „Gravitations-Selbstabschluß“ des Sterns. Doch um es zu wiederholen: Die übrige Welt, d. h. der Beobachter weit draußen, wird das Verschwinden des Sternes erst nach unendlich langer Zeit beobachten; für den Beobachter auf der Sternoberfläche dagegen verschwindet die übrige Welt schon nach endlich vielen Zeigerumläufen seiner Uhr. Man sieht, wie relativ hier die Begriffe „endlich“ und „unendlich“ werden.

Hat die Astronomie Sterne gefunden, die sich auf dem Weg zu dem theoretisch

¹⁰ Die Dichte eines Sterns von der Masse M ist bei Erreichen des kritischen Durchmessers gegeben durch $2 \cdot 10^{16} \cdot (m/M)^2 \text{ g/cm}^3$, wobei m die Masse der Sonne bedeutet. Die Dichte im Zentrum eines Neutronensternes liegt bei 10^{14} g/cm^3 .

¹¹ Diese Auffassung ist allerdings nicht unbestritten; vgl. etwa W. Israel in: *Physical Review* 143 (1966) 1016.

¹² Dies gilt, wie oben erwähnt, nur dann, wenn sich die gesamte Masse des Sternes innerhalb der Kugel mit 3000 km Abstand vom Zentrum befindet. Diese Bedingung ist nicht erfüllt, solange die Sternoberfläche die kritische Zone noch nicht passiert hat, und so lange ist die Verlangsamung in der 3000 km-Zone nur endlich groß, so daß ein Licht- oder sonstiges Signal diese Zone in endlich langer Zeit durchqueren kann.

vorausgesagten Gravitations-Selbstabschluß befinden? Irgendeine Strahlung wäre von einem solchen Stern kaum mehr wahrnehmbar, aber der Einfluß der von ihm ausgehenden Schwerkraft müßte in den Bewegungen der Sterne in seiner Umgebung erkennbar sein. Doch bis jetzt hat die Astronomie noch keine empirischen Hinweise auf etwas Derartiges finden können.

Q u a s a r s

Dafür hat die Astronomie Objekte entdeckt, die sie bis jetzt in keine Theorie einordnen kann: die sog. „quasistellaren Radiostrahlungs-Quellen“ oder kurz „Quasars“, von denen gegenwärtig etwa 50 bekannt sind¹³. Die Quasars zeichnen sich durch eine äußerst große Rotverschiebung, also Wellenlängenvergrößerung, in ihrem sichtbaren Licht und in ihrer Radiostrahlung aus: Bei mehreren Quasars sind die Wellenlängen auf das Doppelte, in drei Fällen sogar auf das Dreifache vergrößert. Wenn man diese Wellenlängenvergrößerung auf die Expansion des Weltraums zurückführt, wie eingangs beschrieben wurde, dann würde das bedeuten, daß das Licht der zuletzt genannten Quasars zu einem Zeitpunkt ausgestrahlt wurde, als der Radius des Weltraums nur ein Drittel seines heutigen Werts besaß, also vor rund 6 Milliarden Jahren, und demgemäß wäre der Quasar wenigstens 6 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt. Man kann leicht ausrechnen, wie hell ein Objekt leuchten muß, das 6 Milliarden Lichtjahre entfernt ist und doch auf unserer Erde noch so hell erscheinen soll, wie es der Quasar tut. Man kommt zu dem Ergebnis, daß ein Quasar bis zu hundertmal mehr Energie ausstrahlen müßte als die größten bekannten Sternsysteme, und man hat daher überlegt, ob man nicht für die Wellenlängenvergrößerung in der Strahlung der Quasars eine andere Erklärung finden kann, die nicht zu abnormen Werten für die Entfernung der Quasars und damit für ihre Strahlungsintensität führt.

Man hat sich gefragt, ob ein Quasar vielleicht ein Stern sei, der sich, wie oben beschrieben, auf dem Weg zum Gravitations-selbstabschluß befindet; denn die Verlangsamung aller Vorgänge auf der Oberfläche eines solchen Sterns führt auch zu einer Wellenlängenvergrößerung des ausgesandten Lichts. Die konkrete Durchrechnung ergab jedoch: Wenn der fragliche Stern die Eigenschaften haben soll, die bei den Quasars beobachtet werden, dann kann die relativitätstheoretische Geschehensverlangsamung wohl höchstens zu einer Wellenlängenvergrößerung auf das 1,4-fache führen. Da bei den Quasars eine Wellenlängenvergrößerung auf das Doppelte und Dreifache beobachtet wird, scheint eine derartige Erklärung keine großen Erfolgsaussichten zu haben. Es werden zwar viele Versuche unternommen, die Quasars mit dem Gravitationskollaps in Zusammenhang zu bringen; aber es

¹³ Für das Folgende vgl. Hunter-Sabatino-Fletcher in: *Nature* 210 (1966) 346.

geht dabei nicht sosehr darum, die Rotverschiebung auf die relativitätstheoretische Geschehensverlangsamung zurückzuführen, sondern der Gravitationskollaps soll vor allem den ungeheueren Energiebedarf decken, der entsteht, wenn man die Rotverschiebung im wesentlichen auf die Ausdehnung des Weltraums zurückführt.

Man hat sich weiter gefragt, ob die Quasars vielleicht Objekte sind, die aus unserer eigenen Milchstraße stammen und bei einer „Explosion“ im Innern unserer Milchstraße nach allen Seiten „auseinandergeschossen“ wurden. Wenn bei dieser Explosion die schnellsten Quasars eine Geschwindigkeit von 250 000 km/sec erhalten hätten, dann würden sich jene Wellenlängenvergrößerungen ergeben, wie sie bei den Quasars beobachtet werden. Den Astronomen sind derartige „Explosionen“ von Milchstraßensystemen tatsächlich schon seit längerer Zeit bekannt, und man konnte auch die Energien abschätzen, die durch solche Explosionen freigesetzt werden. Man wird also annehmen, daß bei der Explosion, die zur Aussendung der Quasars führte, nicht wesentlich mehr Energie freigesetzt wurde als in den bekannten ähnlich gelagerten Fällen. Man kommt dann zu dem Ergebnis, daß seit jener Explosion nicht mehr als einige Zehnmillionen Jahre vergangen sein könnten¹⁴. Einer der langsamsten Quasars (3 C 273), der nach Ausweis der Wellenlängenvergrößerung in seiner Strahlung nur mit 15 % der Lichtgeschwindigkeit fliegt, könnte sich also in dieser Zeit höchstens um etwa 10 Millionen Lichtjahre entfernt haben. Nun hat man aber neuerdings deutliche Anzeichen dafür entdeckt, daß gerade dieser langsame Quasar sich (von uns aus gesehen) hinter einem astronomischen Objekt befindet, welches seinerseits mehr als 30 Millionen Lichtjahre von uns entfernt ist¹⁵. Der Quasar ist also viel weiter entfernt, als er nach der Explosionshypothese sein dürfte, und so leuchten die Quasars nach wie vor als unentzifferte Fragezeichen am Himmel.

¹⁴ Es sei t die Zeit, die man als seit der Explosion vergangen ansetzt; dann ist die kinetische Energie, die bei der Explosion den fortfliegenden Massen mitgegeben wird, proportional zur 3. Potenz von t . Denn zunächst ist der gegenwärtige Abstand eines Quasars proportional zu t ; infolgedessen ist seine absolute Helligkeit proportional zum Quadrat von t und die gesamte von dem Quasar bisher ausgestrahlte Energie proportional zur 3. Potenz von t . Wenn diese Energie durch Wasserstoffbrennen erzeugt wurde, ist die Masse des Quasars mindestens proportional zu t^3 , und damit ist auch seine kinetische Energie mindestens proportional zu t^3 . Aus diesem Umstand ergibt sich eine ziemlich scharfe obere Grenze für t bei einigen Zehnmillionen Jahren, wobei die durchschnittliche Masse eines Quasars etwa 1000 Sonnenmassen betragen würde.

¹⁵ 3 C 273 hat dieselbe Position am Himmel wie der Virgo-Cluster. Die Strahlung des Virgo-Cluster zeigt eine Rotverschiebung mit $z = 3 \cdot 10^{-3}$. Andererseits wird in der Radiostrahlung von 3 C 273 eine Absorption beobachtet, die allem Anschein nach der 21 cm-Linie des neutralen Wasserstoffs mit einer Rotverschiebung von $z = 3 \cdot 10^{-3}$ entspricht. Die nächstliegende Annahme ist also gewiß die, daß der Virgo-Cluster von einer Wasserstoff-Wolke umgeben ist, bei deren Durchlaufen die Radiostrahlung von 3 C 273 die beobachtete Absorption erfährt. Das bedeutet aber, daß 3 C 273 hinter dem Virgo-Cluster liegt, welcher 30 Millionen Lichtjahre entfernt ist.