



Rote Riesen, weiße Zwerge und schwarze Löcher

Von Kurt Bangert

Große astronomische Entdeckungen, die unser Weltbild beeinflussen, verdanken wir zu einem erheblichen Teil der phantastischen Einbildungskraft und den imaginären Gedankenspielen genialer Theoretiker wie Albert Einstein, Werner Heisenberg oder Stephen Hawking. Übertroffen wird dieser Phantasie-reichtum nur noch von der Wirklichkeit. Was Experimentalphysiker und Astronomen mit ihren Teilchenbeschleunigern, Spiegelteleskopen und Radioteleskopen entdeckt, fotografiert und ausgewertet haben, hat der Menschheit einen ungeheuren Reichtum an realen Phänomenen eröffnet, die sich kaum jemand hätte ausdenken können. Was gibt es nicht alles in unserem Universum: Gelbe, weiße, blaue, braune und schwarze Zwerge, Unterzwerge, rote und blaue Riesen, schwarze Löcher, Pulsare, Quasare und wie die Objekte alle benannt wurden. Und das sind nur einige wenige der aus großer Ferne beobachtbaren Phänomene. Was würden wir alles im Universum entdecken, könnten wir uns mit einem Fingerschnalzen an jeden beliebigen Ort unseres Alls versetzen. Wir kämen aus dem Staunen nicht heraus. In diesem Kapitel wollen wir uns nur auf die merkwürdigen Phänomene der roten Riesen, weißen Zwerge, Neutronensterne und schwarzen Löcher beschränken, weil sie uns einen weiteren kleinen Einblick geben in die physikalischen Kräfte, die unsere Welt zusammen halten – oder auch nicht.

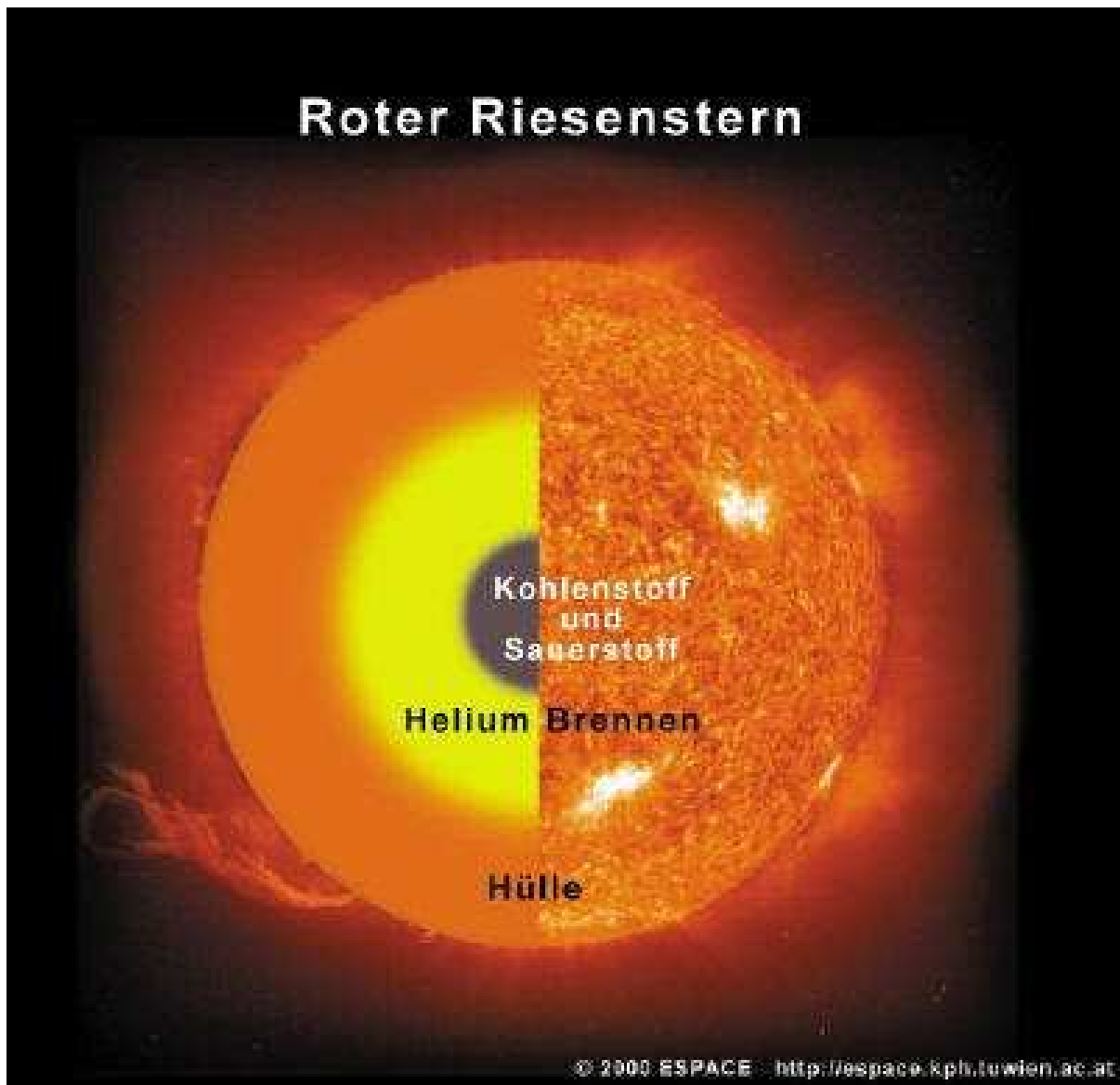
Rote Riesen

Physiker und Astronomen haben sich nicht nur gefragt, wie die physikalischen Kräfte im Innern der Sonne wirken, um ihr zur gegenwärtigen Leuchtkraft zu verhelfen, sondern sie haben sich auch gefragt, was passieren würde, wenn der Fusionsprozess des Wasserstoffbrennens im Innern der Sonne mangels Wasserstoff zum Erliegen kommt und wie sich das auf die Kräfteverhältnisse auswirken würde.

Hat unsere Sonne den Wasserstoff im Innern erst einmal verbraucht – das wird erst in rund fünf Milliarden Jahren sein – so verlangsamt sich das Wasserstoffbrennen allmählich, bis es nahezu zum Erliegen kommt. Helium ist kompakter als Wasserstoff, so dass sich der Kern kontrahiert und weiter verdichtet. Daraus folgt, dass die Sonne dem Gewicht seiner eigenen Masse wenig entgegenzusetzen hat und der Druck auf das Sonneninnere immer größer wird. Dadurch erhöht sich aber auch die Temperatur, die von heute 15 Millionen Grad auf dann rund 100 Millionen Grad ansteigt. Bei diesen Temperaturen setzt im Innern der Sonne das so genannte „Heliumbrennen“ ein, bei dem Heliumatome zu Kohlenstoff- und Sauerstoffatomen fusioniert oder „gebrannt“ werden.

Weil sich aber das Innere der Sonne durch den Druck weiter verdichtet und aufheizt, kommt es zu einer Ausdehnung der äußeren Sonnenschichten, so dass sich das Gas dieser Schichten verflüchtigt: Unsere Sonne bläht sich auf bis in die Nähe der Erdumlaufbahn. Sie wird zu einem Sternriesen. Es ist anzunehmen, dass uns Menschen diese Ausdehnung und

Aufheizung der Sonne nicht weiter kümmern wird, weil wir wahrscheinlich schon lange vorher einer weit undramatischeren Erderwärmung zum Opfer gefallen sein werden.



Weil die Temperatur der Außenschichten im Vergleich zur heutigen Sonne nur rund halb so heiß ist (rund 2.500 Grad), erscheint dieser Himmelskörper einem fernen Beobachter rötler als ein normaler Stern, dessen Licht wir eher als weiß bis gelb wahrnehmen. Deshalb sprechen wir hier von einem Roten Riesen. Obwohl er weniger heiß ist, hat ein Roter Riese eine größere Leuchtkraft, da seine Oberfläche sehr viel größer ist.

Ein berühmtes Beispiel für einen Roten Riesen ist der Stern Beteigeuze, den wir auffallend oben links im Sternbild Orion erkennen können. Er ist rund 430 Lichtjahre entfernt, hat etwa 20 Sonnenmassen, und sein Durchmesser umfasst rund 270 Sonnendurchmesser. Seine Leuchtkraft ist 10.000 Mal so hoch wie diejenige der Sonne, wie gesagt aufgrund seiner schieren Größe. Beteigeuze ist offenbar der einzige Stern, der mit derzeitiger Teleskoptechnik nicht nur als Lichtpunkt, sondern als Fläche sichtbar ist. Noch



größer als Beilegeuze ist allerdings Antares im Sternbild Skorpion, ebenfalls ein Roter Riese, der aber noch rund 100 Lichtjahre weiter entfernt ist.¹

Aufgrund ihrer enormen Vergrößerung wird unsere Sonne, wenn sie sich zum Roten Riesen aufgebläht haben wird, in ihren äußeren Bereichen nicht mehr der enormen Schwerkraft unterliegen, die ja mit dem Quadrat der Entfernung vom Schwerkraftzentrum abnimmt. Dadurch kommt es allmählich zu einem Abströmen der äußeren (noch wasserstoffreichen) Hülle, die sich als „planetarischer Nebel“ verflüchtigt, was allerdings überhaupt nichts mit Planeten zu tun hat, außer dass sich aus diesem Nebel neue Planeten bilden könnten. Das bekannteste Beispiel eines solchen Nebels ist der Ringnebel M57 im Sternbild Leier, den viele Hobbyastronomen sogar mit ihren hauseigenen Teleskopen gerne ins Visier nehmen.

Weißer Zwerge

Im Kern jedoch laufen noch die Verschmelzungsprozesse ab, bis auch das Helium größtenteils aufgebraucht ist. Dann werden Kohlenstoff und Sauerstoff in noch größere Elemente umgewandelt, bis hin zum Eisen sogar, bei dem dann Schluss ist. Dabei wird immer noch Energie frei, aber längst nicht mehr so viel wie beim Wasserstoffbrennen. Wollte man noch schwerere Atomkerne als Eisen hervorzaubern, so müsste man Energie zuführen. Wenn aber die möglichen Fusionsprozesse zum Erliegen kommen, wenn verschmolzen ist, was verschmolzen werden kann, und wenn die Elektronen durch Fusions- und Abstrahlungsprozesse größtenteils aufgebraucht sind, dann schrumpft das, was vom Roten Riesen noch übrig geblieben ist, allmählich auf eine Größe, die im Vergleich zur Masse sehr klein ist, weil das Sterninnere der Schwerkraft nur noch wenig entgegenzusetzen vermag. Die Elektronenschalen sind zermalmt, die Elektronen hinweggefegt oder entartet, die Gravitation kann sich weiter entfalten: Es entsteht ein Weißer Zwerg, bei dem nur noch der hohe Druck des entarteten Elektronengases einen weiteren Kollaps verhindert.

1930 verließ ein ambitionierter indischer Physiker mit dem wohlklingenden Namen Subrahmanyan Chandrasekhar im jugendlichen Alter von 20 Jahren sein Heimatland, um im Westen sein Glück zu versuchen. Er schiffte sich in Madras nach Southampton ein, um an der Universität Cambridge sein Physikstudium fortzusetzen. Das Jahr 1930 sollte sein Schicksalsjahr werden. Denn nicht nur erhielt in diesem Jahr sein Onkel, C.V. Raman, den Nobelpreis für Physik für einen nach ihm benannten Lichteffect, sondern auch der junge Neffe entdeckte noch auf der Schiffsreise nach England einen Effect, für den er – allerdings erst 53 Jahre später – ebenfalls den Nobelpreis erhalten sollte.

Hintergrund war die Entdeckung eines merkwürdigen Objektes in der Nähe des hellsten Sterns am Nachthimmel, dem Sirius im Sternbild des Großen Hundes. Als man um 1840 begann, die Eigenbewegungen einiger naher Sterne zu berechnen, stellte man bei Sirius einen sehr bizarren Verlauf fest. Nur bei uns nahe gelegenen Sternen kann man aufgrund der Rotation der Erde um die Sonne innerhalb eines Jahres eine elliptische Bewegung dieser Sterne gegenüber dem weit entfernten Sternhimmel feststellen. Diese elliptischen Bewegungen werden mit zunehmender Entfernung der Sterne immer kleiner, bis sie nicht mehr wahrnehmbar sind. Aus diesen Eigenbewegungen naher Sterne lassen sich auch ihre

¹ Für einen Größenvergleich der unterschiedlichen Himmelskörper siehe: <http://www.rense.com/general72/size.htm>

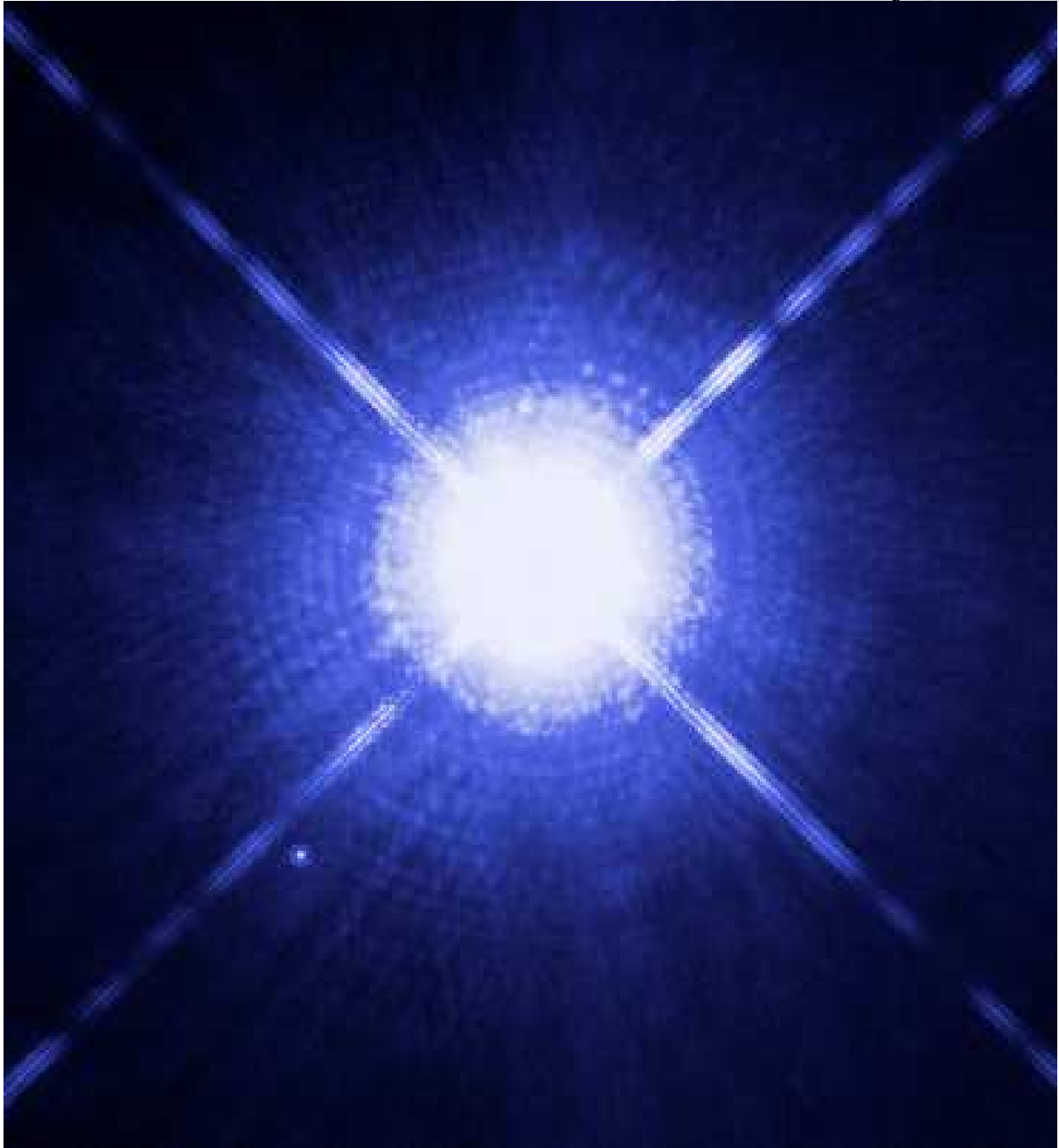


Entfernungen von der Erde berechnen.² Da Sirius mit nur 8,6 Lichtjahren einer der uns am nächsten gelegenen Sterne ist, ließ sich diese Eigenbewegung gut nachvollziehen. Nur: elliptisch war sie nicht. Vielmehr eierte die Bahn des Sirius so komisch, dass man dafür eine Erklärung suchte. Man schlussfolgerte, dass Sirius einen mächtigen, aber dunklen Begleiter haben müsse, so dass sich diese beiden um ein gemeinsames Gravitationszentrum bewegten. Der Begleiter war zu mächtig, um als Planet gedeutet zu werden. Aber er war dunkel. Das war er aber nur solange, bis der amerikanische Fernrohrbauer Alvan Graham Clerk im Jahr 1862 seine neueste, von ihm sauber geschliffene Teleskop-Linse noch einem letzten Gütetest unterziehen wollte und das Gerät auf den Stern Sirius richtete. Er bekam einen gehörigen Schrecken: Nahe Sirius gab es einen Lichtreflex, von dem er zunächst befürchtete, dass er von einer Unreinheit der Linse herrühre. Weitere Test ergaben jedoch, dass die Linse einwandfrei funktionierte. Clerk war erleichtert. Auch entdeckte er bald darauf, dass der schwache Lichtpunkt genau an der Stelle aufgetaucht war, wo man den dunklen Begleiter von Sirius vermutete. Er hatte zwar nur einen winzigen Bruchteil der Helligkeit seines größeren Bruders, aber die Eigenbewegungen der beiden deuteten darauf hin, dass sie nahezu gleich schwer waren. Damals konnte man sich dieses merkwürdige Phänomen noch nicht erklären: ein massereicher Stern, der gleichwohl nur schwach leuchtete.

Erst in den Zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts konnte man aufgrund weiterer Berechnungen und genauerer Untersuchungen und in Kenntnis der atomaren Vorgänge eine Erklärung für die beiden ungleichen Brüder anbieten, die man fortan Sirius A und Sirius B nannte. Man fand heraus, dass Sirius A etwa anderthalb Sonnenmassen haben musste, während Sirius B immerhin noch eine knappe Sonnemasse enthielt. Die Entfernung zwischen den beiden Nachbarn betrug nur rund 4 Milliarden Kilometer – etwa die Entfernung von der Sonne bis zum Planeten Neptun. Aber während Neptun 165 Jahre benötigt, um unsere Sonne zu umkreisen, rotieren die beiden Sirius-Brüder einander in nur 50 Jahren. Während Sirius A eine Oberflächentemperatur von 10.000 Grad hat, ist Sirius B mit rund 25.000 Grad an seiner Oberfläche mehr als doppelt so heiß. Doch die Sensation war der Größenunterschied: War Sirius A etwas größer als unsere Sonne, so war Sirius B kleiner als der Planet Neptun und nur wenig größer als die Erde. Sirius B war ein Weißer Zwerg! Der kümmerliche Überrest einer ausgebrannten Sonne, ein Schicksal, das dem größeren Bruder noch bevorsteht.

Der junge Chandrasekhar hatte auf seinem Schiff nach Europa nun offenbar nichts Interessanteres zu tun, als sich mit dem möglichen Lebensende eines Sterns zu befassen. Er wusste: Weil man den Druck im Innern eines Sterns ja nicht messen kann, muss man ihn zu berechnen versuchen. Man ermittelt die physikalischen Prinzipien, denen ein Stern unterliegt, wandelt jedes davon in eine Gleichung um und löst dann diese Gleichungen. Auf diese Weise erhält man Informationen über seine Größe, Helligkeit, Druck, Dichte, Temperatur sowie über das Ausmaß der Kernreaktionen im Innern des Sterns. Anhand solcher Berechnungen hatte man bis 1930 sehr viel über die Vorgänge im Innern der Sterne gelernt.

² Bei weiter entfernten Sternen, bei denen man keine elliptische Eigenbewegung mehr erkennen kann, lässt sich deren Entfernung von der Erde nur durch die zum roten Ende hin verschobenen Fraunhoferlinien des Lichtspektrums errechnen: Man spricht hier von der Rotverschiebung.



Aufnahme von Sirius A und Sirius B vom Hubble Space Teleskop

Chandrasekhar kannte diese Berechnungsmethoden, zumal er die entsprechenden Bücher, unter anderem des berühmten britischen Astrophysikers Arthur Stanley Eddington (1882-1944), gelesen hatte. Und da er sich schon als Teenager mit der damals noch sehr jungen Quantenmechanik befasst hatte, nahm er sich auf dem Schiff vor, mittels Relativitätstheorie und Quantenmechanik das theoretische Endstadium eines Weißen Zwerges zu berechnen. Er fand heraus, dass es eine Obergrenze der Masse geben musste, bis zu der eine ausgebrannte Sonne zum Weißen Zwerg werden würde. Oberhalb dieser Grenze würden die Elementarteilchen so sehr beschleunigt werden, dass sie nahezu Lichtgeschwindigkeit erreichten, so dass es aufgrund der Einsteinschen Relativitätstheorie zu einer „relativistischen Entartung“ käme, so dass es statt zur Bildung eines Weißen Zwerges zu einem Gravitationskollaps kommen müsste. Die von Chandrasekhar errechnete



Obergrenze des Weißen Zwerges lag bei 1,4 Sonnenmassen. Und dieses Limit ist heute als Chandrasekhar-Grenze bekannt. In der Tat weiß man heute, dass es nur Weiße Zwerge gibt mit einer Masse von 1,4 Sonnenmassen oder darunter.

Doch die großen Wissenschaftler seiner Zeit wussten das damals noch nicht und waren skeptisch. Der schon erwähnte Arthur Stanley Eddington, der Weltruhm erlangt hatte, als er Einsteins Relativitätstheorie bei einer Sonnenfinsternis nachwies, hegte erhebliche Zweifel an Chandrasekhars Berechnungen, setzte den jungen Forscher sogar öffentlich der Lächerlichkeit preis und bekämpfte dessen Theorie bis zu seinem Tod, weil sie seinen eigenen Vorstellungen widersprachen. Auch andere Forscher bezweifelten die Schlussfolgerungen des Inders. Der russische Physiker Landau beispielsweise stellte nur zwei Jahre nach Chandrasekhar ähnliche Berechnungen an, vermochte aber die Konsequenzen nicht zu konfrontieren und forderte neue theoretische Ansätze. Doch der junge Inder ließ sich nicht beirren – und sollte Recht behalten. Die Wirklichkeit war auf seiner Seite. Und 1983 erhielt er für seine Arbeit mit 73 Jahren noch den Nobelpreis.

Bleibt noch nachzutragen, dass der Zustand des Weißen Zwerges noch nicht der allerletzte Zustand unserer Sonne oder eines vergleichbaren Sterns ist. Obwohl er seine Größe nicht mehr verändert, verliert der Weiße Zwerg im Laufe der Zeit an Temperatur, bis er schließlich völlig ausbrennt und als Schwarzer Zwerg ungesehen und unbeobachtet irgendwo im All seine Kreise zieht.

Neutronenstern

Man hat sich gefragt, warum die damals bekannten Astronomen und Astrophysiker die Berechnungen von Chandrasekhar ignorierten und sogar bekämpften. War es, dass sie den schüchternen Inder nicht ernst nahmen? Oder, dass sie sich von dem jungen Doktoranden gar bedroht und in ihrer Ehre herausgefordert fühlten? Vielleicht spielte das alles auch eine Rolle. Ich glaube jedoch, dass es noch etwas anderes war. Die ultimativen Konsequenzen dessen, was Chandrasekhar postuliert hatte, waren so unglaublich, so unvorstellbar, so abartig, so jenseits des gesunden Menschenverstandes und unserer herkömmlichen Weltbilder, dass diese Forscher es schlichtweg nicht glauben konnten. Eddington beispielsweise kommentierte, dass ein weißer Zwerg, der mehr als 1,4 Sonnenmassen hätte, „anscheinend so lange Strahlung aussenden und sich zusammenziehen“ müsse, „bis er, wie ich annehme, nur noch einen Radius von wenigen Kilometern hat“. Genau dies hielt er jedoch für völlig absurd. Uns so suchte er einen Ausweg: „Ich denke, dass es ein Naturgesetz geben müsste, das den Stern daran hindert, sich derart absurd zu verhalten.“³

Uns so konnte sich kaum jemand vorstellen, dass es so etwas wie einen von der Schwerkraft verursachten Kollaps unterhalb der Größe eines Weißen Zwerges tatsächlich geben könnte. Mit der Entdeckung von Weißen Zwergen, in denen, wie wir gesehen haben, eine ganze Sonnemasse in ein Volumen kaum größer als die Erde gepackt wurde, war man bereits an die Grenze des damals Denkbaren gestoßen. Doch ist die weitere Geschichte ein anschaulicher Beleg dafür, dass die krasse Wirklichkeit – wie übrigens auch die unbestechliche Mathematik – in der Lage ist, unseren gesunden Menschenverstand, ja sogar unsere kühnste Einbildungskraft ad absurdum zu führen.

Und so ging die Geschichte weiter. Zwei Jahre nach Chandrasekhars Berechnungne entdeckte man das Neutron, jenes Atomteilchen, das – anders als Elektronen oder Protonen –

³ Zitiert nach: George Greenstein, *Der gefrorene Stern*, ECON, 1985, S. 260.



weder eine positive noch eine negative Ladung aufwies. Seit man von diesem Teilchen wusste, geisterte alsbald die Idee einer „Neutronenmaterie“, also dicht gedrängter Materie, und sogar eines „Neutronensterns“ durch die Astrophysik.

Weitere zwei Jahre später, also 1934, veröffentlichten die Astronomen Walter Baade und Fritz Zwicky einen Artikel, bei dem sie sich mit einer überaus kühnen These an die Öffentlichkeit wagten: „Mit allem Vorbehalt bringen wir die Ansicht vor, dass Supernovae den Übergang von gewöhnlichen Sternen zu Neutronensternen verkörpern, die in ihrem Endstadium aus extrem eng zusammengepackten Neutronen bestehen.“⁴ Damit zeichneten sie intuitiv die kommende Entwicklung vor. Doch die Einleitung dieses Satzes zeigt, dass die beiden Astronomen sich ihrer Sache keineswegs sicher waren. Auch verfolgten sie diese Idee nicht weiter. Und niemand beachtete damals diesen Artikel und die darin geäußerte These.

Der Astrophysiker J. Robert Oppenheimer (1904-1967), der für seine hervorragenden Kenntnisse der Kernphysik, der Quantenphysik und der Vorgänge im Innern der Sonne bekannt war, berechnete zusammen mit seinem Studenten George M. Volkoff das theoretische Modell eines Neutronensterns. Doch dann ereilte ihn das Schicksal in Form eines Anrufs aus dem Pentagon, weil man ihn in Los Alamos, Neu Mexiko, zur Entwicklung einer Geheimwaffe gegen Hitler haben wollte. Oppenheimer wurde zum „Vater der Atombombe“, setzte sich später jedoch gegen ihre Verwendung ein. Das Thema Neutronenstern war jedenfalls vom Tisch. Es schlummerte noch drei Jahrzehnte vor sich hin. Und auch Chandrasekhar widmete sich anderen Themen, nachdem er über seine Berechnungen immerhin noch ein Buch veröffentlicht hatte.

Die Wende kam Ende der Sechziger Jahre, als alle Welt gebannt die ersten NASA-Flüge zum Mond und (1969) auch die erste Mondlandung verfolgten. 1967 hatte der britische Astronom Antony Hewish in Cambridge ein neuartiges und hochempfindliches Radioteleskop in Betrieb genommen, um Radiosignale von Quasaren im nicht sichtbaren Bereich näher zu studieren. Bei der Analyse der aufgezeichneten Signale aus dem All half ihm seine Studentin Jocelyn Bell, die sich anfangs nicht träumen ließ, dass sie durch ihre Arbeit große Berühmtheit erlangen sollte. Sie entdeckte jedenfalls den ersten „Pulsar“, ein Objekt, das sehr schnelle Radiosignale wie Lichtblitze aussandte, die man sich damals nicht erklären konnte.

Hewish und Bell überlegten geraume Zeit, woher diese Signale stammen könnten. Kamen sie von kleinen grünen Männchen im All oder gar nur von irgendwelchen experimentierfreudigen Menschen auf der Erde? Oder von einem neuartigen Stern oder Doppelsternsystem? Kamen sie von einem Stern, so ließen sich die Radioimpulse eigentlich nur mit der Eigenrotation dieses Sterns erklären. Aber dafür kamen sie zu schnell. Heute wird der damals entdeckte Pulsar scherzhaft „Little Green Man“ genannt. Weil sie sich keinen rechten Reim auf ihn machen konnten, schickten sie einen Artikel mit dem Titel „Beobachtungen einer sehr schnell pulsierenden Radioquelle“ zur renommierten Wissenschaftszeitschrift „Nature“, in der er überraschenderweise sogleich als Titelgeschichte erschien. Die Titelseite lautete: *Possible Neutron Star*. Dieser Titel regte die Phantasie vieler Forscher rund um die Welt an. Der Himmel wurde auf der Suche nach weiteren Pulsaren abgegrast, Untersuchungen, Analysen und Berechnungen wurden angestellt. Drei weitere Pulsare wurden entdeckt. Es verdichtete sich die Meinung, dass nur zwei Arten von Objekten als Erklärung in Frage kamen: Weiße Zwerge oder Neutronensterne.

⁴ Greenstein, S. 23.

KraftBurger

Innerhalb weniger Monate überschlugen sich die Ereignisse. Im Oktober 1968 entdeckte man einen weiteren Pulsar, der sich im Sternbild Vela (oder Segel) befand. Das Sensationelle an ihm war, dass seine Signale zehnmal so schnell wie die anderen vier waren. Wenn seine Impulse etwas mit seiner Rotationsgeschwindigkeit zu tun hatten, dann war er so unvorstellbar schnell, dass Weiße Zwerge als Erklärung sehr unwahrscheinlich wurden.



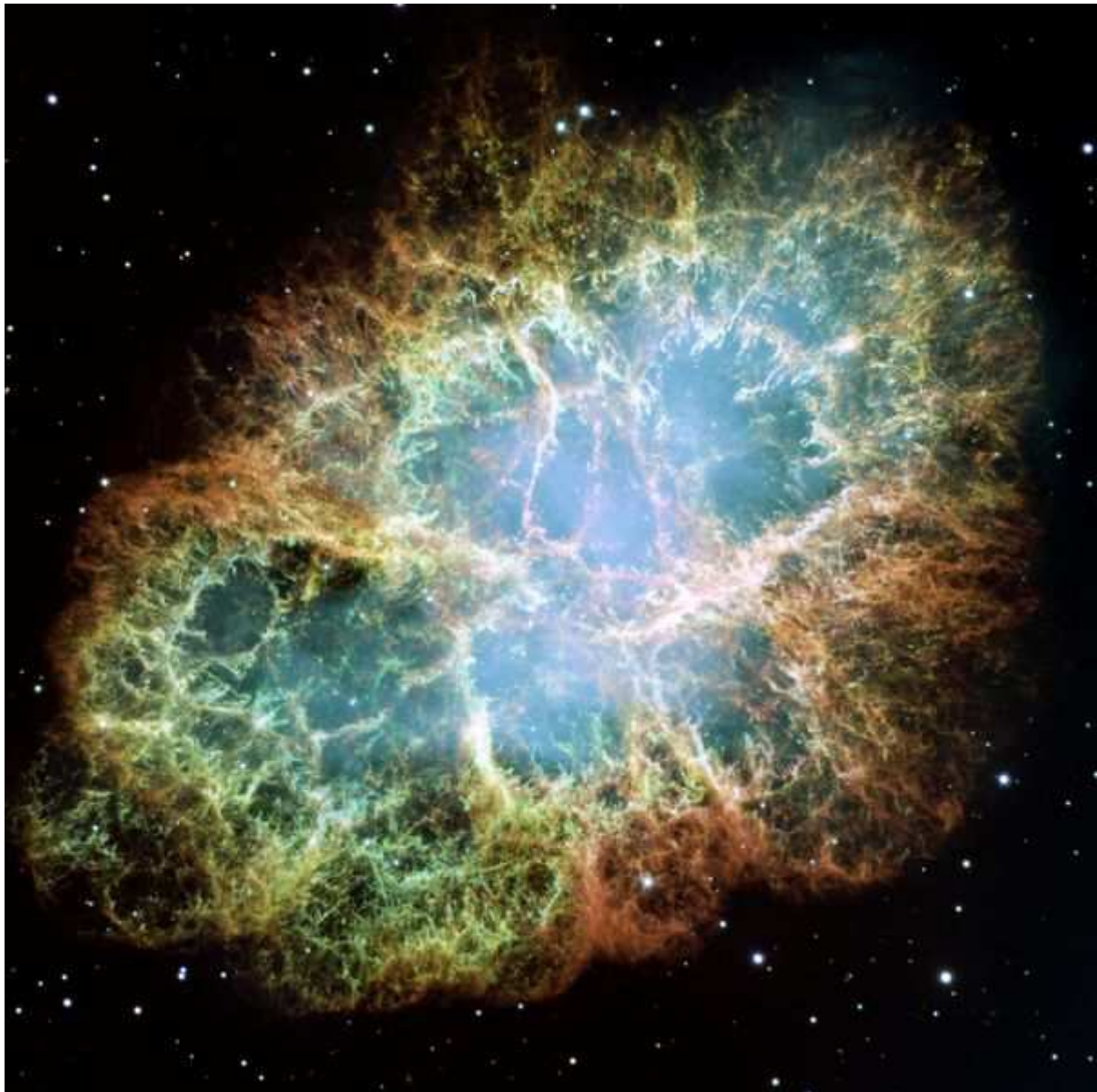
Die Supernova 1994D (unten links) in der Galaxie NGC4526.

Aber noch bedeutsamer als seine superschnelle Rotation war die Tatsache, dass er sich in den Überresten einer Supernova befand. Merkwürdig war allerdings, dass es um die ersten vier Pulsare offenbar keinen Überrest einer Supernova gab. Wie ging das zusammen? Hatten sich die Überreste der ersten vier Pulsare vielleicht aufgrund ihrer hohen Ausdehnungsgeschwindigkeit bereits in den Weltraum verflüchtigt? Konnte es nicht sein, dass es sich bei allen Pulsaren um die Reste von gewaltigen Sternexplosionen handelte, deren äußere Hülle abgestoßen wurde und deren innerer Rest kollabiert war?

Kraft

Im November kam der nächste Paukenschlag. Man entdeckte, dass sich inmitten des berühmten Krebsnebel (engl. *Crab Nebula*) ebenfalls ein Pulsar befand. Und der war noch schneller als der Vela-Pulsar: Er sandte pro Sekunde 30 Impulse aus. 30 Umdrehungen eines Sterns pro Sekunde? Die Idee mit den Weißen Zwergen als Erklärung musste wohl endgültig begraben werden.

Kurz darauf wurde die dritte Sensation bekannt. Die Forscher, die den Pulsar im Krebsnebel ausfindig gemacht hatten, stellten nach nur einem Monat fest, dass sich die Geschwindigkeit dieses Pulsars merklich verlangsamt hatte, nicht viel zwar, aber nachweislich verlangsamt. Damit konnte das Bild abgerundet werden:



Der Krebsnebel: Ergebnis der Supernova des Jahres 1054 n.Chr. Im Innern befindet sich ein Pulsar/Neutronenstern. Aufnahme durch Hubble.

Es handelte sich bei den Pulsaren offenbar um das Ergebnis von Supernova-Explosionen. Supernovas sind rund 100milliardenmal heller als die Sonne, weil sie innerhalb kürzester Zeit eine Unmenge an Energie verschleudern. Sie überstrahlen ganze Galaxien. Supernovas

Kraft

können vorkommen, wenn die Sternmasse die Chandrasekhar-Grenze von 1,4 Sonnenmassen übersteigt und der Stern infolge der enormen Hitze in seinem Innern plötzlich sein Gleichgewicht verliert und zerrissen wird, wobei der größte Teil des Himmelskörpers durch einen Rückstoßeffect nach außen geschleudert wird, während der innere Teil des explodierten Sterns mit hohem Druck und großer Schnelligkeit zum Sternzentrum hin implodiert, so dass die Atomkerne der Massenschwerkraft und der kinetischen (Beschleunigungs-)Energie fast nichts mehr entgegenzusetzen hat, so dass ein Neutronenstern entsteht.

Die Geschwindigkeit, mit der die abgestoßene Materie nach außen geschleudert wird, beträgt bei allen Supernova-Nebeln unvorstellbare 10.000 km pro Sekunde, so dass erklärbar wird, warum nach wenigen Jahrtausenden von diesen Nebeln nichts mehr zu sehen ist. Es bleibt dann nur noch das Zentralgestirn übrig, das von einer unglaublichen Dichte und Rotationsgeschwindigkeit gekennzeichnet ist.



Zentrum des Krebsnebels: Überlagerung von Aufnahmen in den Bereichen des sichtbaren Lichts (rot, Hubble-Teleskop) und der Röntgenstrahlen (blau, [Chandra](#)-Satellit). Man erkennt den eingebetteten Neutronenstern.



Supernovas kommen äußerst selten vor, und seit mehreren Jahrhunderten hat es in unserer Milchstraße keine Supernova mehr gegeben. Die letzte uns bekannte Supernova, die in unserer Heimat-Galaxie stattfand, war die von Johannes Kepler beobachtete Supernova 1604, benannt nach dem Jahr, in dem sie auftrat.

Als man Anfang des 20. Jahrhunderts den Krebsnebel erstmals fotografierte und feststellte, dass er eine bestimmte Ausdehnungsgeschwindigkeit hatte, rechnete man zurück zum Anfang seiner Ausdehnung und kam auf etwa 900 Jahre. Man fand heraus, dass chinesische Astronomen der Sung-Dynastie Aufzeichnungen von einem „Gaststern“ gemacht hatten, der „wie die Venus am helllichten Tag sichtbar“ war. Zeitpunkt seines Auftauchens war „der Tag *Chi-Ch'ou* des fünften Mondes in der Periode *Chih-ho*“, und das war nach heutiger Zeitrechnung der 4. Juli 1054 n.Chr. Dieses Datum entsprach dem Anfang des Krebsnebels. Auch die Richtungsangabe der Chinesen stimmte mit der Position dieses Nebels überein. Nach den chinesischen Aufzeichnungen nahm die Helligkeit dieses Gaststerns relativ rasch ab, und in weniger als zwei Jahren war er auch nachts nicht mehr zu sehen.⁵

Man geht davon aus, dass nur Sterne mit einer Masse von über acht Sonnenmassen zu einer Supernova fähig sind. Bei dem Zentralstern des Krebsnebels geht man von einer ursprünglichen Masse von 8-12 Sonnen aus. Bei der Abstrahlung seines größten Masseanteils kollabiert der unter seiner Schwerkraft implodierende Rest des Sterns zu einem Neutronenstern, bei dem den Elektronen kein Ausweg mehr gelassen wird und sie mit großer Wucht in die Atomkerne hineingepresst werden, wo sie sich mit den Protonen zu Neutronen verbinden (daher der Name des Sterns). Bei diesem Vorgang hat die elektromagnetische Kraft der Schwerkraft nichts mehr entgegenzusetzen und muss kapitulieren. Nur die Neutronen können noch ihre letzte Kraft aufbringen und den totalen, absoluten Kollaps verhindern. Der Neutronenstern ist jetzt wie ein einziger, großer Atomkern. Obwohl die darin befindlichen Elementarteilchen ihre Kraft nur auf engstem Raum entfalten, verfügen sie doch über die stärkste aller physikalischen Kräfte und sind in der Lage, den Neutronenstern zu stabilisieren.

Aber zu welchem Preis und zu welchen Konditionen? Ein Neutronenstern, der etwa eine Sonnenmasse enthält, ist kaum größer als ein Asteroid. Sein ganzer Durchmesser beträgt nicht mehr als die Entfernung vom Berliner Flughafen Tegel bis zum Flughafen Tempelhof. Aufgrund der enormen Schwerkraft ist ein Neutronenstern ein völlig glattes Gebilde, es lässt keine Unebenheit zu. Seine Dichte beträgt 100 Milliarden kg pro Kubikzentimeter, das ist das 100-Billionenfache der Wasserdichte. Ein Stück dieser Neutronenmasse von der Größe eines Zuckerwürfels würde 100 Millionen Tonnen wiegen. Seine Oberflächenschwerkraft ist 200 Milliarden Mal größer als die der Erde. Und entsprechend schnell müsste eine Rakete sein, wollte sie diesem Schwerfeld entrinnen, was freilich in der Praxis nicht möglich wäre, da die Entweichgeschwindigkeit unglaubliche 100.000 km pro Sekunde beträgt, also etwa ein Drittel der Lichtgeschwindigkeit (Im Vergleich: die Entweichgeschwindigkeit der Erde beträgt 11,2 km pro Sekunde und die der Sonne 617 km pro Sekunde).

Ein Neutronenstern hat in der Regel zwei Achsen: eine Rotationsachse, um die sich der Stern dreht, und eine Magnetachse, um die sich ein starkes Magnetfeld bildet. Durch die Neigung der Magnetachse gegenüber der Rotationsachse entsteht eine elektromagnetische Welle, die wir als Funksignale empfangen, obwohl der Stern auch Röntgenstrahlen,

⁵ Quelle: Greenstein, S. 20.



Gammastrahlen und sogar für uns sichtbare Wellen aussendet, doch da der Neutronenstern so winzig ist, hat er keine große Abstrahlfläche für das sichtbare Licht, so dass wir ihn weniger mit unseren Teleskopen als mit unseren Radioteleskopen „sehen“ können. Die Energie, die bei einem Neutronenstern frei wird, entspricht dem 100.000fachen der von der Sonne abgestrahlten Energie.

Die Kombination von Schwerkraft und kinetischer Bewegungsenergie beim Kollaps des Sterns hat zur Folge, dass er sich fortan pro Sekunde mehrfach um die eigene Rotationsachse dreht. Der Zentralstern des Krebsnebels weist beispielsweise 33 Umdrehungen pro Sekunde auf. Im Kugelsternhaufen Terzan 5 im Sternbild Schütze haben Astronomen jüngst den bislang schnellsten Neutronenstern entdeckt. Er dreht sich mehr als 700 Mal in der Sekunde um die eigene Achse und macht damit mehr Umdrehungen als jedes moderne Küchenmixgerät.

Astrophysiker haben versucht, aufgrund von Beobachtungen dank ihrer Kenntnis vom Verhalten der Elementarteilchen die innere Struktur von Neutronensternen zu berechnen. Sie haben begründeten Anlass zu vermuten, dass die Dichte zum Kern hin allmählich zunimmt. An der Oberfläche verformt sich die Materie zu faserigen, haarigen Molekülen und Atomen, nach innen hin verlieren die Atome ihre Struktur, so dass es eine strukturlose Masse aus Atomkernen und Elektronen gibt. Gelangt man weiter nach innen, schiebt die Schwerkraft die Elektronen in die Atomkerne hinein, so dass Elektronen und Protonen miteinander reagieren und auf diese Weise Neutronen produzieren, die – eng zusammengequetscht – eine Neutronenmaterie oder Neutronium ergeben. Geht man noch weiter nach innen und wird der Druck noch größer, so quellen die Neutronen aus ihren Kernen heraus, so dass sie sich völlig frei umherbewegen. Wir haben eine Supraflüssigkeit. Im inneren Kern ist der Druck am größten. Dort lösen sich vermutlich sogar die Neutronen in ihre Quarks auf, so dass wir nur noch eine Quarkflüssigkeit haben.

Wie Weiße Zwerge haben auch Neutronensterne eine natürliche Grenzmasse, oberhalb der es für sie keinen Gleichgewichtszustand mehr geben kann. Diese Grenze liegt ungefähr zwischen 2 und 3 Sonnenmassen und wird Oppenheimer-Volkoff-Grenze genannt. Überschreitet die Restmasse des kollabierenden Gestirns diese Grenze, so haben auch die Neutronen diesem Druck nichts mehr entgegenzusetzen.

Das Schwarze Loch

Fassen wir unsere Kenntnisse vom Sterben eines Sterns noch einmal kurz zusammen: Ist die Anfangsmasse des Sterns kleiner als acht Sonnenmassen, so beendet er sein Leben relativ unspektakulär, indem er seine Hülle abstrahlt, während sich eine Restmasse von höchstens 1,4 Sonnenmassen ergibt. Das Ergebnis ist ein Weißer Zwerg und nach dessen Abkühlung ein Schwarzer Zwerg. Übersteigt die Anfangsmasse des Sterns jedoch acht Sonnenmassen – ein solcher Gigant wird aufgrund seines heißen, bläulichen Lichts „Blauer Riese“ genannt – so wird er am Ende seiner Lebenszeit in einer Supernova-Explosion zerbersten, wobei der Sternenrest zu einem extrem dichten Reststern kollabiert. Beträgt die Masse dieses Reststerns weniger als drei Sonnenmassen, haben wir es mit einem Neutronenstern zu tun. Ist die Masse des Reststerns jedoch höher als drei Sonnenmassen, so entsteht ein „Schwarzes Loch“.

Wir befassen uns hier mit dem Phänomen des Schwarzen Lochs, weil es ein wichtiger Schlüssel zum Verständnis des Universums und zum Verstehen eines modernen Weltbildes ist. Im Schwarzen Loch kommen Prinzipien der Relativitätstheorie, der Raumzeitkrümmung, der Quantenphysik, der Kosmologie und der Urknalltheorie zum Tragen. Und unsere



Diskussion um Rote Riesen, Weiße Zwerge und Neutronensterne hatte nicht nur den Sinn, diese seltsamen Phänomene an sich zu verstehen, sondern vor allem den Zweck, uns auf diese Weise zum Schwarzen Loch vorzuarbeiten und damit auch zu einem modernen Weltverständnis.

Aber blenden wir noch einmal kurz zurück zu Albert Einstein. Als er seine Relativitätstheorie aufstellte, fasste er sie in einer Reihe von Gleichungen zusammen, den so genannten Feldgleichungen, bei denen es vor allem um das Phänomen der Gravitation ging. Für Einstein war die Schwerkraft keine *Kraft* im Newtonschen Sinn, sondern eine Verformung der Struktur von Raum und Zeit. Die Physiker und Mathematiker, die sich mit diesen Feldgleichungen befassen, gehören zu den begabtesten und klugsten Köpfen überhaupt, und viele ihrer Kollegen haben Mühe, ihren Berechnungen und Gedankengängen zu folgen. Einstein selbst versuchte sich an der Lösung seiner eigenen Gleichungen, war dabei aber nicht sonderlich erfolgreich. Mehr Glück – oder soll ich sagen: mathematischen Sachverstand – hatte indes ein anderer Deutscher, der Astronom Karl Schwarzschild (1873-1916), der nicht nur hochtalentiert, sondern auch recht patriotisch war, so dass er sich bei Ausbruch des ersten Weltkrieges freiwillig zur deutschen Armee meldete, um sowohl an der Westfront wie auch an der Ostfront zu dienen. In Russland versuchte er sich in seiner Freizeit an der Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen. Und: er hatte Erfolg. „Es ist immer wieder angenehm, exakte Lösungen für Probleme zu haben“, schrieb er in einer seiner Arbeiten darüber. Es sollte ein bescheidenes *Understatement* werden, denn die Tragweite dessen, was er mit dieser Lösung geschafft hatte, sollte sich erst noch herausstellen. Leider zog sich Schwarzschild an der Ostfront eine Krankheit zu, deretwegen er nach Deutschland zurückkehren musste. Er veröffentlichte seine Berechnungen 1916 in den „Abhandlungen der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften“ und starb dann kurz darauf. Weder Schwarzschild selbst noch Einstein noch unzählige andere Wissenschaftler maßen seinen Lösungen damals eine große Bedeutung bei. Es sollte rund ein halbes Jahrhundert dauern, bis man die Bedeutung seiner Lösungen voll erkannte. Schwarzschild hatte das Phänomen eines Schwarzen Lochs beschrieben, obwohl er diesen Ausdruck noch nicht einmal kannte. Der Begriff wurde erst 1967 von John Archibald Wheeler (geb. 1911) eingeführt.

Ein Schwarzes Loch ist der totale Triumph der Schwerkraft über alle anderen physikalischen Kräfte, die Überwindung nicht nur der elektromagnetischen Kraft und der schwachen Kernkraft, sondern sogar der starken Kernkraft durch die schwächste aller Kräfte: die Gravitation. Diese Schwerkraft bleibt Sieger, wenn genügend Masse zusammenkommt, um nicht nur Atomschalen und Atomkerne, sondern sogar die Neutronenflüssigkeit und die Quarkflüssigkeit zu bezwingen und niederzustrecken. Wenn also am Ende des Sternenlebens die Kernfusionsprozesse zum Erliegen gekommen sind und eine Supernova den ins Ungleichgewicht geratenen Stern auseinanderreißt, so dass ein Reststern von drei oder mehr Sonnenmassen übrig bleibt, dann haben die Atome dem Druck der Schwerkraft nichts mehr entgegenzusetzen, dann geht jede Struktur und jede Ausdehnung der Elementarteilchen verloren, dann gibt es den ultimativen Kollaps ins Nichts, den Zusammenbruch ins Bodenlose, die Implosion ins Schwarze Loch.

Ein Schwarzes Loch ist durch mehrere sehr merkwürdige Eigenschaften gekennzeichnet. Zum einen ist die gesamte Masse des Objekts praktisch in nur einem winzigen zentralen Punkt konzentriert, den man Singularität nennt. Möglich ist dieses für uns eigentlich Undenkbare, weil das, was wir als feste Materie kennen, in Wirklichkeit aus nichts anderem besteht als aus aufeinander wechselwirkenden Kräften, die wir Teilchen nennen und denen



wir eine Masse oder ein Gewicht zuordnen. Nimmt man diesen wechselwirkenden Teilchen die Zwischenräume, so verlieren sie ihre Ausdehnung. Die Masse eines Atoms konzentriert sich zu 99,97 Prozent im Atomkern. Der Rest ist leerer Raum. Man bräuchte eine Billion (!) Atomkerne, um die Größe eines Atoms zu erhalten. (Eine Billion sind 100.000 Milliarden!) Daran kann man ersehen, dass auch die härteste Materie im Grunde nichts als leerer Raum ist, der allerdings durch die wechselseitigen Kräfte der Elementarteilchen seine augenscheinliche Härte erhält.

Ist die Masse des implodierenden Reststerns nun groß genug, so reduziert sich die Ausdehnung seiner Masse auf diesen einen Punkt. Die Dichte und Schwerkraft einer solchen Singularität ist, mathematisch gesprochen, unendlich. Man könnte ein Schwarzes Loch auch so beschreiben, dass in ihm die gesamte Masse nicht mehr in Form von dreidimensionaler Materie vorliegt, sondern als Energie, die in einem dimensionslosen Punkt gebündelt ist.

Ein weiteres Merkmal des Schwarzen Lochs ist, dass man es nicht sehen kann. Es ist schwarz. Das hat mit der enormen Anziehungskraft dieses Objekts zu tun, die so groß ist, dass selbst das Licht der von ihm ausgehenden Strahlen nicht mehr entweichen kann. Wir haben ja gelernt, dass sich die Schwerkraft und damit auch die Entweichgeschwindigkeit eines Objekts erhöht, je näher wir dem Objekt kommen, und zwar um den Faktor 4 bei jeder Halbierung der Entfernung (vom Zentrum). Bei einem Stern der Größe und Masse unserer Sonne beträgt die Entweichgeschwindigkeit 617 km pro Sekunde. Bei einem Weißen Zwerg von einer Sonnenmasse beträgt die Fluchtgeschwindigkeit schon immerhin 3300 km pro Sekunde. Bei einem Neutronenstern mit einer Sonnenmasse, so sahen wir, beträgt sie satte 100.000 km pro Sekunde – ein Drittel der Lichtgeschwindigkeit. Und bei einem Schwarzen Loch von nur einer Sonnenmasse müsste die Entweichgeschwindigkeit eigentlich sogar größer als die Lichtgeschwindigkeit (rund 300.000 km/s) sein, weil sein Radius ja auf einen Punkt geschrumpft ist. Eine höhere Geschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit gibt es aber nach der Relativitätstheorie nicht, weder theoretisch noch praktisch, weshalb Karl Schwarzschild den so genannten „Ereignishorizont“ oder „Schwarzschildradius“ errechnete, mit dem er jenen Umkreis um das Schwarze Loch markierte, ab dem es kein Entrinnen mehr gibt, weder für einen Weltraumbummler noch für das Licht.⁶ Für eine Singularität von der Masse der Sonne beträgt der Schwarzschildradius demnach ca. 2,9 km. Ein Schwarzes Loch besteht somit, genau genommen, aus einer Singularität und einem Ereignishorizont.

Eine Rakete, selbst wenn sie in der Lage wäre, sich mit Lichtgeschwindigkeit fortzubewegen, bliebe am Ereignishorizont bewegungslos und müsste „volle Fahrt voraus“ geben, um nicht in den Sog des Lochs zu geraten. Und das gilt nicht nur für lichtschnelle Raketen, sondern auch für die Photonen des Lichts. Auch das Licht selbst erstarrt am Schwarzschildradius. Befindet sich jedoch ein Objekt innerhalb des Ereignishorizonts, so würde dieses Objekt unweigerlich zum Schwarzen Loch hin stürzen. Sogar die Lichtphotonen werden aufgrund der enormen Schwerkraft zum Schwarzen Loch hin abgelenkt. Aus diesem Grund wird ein Beobachter ein Schwarzes Loch niemals sehen können. Der Schwarzschildradius stellt sozusagen einen undurchdringlichen „Schild“ dar, ab dem aus kein Licht aus dem Einzugsbereich dieses Objekts zu uns dringen kann, weshalb das Loch „schwarz“ bleibt.

Um diesen Effekt zu veranschaulichen, können Sie sich vorstellen, sich mit einer Taschenlampe in der Hand dem Schwarzen Loch zu nähern. Wenn Sie sich dem Schwarzen

⁶ Man berechnet den Ereignishorizont mit der Formel $2GM/c^2$, wobei G die Newtonsche Gravitationskonstante ist, M die Masse der Sonne in kg und c die Lichtgeschwindigkeit.



Loch in einer Distanz von anderthalb Schwarzschildradien nähern und dann Ihre Taschenlampe geradeaus halten (also weder nach unten noch nach oben), so lenkt die Schwerkraft die Photonen derart um das Objekt herum, dass der Lichtstrahl einen Kreis von 360 Grad vollzieht. Er würde also auf Ihren eigenen Rücken auftreffen, so dass Sie, wenn Sie dem Strahl hinterher gucken, Sie sich selbst in der Ferne von hinten sehen könnten.

Würden Sie sich jedoch dem Loch weiter bis zum Ereignishorizont nähern, so würde der Strahl, auch wenn sie ihn geradeaus halten, nach innen zum Zentrum hin gelenkt werden. Unterhalb des Ereignishorizonts könnten Sie den Strahl sogar nach oben richten, also vom Schwarzen Loch weg, und dennoch würde der Strahl durch die enorme Schwerkraft umgebogen werden, so dass er den „schwarzen Schild“ nicht durchbrechen könnte. Kein Signal würde nach außen dringen.

Man kann diese Eigenschaft des Schwarzen Lochs auch anders beschreiben (beziehungsweise, wenn Sie so wollen, als ein weiteres Charakteristikum verstehen): Gemäß der Relativitätstheorie ist die Schwerkraft nichts anderes als eine Verformung der Raumzeit. Massive Objekte verformen Raum und Zeit auf eine Weise, dass die uns geläufigen Regeln der Geometrie und der Zeitabläufe nicht mehr gelten. Die Krümmung des Raums ist für Menschen, die keine Mathematiker oder Physiker sind, recht schwer verständlich, weil man sie mathematisch gut beschreiben, sich aber nur schlecht vorstellen kann. Eine Raumzeitkrümmung wird gerne veranschaulicht, indem man beispielhaft auf ein zweidimensionales Dreieck verweist, das man auf eine Kugel auflegt, so dass die Winkel dieses Dreiecks aufgrund seiner Krümmung mehr als 180 Grad betragen. So ähnlich muss man sich nun die Krümmung des dreidimensionalen Raums auf einer vierdimensionalen „Oberfläche“ denken.

Oder anders veranschaulicht: Wie sich der Raum zur Sonne hin verengt, wenn das Licht eines Sterns nahe genug an der Sonne vorbeizieht, so verengt sich auch der Raum um ein Schwarzes Loch, aber in extremer Weise. Wir haben es mit der Verzerrung unseres Weltbildes zu tun. Zweifellos kommen wir hier an die Grenze unseres gesunden Menschenverstandes. Die Welt ist nicht so, wie sie unseres Erachtens sein müsste.

Stellen wir uns nun einmal vor, dort, wo wir jetzt die Sonne sehen, befände sich ein riesiges Schwarzes Loch von der ungeheuren Masse von einer Million Sonnen (derart massereiche Schwarze Löcher gibt es tatsächlich, wir werden darauf zurückkommen). Ich starte mit einer Rakete von der Erde, und zwar mit einer Geschwindigkeit, die es mir gestattet, aus dem Schwerefeld der Erde zu entweichen. Ich bewege mich in Richtung auf das Zentrum unseres Sonnensystems zu, mache dabei einen großen Bogen um die Venus und schieße am Merkur vorbei, um mich nun auf dem kürzesten Weg in Richtung Schwarzes Loch zu bewegen, während Sie mich von der Erde aus mit einem überdimensionierten Teleskop verfolgen. Obwohl das Schwarze Loch eine Masse von einer Million Sonnen hat, ist der Schwarzschildradius nur drei Millionen Kilometer groß (also nur etwa viermal so groß wie der Sonnenradius und nur ein Zwanzigstel der Entfernung vom Merkur zur Sonne).

Zunächst fühle ich mich in meiner Rakete noch recht wohl und erfreue mich der ungetrübten Schwerelosigkeit. Je näher ich mich dem Schwarzen Loch nähere, desto schneller wird die Geschwindigkeit meiner Rakete, weil sie durch die Schwerkraft des Schwarzen Lochs beschleunigt wird. Ab dem Zeitpunkt, da ich mich auf Höhe des Planeten Merkur befinde, benötige ich nur rund 15 Minuten, bis ich mich dem Ereignishorizont nähere. Meine Rakete wird jetzt noch schneller. Für Sie hingegen, der Sie mich im Fernrohr beobachten, wird meine Rakete nicht nur immer kleiner und kleiner erscheinen, sondern auch immer langsamer, bis sie – am Ereignishorizont – stillzustehen scheint. Während ich



selbst nun mit hoher Geschwindigkeit den Ereignishorizont durchschieße und mir bewusst mache, dass es ab jetzt kein Zurück mehr geben wird, beobachten Sie mich unentwegt, als würde ich am selben Platz verharren. Und Sie können mich dort in einer scheinbar bewegungslosen Position solange beobachten, bis Ihnen das erstarrte Bild langweilig erscheint, Sie müde werden und schließlich zu Bett gehen, ohne dass ich Ihnen ganz aus dem Blick entschwunden bin. Ich dagegen habe ab dem Ereignishorizont gerade mal noch maximal zehn Sekunden Zeit, um mich auf das unausweichliche Ende vorzubereiten. (Dieser kurze Moment vor dem endgültigen Aus wäre übrigens noch geprägt von enormem Stress, der nicht nur von meiner Todesangst herrührt, sondern auch davon, dass ich in den letzten Sekunden gehörig langgezogen werde, weil die Gravitation, die an meinem Kopf zerrt, stärker ist als jene, die an meinen Füßen reißt. Es ist die Gezeitenkraft, die wir auf der Erde als Ebbe und Flut kennen, die aber unter den Bedingungen des Schwarzen Lochs verheerende Folgen hat. Rakete und Leib werden immer weiter auseinander gezogen, was den Raumflug kurz vor seinem Ende sehr ungemütlich werden lässt, und schließlich zerreißt es mich in Fetzen, noch bevor ich in der Singularität aufgehe.

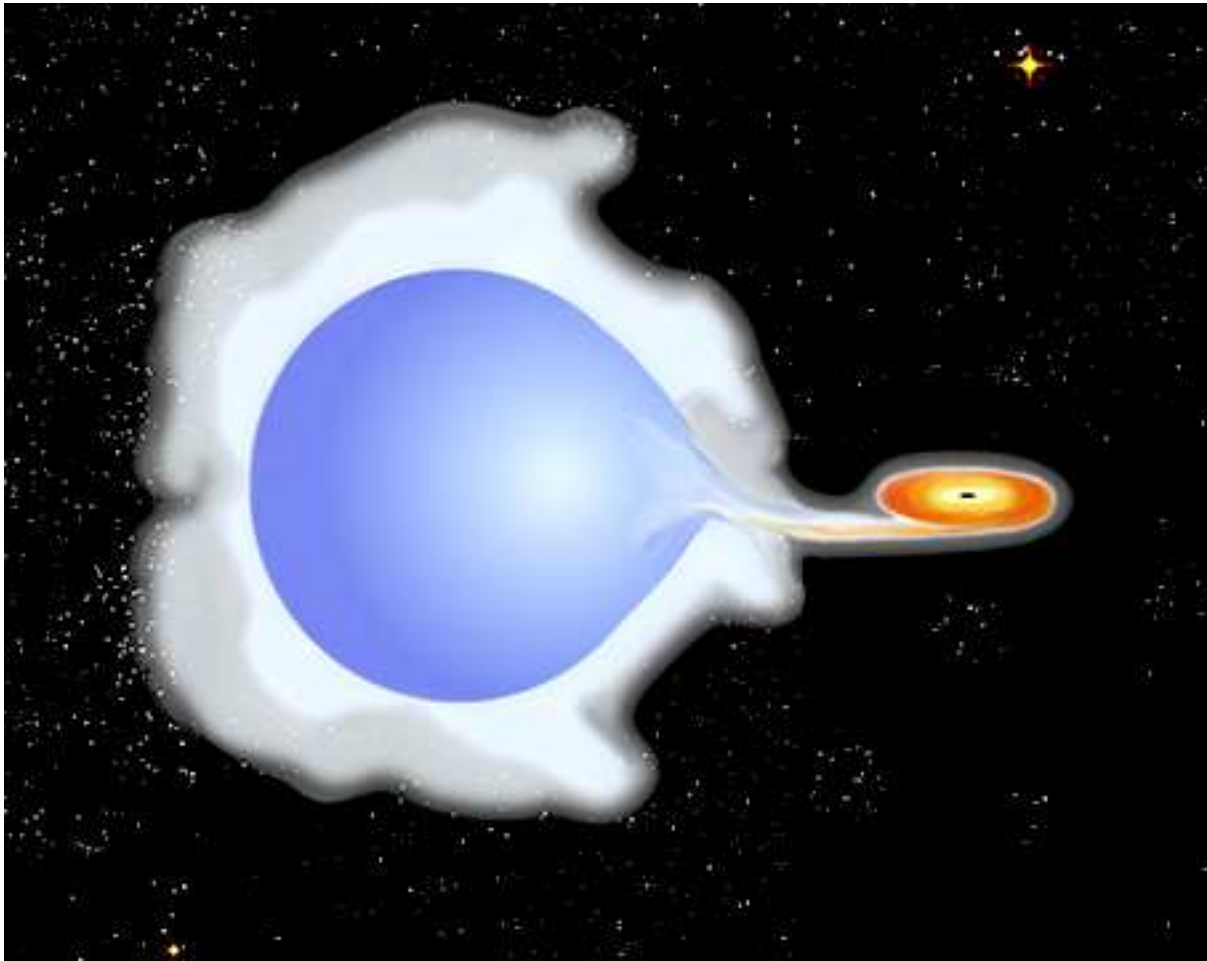
Der Korrektheit halber muss hier angemerkt werden, dass sich das, was Alfred Schwarzschild in Bezug auf den Ereignishorizont berechnet hat, nur auf ein in Ruhe befindliches Schwarzes Loch bezieht. Wir müssen jedoch davon ausgehen, dass Schwarze Löcher mit extrem hoher (wenn nicht unendlicher) Geschwindigkeit rotieren, wie wir das auch bei Neutronensternen vorfinden. Ein rotierendes Schwarzes Loch hat im Vergleich zu einem in Ruhe befindlichen Loch einige Besonderheiten, etwa die, dass sich der Schwarzschildradius durch die Rotation noch verkleinert. Auch dürfte die Singularität im Zentrum des Lochs nicht punktförmig, sondern ringförmig sein. Wissenschaftler haben inzwischen Schwarze Löcher ausfindig gemacht, die sich pro Sekunde rund 1000 Mal um die eigene Achse drehen.⁷

Und noch eine Anmerkung ist nötig. Weil niemand bisher ein Schwarzes Loch direkt sehen konnte, darf es auch noch nicht als bewiesen gelten, dass ein Schwarzes Loch tatsächlich eine Singularität in Gestalt eines unendlich kleinen Punktes enthält. Vielleicht, so darf man durchaus vermuten, ist die Ausdehnung des Reststerns ja doch größer als der singuläre Punkt. Aber auch in diesem Fall wäre er kleiner (oder jedenfalls nicht größer) als der Ereignishorizont, so dass das Licht von innerhalb dieses Bereiches nicht entweichen würde. Dieses Objekt wäre genauso unsichtbar wie ein Schwarzes Loch, bestünde aber nicht aus einer Singularität.⁸

Gibt es Schwarze Löcher tatsächlich oder handelt es sich nur um ein theoretisches Denkmodell? Gibt es irgendwelche Hinweise auf die Existenz solcher Phänomene? Wie soll man sie überhaupt entdecken, wenn man sie doch gar nicht sehen kann? Und, wenn es so etwas tatsächlich gibt: Ist ein Schwarzes Loch ein eher seltenes oder ein häufig anzutreffendes Objekt?

⁷ Forscher des Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics und vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching haben ein Verfahren entwickelt, die Rotation von Schwarzen Löchern zu messen. Im Röntgensternsystem GRS 1915+105 im Sternbild Adler haben sie ein Schwarzes Loch gemessen, das sich 950mal in der Sekunde um seine Achse dreht. Die Rotationsdauer gilt allerdings nur für den Ereignishorizont, denn nur dort kann man die Rotation messen. Übrigens schrumpft der Schwarzschild-Radius je mehr, desto schneller sich das Schwarze Loch dreht.

⁸ Die Astronomen Emil Mottola vom Los Alamos National Laboratory und Pawel Mazur von der University of South Carolina haben diese Alternative zum „Schwarzen Loch“ ernsthaft vorgeschlagen und nennen ihr Gestirn, das maximal die Größe seines eigenen Ereignishorizonts hätte, einen „Gravastern“. Siehe den Artikel „Death Star“ in: New Scientist, 19. Jan. 2002, S. 27.



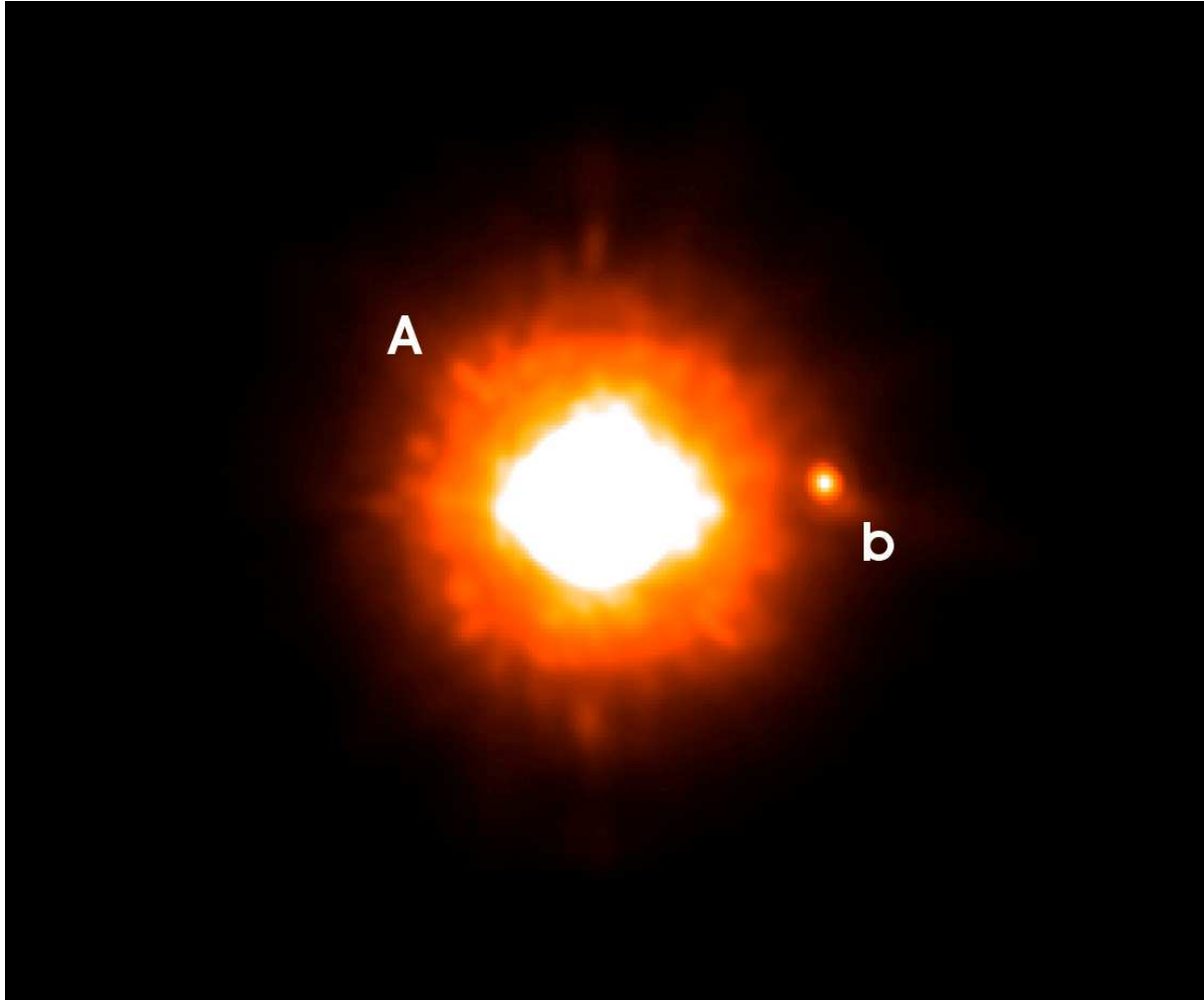
Die Darstellung eines Künstlers von einem Schwarzen Loch, das Materie von einem Nachbarstern „absaugt“. (Wikipedia)

Die Antwort auf die erste Frage lautet: Ja, man kann diese massereichen Objekte tatsächlich ausfindig machen, und man hat bereits eine Reihe von Schwarzen Löchern identifiziert. Das Phänomen des Schwarzen Lochs ist schon lange über das Stadium eines theoretischen Modells hinausgewachsen und heute zum Gegenstand der beobachtenden Astronomie geworden. Wissenschaftler gehen heute sogar davon aus, dass Schwarze Löcher keine seltenen Phänomene sind, sondern in großer Zahl allüberall im All verteilt sind.

Aber wie entdeckt man ein Schwarzes Loch, das per Definition nicht sichtbar ist? Man sucht den Himmel nach Doppelsternsystemen ab, bei denen einer der beiden Begleiter unsichtbar ist. Dabei kann man aufgrund der Bewegung des sichtbaren Sterns auf die Masse des unsichtbaren Begleiters schließen. Auf diese Weise haben Astronomen bereits mehrere hundert Planeten außerhalb unseres Sonnensystems ausfindig gemacht, denn auch Planeten sind meist unsichtbare Begleiter, die jedoch ab einer bestimmten Größe ihren zentralen Stern in seinen Bewegungen beeinflussen können. Handelt es sich bei dem unsichtbaren Begleiter jedoch um ein sehr massereiches Objekt, so ist eigentlich nur noch zu entscheiden, ob es sich um einen Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch handelt, denn auch Neutronensterne wird man in der Regel nicht sehen können, weil sie aufgrund ihrer kleinen Oberfläche nur wenig Licht nach außen abgeben. Ein Neutronenstern hat jedoch eine obere Massegrenze von ungefähr drei Sonnenmassen. Unsichtbare Begleiter mit wesentlich höheren Massen



müssen Schwarze Löcher sein.⁹ Die sowjetischen Astronomen Zeldovich und Guseinov haben schon in den Sechziger Jahren eine erste Liste von solchen Doppelsternsystemen erstellt, von denen einige unsichtbare Begleiter sehr massereich waren und deshalb auf Schwarze Löcher hindeuteten.



The Sub-Stellar Companion to GQ Lupi
(NACO/VLT)

ESO PR Photo 10a/05 (7 April 2005)

© European Southern Observatory



Der erste sichtbare Exoplanet? Dieses von der Universität Jena aufgenommene Photo zeigt (rechts im Bild) wahrscheinlich den ersten sichtbaren (!) Planeten außerhalb unseres Sonnensystems. Der Stern mit Namen GQ Lupi ist mit etwa einer Million Jahre noch sehr jung. Sowohl der Hauptstern A als auch sein planetarer Begleiter b dürften noch in der Entstehungsphase sein. Durch die Spektralanalyse hat man Wasser und Kohlenstoff auf dem Planeten ausmachen können.

Es gibt aber noch eine weitere Unterscheidung zwischen Neutronensternen und Schwarzen Löchern: Von einem Neutronenstern darf man in der Regel eine starke Radiostrahlung erwarten, von einem Schwarzen Loch jedoch nicht, da von ihm keine Strahlung entweichen kann. Insofern würde die Abwesenheit dieser Strahlung in Zusammenhang mit einer großen Masse unzweifelhaft auf ein Schwarzes Loch hindeuten.

⁹ Allerdings gilt auch, dass ein Schwarzes Loch weniger als drei Sonnenmassen haben kann. Für ein Schwarzes Loch gibt es weder nach unten noch nach oben hin eine Masse-Begrenzung. Es ist denkbar, dass es winzige Schwarze Löcher von weit weniger als einer Sonnenmasse ebenso gibt und riesige Schwarze Löcher mit Milliardenfacher Sonnenmasse.



Ein weiteres Indiz, das für ein Schwarzes Loch spricht, so weiß man inzwischen, sind starke Röntgen- und Gammastrahlen, die ausgesendet werden, wenn ein Schwarzes Loch aus seiner Umgebung Materie anzieht und „verschlingt“. Bei diesem als „Aufsammlung“ bezeichneten Prozess werden Röntgen- und Gammastrahlen frei, die wir aber von der Erde aus nicht sehen können, weil die Erdatmosphäre diese Strahlen nicht durchlässt. Man kann sie nur von einem Satelliten außerhalb der Atmosphäre beobachten und aufzeichnen. Das erste Schwarze Loch, das man erst mit Hilfe eines Satelliten ausfindig machen konnte, war die Röntgenquelle Cyg X-1.

Der italo-amerikanische Astronaut Riccardo Giacconi hatte in den Sechziger Jahren die NASA davon überzeugen können, einen Satelliten ins All zu schicken, der Röntgenstrahlen entdecken würde. Der Satellit Uhuru wurde 1970 von Kenia aus ins All befördert und stellte den Beginn eines ganz neuen Forschungszweiges dar: der Röntgenastronomie. Er brachte eine immense Fülle neuer Erkenntnisse. Cyg X-1 sandte merkwürdig unregelmäßige Röntgenimpulse aus, die sich Giacconi nicht erklären konnte. Teleskopische Astronomen und Radioastronomen halfen ihm bei der Deutung. Man fand heraus, dass Cyg X-1 der unsichtbare und überdies sehr massereiche Begleiter eines Doppelsternsystems war, dessen sichtbarer Begleiter (bekannt als HDE 226 868) mit hoher Geschwindigkeit und in bedrohlicher Nähe um das unsichtbare Objekt rotierte. Ein Neutronenstern schied als Erklärung aus, da der unsichtbare Stern mindestens acht Sonnenmassen umfasste. Und als normaler Stern hätte er bei dieser Masse ohne weiteres sichtbar sein müssen. Die Schlussfolgerung war unausweichlich: Cyg X-1 war ein Schwarzes Loch.

Als eines der überzeugendsten Nachweise eines Schwarzen Lochs dürften die Beobachtungen des Hubble Space Telescopes im ultravioletten Licht gelten, bei denen Impulse eines Materiehaufens am Rande des unsichtbaren Objekts Cygnus XR-1 im Sternbild Schwan in Sekundenschnelle völlig verschwanden, was darauf hindeutete, dass diese Materie sozusagen am Schlund des Schwarzen Lochs mit nahezu Lichtgeschwindigkeit hinter den Schwarzschildradius und hin zum Schwarzen Loch gesogen wurde.

Man sieht: Obwohl ein Schwarzes Loch an sich unsichtbar ist, hat die Forschung doch inzwischen Mittel und Wege gefunden, diese seltsamen Objekte indirekt nachzuweisen. Es ist allerdings davon auszugehen, dass viele Schwarze Löcher nicht direkt nachgewiesen werden können, weil sich keine anderen Sterne (mehr) in ihrer Nähe befinden, diese Löcher somit „hungern“ und ihre Existenz nicht durch hereinströmende Materie verraten. Vielleicht befinden sich Schwarze Löcher auch in großer Zahl zwischen den Galaxien, ohne dass man sie dort ausfindig machen könnte. Die dankbarsten Gebiete für die Suche nach Schwarzen Löchern dürften jedoch die Galaxienzentren sein, und Wissenschaftler gehen mittlerweile davon aus, dass sich in den Zentralregionen der meisten, wenn nicht aller Galaxien, riesige Schwarze Löcher befinden. (Siehe dazu meinen Aufsatz: „Das geheimnisvolle Zentrum unserer Milchstraße“.)