

»... als wandeltest du mit ihnen«

Blick ins Innere der Sterne

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren durch die Auswertung von Fotos so viele Sternendaten gesammelt worden, dass man sich auf die Suche nach einer Systematik in dieser unübersichtlichen Vielfalt machen musste. Wann gleichen zwei Sterne einander? Wann unterscheiden sie sich? Lassen sich Ähnlichkeiten, Verbindungen oder Gesetzmäßigkeiten in dieser Vielfalt finden? Ejnar Hertzsprung ordnete die zur Verfügung stehenden Daten in einem Diagramm an, in dem die Sterne nach Leuchtkraft und Spektralklasse (das heißt nach Farbe und der damit verbundenen Temperatur) eingetragen waren. Der Amerikaner Henry Norris Russell erweiterte das Diagramm zur Darstellung der absoluten Helligkeit und der Spektralklasse. Jedem vermessenen Stern wurde so eine Position zugeordnet. Die Sterne verteilten sich aber nicht gleichmäßig in dieser Grafik, sondern sie ordneten sich in verschiedenen Linien an und offenbarten dadurch deutliche Zusammenhänge. Das Hertzsprung-Russell-Diagramm wurde so zur wichtigsten grafischen Darstellung der Astrophysik.

Wie schon beschrieben, hatte Cecilia Payne-Gaposchkin herausgefunden, dass die Sonne über 90 Prozent aus Wasserstoff besteht. Das gleiche trifft auch auf die meisten anderen sichtbaren Sterne zu. Ihr Aufbau ist also vergleichsweise simpel. Die allermeisten Sterne liegen im Hertzsprung-Russell-Diagramm annähernd diagonal angeordnet. Rechts unten sind die kalten und kleinen Sterne, links oben die heißen

und großen. Man nennt diese Diagonale die *Hauptreihe*. Es hatte sich herausgestellt, dass Sterne umso heller leuchten, je größer ihre Masse ist. Das ist auch einsichtig: Je mehr Wasserstoff vorhanden ist, desto größer ist der Stern, desto mehr kann in der Kernfusion auch verschmelzen, desto heißer wird er und desto stärker leuchtet er. Wo der Stern im Diagramm angeordnet ist, hängt also davon ab, wie viel Masse er bei seiner Entstehung ansammeln konnte. (Wir erinnern uns: Die Sonne und das ganze Sonnensystem entstanden durch das Zusammenziehen einer Gaswolke infolge ihrer eigenen Gravitation. Je größer also eine solche Urwolke ist, desto schwerer kann der daraus entstehende Stern werden.)

Unsere Sonne ist unter allen Sternen nichts Besonderes. Wieder einmal müssen wir erkennen, dass wir keine bevorzugte Stellung im Universum einnehmen. Die Sonne liegt annähernd in der Mitte der Hauptreihe. Oberhalb der Hauptreihe ordnen sich Sterne in Gruppen an, die vorwiegend gelblich oder rot strahlen und die man aufgrund ihrer Größe *Riesen* und *Überriesen* nennt. Links unten und auch deutlich abgehoben von der Hauptreihe finden wir kleine, weiß strahlende Sterne sehr hoher Temperatur. Sie heißen *Weißer Zwerge*.

Je nachdem, wie viel Masse die Sterne bei ihrer Entstehung zur Verfügung haben, finden sie ihren Platz im Diagramm. Doch sie verschieben sich im Laufe ihrer Lebenszeit! Unsere Sonne beispielsweise wird sich innerhalb der nächsten fünf Milliarden Jahre zu einem relativ kühlen *Roten Riesen* aufblähen, der über die Venusbahn hinausreichen wird. Da stellt sich natürlich die Frage, warum sich die Sonne und die anderen normalen Sterne überhaupt aufblasen.

Alle Sterne der Hauptreihe sind recht stabil und zeichnen sich durch ein Gleichgewicht zweier Drücke aus: Die Gravitationskraft einerseits zieht die Materie zusammen; der Gravitationsdruck wirkt so zum Sternmittelpunkt hin. Andererseits wird es durch die Fusion von Wasserstoff- zu Heliumkernen im Sterninneren extrem heiß. Solch hohe Temperaturen bedeuten, dass sich die Materieteilchen sehr schnell bewegen und auseinanderstreben. (Wir kennen das von sich ausdehnender heißer Luft.) Des Weiteren drückt die entstehende Strahlung nach außen.

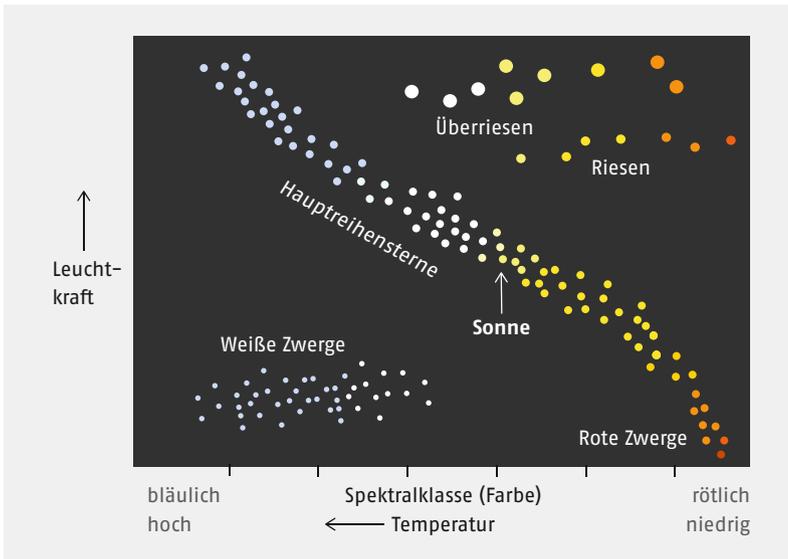


Abb. 18: Vereinfachte Darstellung des Hertzsprung-Russell-Diagramms.

Dieser Druck wirkt also dem nach innen wirkenden Gravitationsdruck entgegen und hält ihm sozusagen die Waage.

Das geht solange gut, bis der Wasserstoffbrennvorrat allmählich zur Neige geht und folglich die Fusionsprozesse weniger werden. Der Druck nach außen lässt damit nach. Die Gravitationskraft gewinnt zunächst die Oberhand und Materie wird ins Innere des Sternes gezogen. Durch die Ansammlung der Materie auf kleinstem Raum wird es aber so extrem heiß, dass sich die Sonne infolge des stark ansteigenden thermischen Drucks letztendlich aufbläht. Da sich die Wärme auf ein wesentlich größeres Volumen verteilt, kühlt die Sonne an der Oberfläche ab und strahlt daher nicht mehr weiß, sondern rötlicher. Im Hertzsprung-Russell-Diagramm wird sie dann nach oben in den Ast der Roten Riesen gewandert sein und für einige Hundert Millionen Jahre dort auch bleiben.

Damit ist die Geschichte aber noch nicht zu Ende. Irgendwann ist der Wasserstoffvorrat aufgebraucht. Die Gravitation dominiert wieder, der Stern zieht sich zusammen, im Innern wird der Druck immer größer

und es herrschen Temperaturen von 100 Millionen Grad. Die Heliumkerne werden so stark zusammengepresst, dass schließlich neuartige Fusionsprozesse in Gang gesetzt werden: Heliumatome fusionieren zu Kohlenstoff, in folgenden Reaktionen dann auch zu Sauerstoff und noch weiter in geringem Maße zu Neon, Magnesium und Silizium.

Bei den Fusionsprozessen werden große Mengen an Masse in Strahlung umgesetzt. Auch der Sternenwind – die ausgestoßenen Teilchen – wird um vieles stärker, sodass die Sterne im Laufe der Zeit viel von ihrer Masse verlieren. Irgendwann wird das nukleare »Brennmaterial« knapp. Die äußeren Schichten des aufgeblähten Riesen entfernen sich immer mehr vom dichten Kern und lösen sich schließlich ganz ab. Es bildet sich um den Stern ein sogenannter *planetarischer Nebel*. Den ersten dieser Art hat Friedrich Wilhelm Herschel schon 1790 entdeckt – ohne freilich eine Ahnung davon zu haben, wie er entstanden sein könnte. Die Prozesse der Sternentwicklung sind schließlich erst im 20. Jahrhundert einigermaßen erklärt worden.

Der planetarische Nebel wird vom Stern, von dem er sich gelöst hat, von innen her beleuchtet und durch Lumineszenz zum Strahlen in verschiedenen Farben und Bereichen des Spektrums gebracht (siehe Abbildung 19). In einigen Zehntausend Jahren hat sich aber der Nebel so weit ausgebreitet und verdünnt, dass wir nichts mehr davon sehen können. Aufgrund dieser astronomisch extrem kurzen Zeitspanne sind solche spektakulären Himmelserscheinungen auch relativ selten.

Der Zentralstern besteht im Prinzip nur noch aus dem etwa 100 000 Grad heißen und extrem kompakten Kern. Ein Kubikzentimeter dieser Materie wiegt dann ungefähr eine Tonne und ist mithin so schwer wie ein Kleinwagen. Der Stern strahlt dann nicht mehr rot, sondern weiß und ist aufgrund des Masseverlustes und der Schrumpfprozesse ziemlich klein – etwa nur noch so groß wie unsere Erde. Der Rote Riese ist damit zum Weißen Zwerg mutiert und auf der gegenüberliegenden Seite der Hauptreihe angekommen. Schließlich geht aber der nukleare Brennstoff komplett aus. Der Stern kühlt dann nur noch ab und aus dem Weißen wird dann ein nicht mehr leuchtender Schwarzer Zwerg.

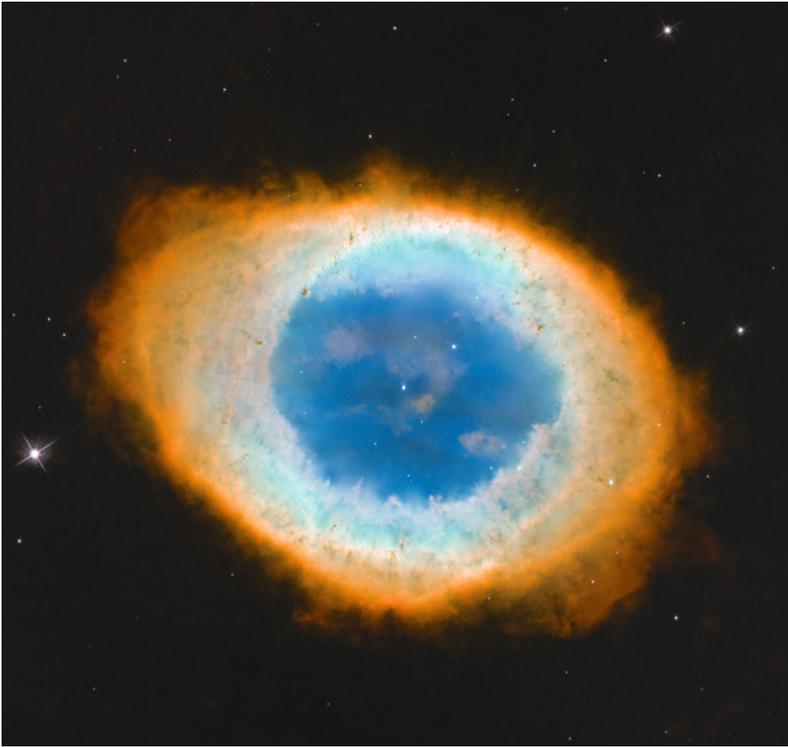


Abb. 19: Planetarischer Nebel (Ringnebel M 57).

Solch ein Schicksal werden also unsere Sonne und auch die anderen Sterne der Hauptreihe erfahren, die ungefähr die gleiche Masse haben. Es gibt allerdings auch noch andere »Stern-Biografien«. Deren Verlauf hängt ziemlich stark von der Masse ab, die die Sterne bei ihrer Entstehung hatten. Wenn sie deutlich leichter als unsere Sonne sind, dann sind die Gravitationskräfte nicht stark genug, um beim Zusammenziehen der Masse ausreichend hohe Temperaturen und Drücke im Innern der Sterne zu erzeugen. So laufen die Fusionsprozesse – wenn überhaupt – nur mit geringer Intensität ab, die Sterne leuchten nicht weiß, sondern aufgrund der niedrigen Temperatur nur schwach rot. Sie bleiben von Beginn an Rote Zwerge, blähen sich nicht auf, leuchten dafür allerdings ziemlich lange. Nach einigen Milliarden

Jahren verlöschen sie allmählich, weil sich ihr Vorrat an Wasserstoff erschöpft.

Sind die Sterne jedoch deutlich schwerer als unsere Sonne, werden im Innern auch höhere Temperaturen erreicht. Die Fusionsprozesse laufen dadurch deutlich schneller ab und der Stern brennt viel eher aus, als das bei kleineren Objekten der Fall ist. Durch die intensiveren Fusionen werden auch schwere Elemente bis zum Eisen erzeugt. Dabei blähen sich diese Sterne zunächst auch zu Roten Riesen auf. Wenn dann die Fusionsprozesse aufgrund von Mangel an nuklearem Brennstoff zum Erliegen kommen, kollabiert der Stern infolge seiner Gravitation. Dabei wird innerhalb kürzester Zeit so viel Energie freigesetzt, dass der Stern millionen- bis milliardenfach heller leuchtet als zu Anfang. Er strahlt damit sogar heller als eine ganze Galaxie. Dieser gewaltige Prozess wird *Supernova* genannt und ist nur selten zu beobachten, da der Helligkeitsausbruch schon nach Tagen oder Wochen verschwindet. Man schätzt, dass es in der ganzen Milchstraße nur etwa 20 Supernovae pro Jahrtausend gibt! Allerdings lassen sich »Reste« dieser Sternexplosionen noch lange beobachten. So ist der spektakulär-berühmte Krebsnebel (siehe Abbildung 20) das Resultat einer Supernova aus dem Jahre 1054, von der chinesische Astronomen berichteten.

Die Bezeichnung Supernova geht zurück auf Tycho Brahe, der eine solche im Jahre 1572 beobachtet hat. Er ging davon aus, dass der Helligkeitsausbruch die Entstehung eines neuen Sternes (lateinisch *stella nova*) anzeigt. Dass das genaue Gegenteil der Fall war und er im Prinzip nicht die Geburt, sondern den Tod eines Sternes beobachtet hatte, wusste Brahe nicht. Die etwas irreführende Bezeichnung hat sich aber bis heute erhalten. Brahes Beobachtung war insofern bedeutend, als man bis dahin in der abendländischen Wissenschaft annahm, dass am Himmel alles ewig und unveränderlich sei. Dass jetzt plötzlich augenscheinlich etwas »Neues« auftauchte, war durchaus revolutionär.

Die ersten, die in den 1930er Jahren das Zustandekommen von Supernovae durch einen Gravitationskollaps erklärten, waren der Schweizer Fritz Zwicky und der Deutsche Walter Baade. Heute wissen wir, dass es im Prinzip zwei Arten von Supernovae gibt: Die von Brahe

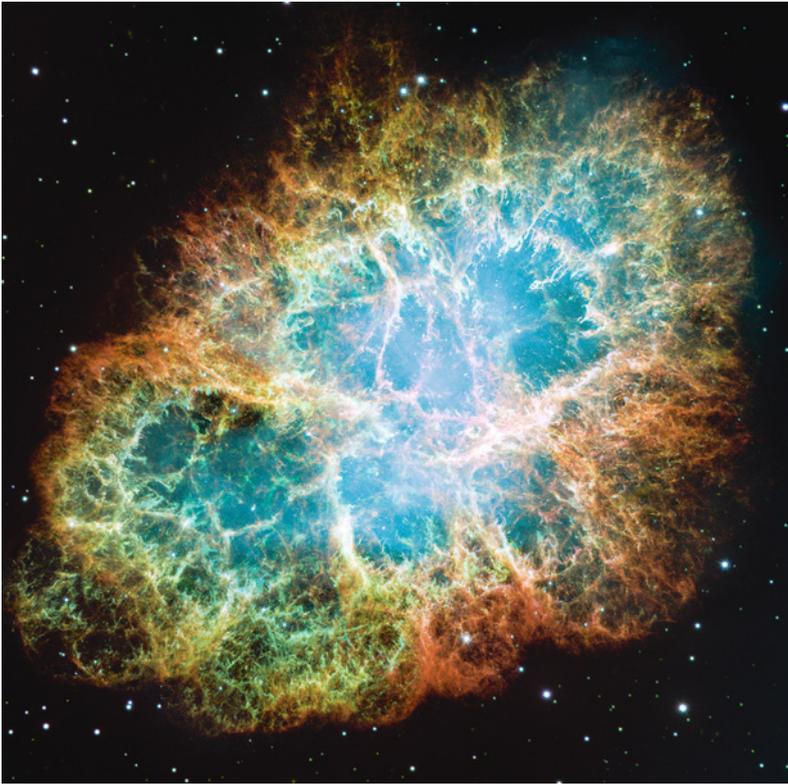


Abb. 20: Der Krebsnebel, Überrest einer Supernova.

entdeckte lief anders ab als oben geschildert. Hier brach kein Roter Riese in sich zusammen, sondern ein Weißer Zwerg zog aufgrund seiner Gravitation große Massen von einem nahen Begleitstern ab und erreichte damit eine so große, kritische Masse, dass er komplett kollabierete und schließlich explodierte. Diese Art der Supernovae findet erstaunlicherweise immer bei der gleichen kritischen Masse statt. Wenn der Stern genügend Masse angesaugt hat, explodiert er. Die gleiche Masse führt auch zur gleichen freigesetzten Energie und damit immer zur gleichen absoluten Helligkeit. Supernovae von diesem Typ können damit auch als »Standardkerzen« verwendet werden, die uns eine weitere Möglichkeit eröffnen, Entfernungen im Weltall zu bestimmen. Weil

Supernovae extrem hell strahlen, lassen sie sich auch in fernen Galaxien beobachten und wir können deren Entfernung zu uns ermitteln.

Woher weiß man das nun alles? Planeten kann man noch mit dem Fernrohr näher untersuchen und mittlerweile können wir auch Raumsonden hinschicken, die sich die Himmelskörper aus der Nähe ansehen. Aber kein Mensch konnte bislang in Sterne hineinschauen. Wieso haben wir trotzdem recht detaillierte Vorstellungen von den Prozessen in deren Innern?

Wie schon geschrieben, sehen wir am Himmel wie mit einer Zeitmaschine Sterne in sehr unterschiedlichen Stadien ihrer Entwicklung. Da es nahezu unermesslich viele Sterne gibt, finden wir Exemplare in ziemlich jeder Größer und in jedem Alter. Zudem sind Sterne vom Prinzip her zu Beginn ihrer Lebenszeit als Wasserstoffkugeln alle ziemlich gleich aufgebaut.

Ausgehend von ihren Beobachtungen und Messungen entwickelten nun Wissenschaftler mathematisch formulierbare *Theorien* und *Modelle*, mit denen sie möglichst alles Beobachtete erklären konnten. Zwar sind Modelle nur vereinfachte Abbildungen der Wirklichkeit, sie sind nicht die Realität. Doch bei riesigen Wasserstoffkugeln kommt man mit Vereinfachungen ziemlich nahe an die Wirklichkeit heran. Die ablaufenden Prozesse sind relativ übersichtlich. Natürlich unterscheiden sich die Bedingungen im Sterninneren ziemlich stark von dem, was wir von der Erde her kennen. Doch es stellte sich heraus, dass sich die moderne Physik recht gut an diese Umstände anpassen lässt. Im ständigen Austausch der Ergebnisse von messenden und rechnenden Astrophysikern werden immer die neuesten Beobachtungen mit den neuesten Rechnungen abgeglichen. Lässt sich das Beobachtete und Gemessene mit den theoretischen Berechnungen nicht in Übereinstimmung bringen, werden die Theorien verändert und die Modelle in der Regel komplizierter. Wie schon im Kapitel über die Sonne geschildert, wurden ab den 1920er Jahren die ersten brauchbaren Theorien zu den Prozessen in den Sternen entwickelt und im Laufe der Zeit immer mehr konkretisiert.

Fusionsprozesse können wir auf der Erde in Laboren noch nicht genauer untersuchen. Aus den Experimenten in großen Teilchenbeschleu-

nigern oder Kernreaktoren können wir aber zumindest auf einzelne Prozesse schließen, die im Sterninneren vor sich gehen. Hier begegnen sich auf besondere Weise die Physik des sehr Kleinen (die Quanten- und Elementarteilchenphysik) und die Physik des extrem Großen (die Relativitäts- und Gravitationstheorie). Beim radioaktiven Zerfall beispielsweise lassen sich bestimmte Prozesse nur erklären, wenn es ein nahezu masseloses, elektrisch neutrales Teilchen gibt, das man deshalb um das Jahr 1930 in die Theorie einführte und *Neutrino* nannte. Das Teilchen transportiert zwar Energie, es lässt sich aber kaum nachweisen. Es wechselwirkt nämlich mit normaler Materie so gut wie nicht. Neutrinos müssten entsprechend der Theorie in großen Mengen bei Kernfusionsprozessen entstehen. Lichtteilchen, die infolge der Fusion im Innern des Sternes erzeugt werden, brauchen im Durchschnitt einige Tausend Jahre, bis sie die Oberfläche erreichen. Ständig stoßen sie mit anderen Teilchen zusammen und werden so an ihrer Ausbreitung gehindert. Neutrinos hingegen fliegen fast ungehindert durch die dickste Materie und können so schon einige Sekunden nach ihrer Entstehung den Stern verlassen. Wenn man sie also nachweisen könnte, würde das unsere Vorstellungen von den Fusionsprozessen ziemlich gut bestätigen.

Das gelang schließlich um 1970 dem Amerikaner Raymond Davis Jr. In einer 1400 Meter tiefen Goldmine in South Dakota hatte er einen Tank für 450 000 Liter Perchlorethylen untergebracht. Eine solche Tiefe war notwendig, um andere Elementarteilchen durch die Gesteinsschichten abzufangen, da sie sonst Störsignale hätten erzeugen können. Die Menge an Flüssigkeit musste zudem groß sein, weil die Wechselwirkungen äußerst selten auftreten. Die Neutrinos reagierten mit der Flüssigkeit und erzeugten dabei Argon-Atome. Davis hatte abgeschätzt, dass er auf diese Weise mit seiner riesigen Anlage circa 20 Neutrinos pro Monat nachweisen konnte! Doch es sollten noch deutlich weniger werden. Trotzdem gelang der aufwendige Nachweis, die Modelle zur Fusion im Sterninneren wurden bestätigt und 2002 – über dreißig Jahre nach seinen Messungen – erhielt Davis dafür den Nobelpreis.⁴⁹

Bei Supernovae werden 99 Prozent der gewaltigen Energie in einem Neutrino blitz freigesetzt. 1987 konnte ein solcher Ausbruch erstmals

beobachtet werden. Die Neutrinos verließen den kollabierenden Stern sofort ohne Wechselwirkung. Sie kamen daher auf der Erde drei Stunden vor dem Licht an, das sich nach der Explosion erst bis zur Sternoberfläche »vorarbeiten« musste.

Aufgrund der Bedeutung von Neutrinos ist der Aufwand recht groß, der für ihren Nachweis auch heute noch betrieben wird. Das aktuell wohl faszinierendste Neutrino-Observatorium IceCube befindet sich im antarktischen Eis. Dort wurden 2010 in einem Volumen von einem Kubikkilometer (!) über 5000 Lichtsensoren in eine Tiefe von anderthalb bis zweieinhalb Kilometern im Eis versenkt. Auftreffende Neutrinos können – mit extrem geringer Wahrscheinlichkeit – im Eis blaue Leuchtspuren hinterlassen, die von den Sensoren aufgenommen werden. Verlängert man über 3D-Rechnungen die Spuren nach außen hin, lässt sich die Richtung bestimmen, aus der das Neutrino angeschossen kam. So können Neutrino-Quellen im All lokalisiert werden.⁵⁰

Doch nicht nur aus der Analyse von Neutrinos gewinnen wir Einblicke ins Sterninnere. Schauen wir uns einmal an, was von einer Supernova übrigbleibt. Ihr Endzustand hängt ganz davon ab, welche Masse der sterbende Stern hatte. War er etwa zehnmal so schwer wie unsere Sonne, ist nach der Explosion nur eine reichliche Sonnenmasse übrig. Da keine Fusionsprozesse mehr ablaufen, schrumpft der Kern infolge des Gravitationskollapses zu einer Kugel von einigen Kilometern im Durchmesser. Die Dichte ist folglich extrem hoch. Ein Kubikzentimeter wiegt durchschnittlich 500 Millionen Tonnen! Wenn man sich vorstellt, dass in Deutschland aktuell circa 50 Millionen Pkws zugelassen sind und jeder im Durchschnitt 1,5 Tonnen wiegt, dann müssten wir also knapp siebzigmal alle neuen Pkws in einem Kubikzentimeter zusammenpressen, um ähnliche Zustände zu haben! Man spricht dann von *entarteter Materie*. Sogar die sonst freien negativen Elektronen werden unter diesen Umständen in die positiv geladenen Protonen gedrückt, sodass schwere neutrale Teilchen – Neutronen – entstehen. Die daraus gebildeten Himmelskörper werden deshalb *Neutronensterne* genannt. Sie sind die kompaktesten, dichtesten Objekte, die wir ken-

nen. Aufgrund des schon diskutierten Pirouetteneffekts – je enger sich ein rotierender Gegenstand zusammenzieht, desto schneller rotiert er – dreht sich der Neutronenstern sehr schnell um die eigene Achse und emittiert dabei ein paar hundert Mal in der Sekunde pulsartig Radiowellen. Wir sprechen dann von einem *Pulsar*. Eine solch seltsame Radioquelle wurde erstmalig 1967 von Jocelyn Bell entdeckt.⁵¹ Sie war Doktorandin von Antony Hewish und wurde in der Folge auch mehrfach gemeinsam mit ihm für diese bahnbrechende Entdeckung ausgezeichnet. Bei der Vergabe des Physiknobelpreises 1974, den Hewish für die Entdeckung der Pulsare bekam, wurde Bell jedoch nicht berücksichtigt. Diese Entscheidung des Nobelpreiskomitees wurde sehr heftig kritisiert.

Hewish und Bell hatten die Signale zunächst für Störungen und dann auch für mögliche Signale einer außerirdischen Zivilisation gehalten, die ähnlich einem Leuchtturm regelmäßig ihre Lebenszeichen ins Weltall schickt. Doch diese Hoffnung zerschlug sich. Das Verhalten der Pulsare ließ sich mit »normaler Physik« erklären, die allerdings an äußerst extreme Bedingungen angepasst werden musste. Deshalb gehören Neutronensterne noch heute zu den interessantesten Himmelsobjekten.

Unter anderem untersucht ein spezielles Teleskop auf der Internationalen Raumstation ISS die von Pulsaren emittierte Röntgenstrahlung, um Informationen über den Aufbau dieser grandiosen Leuchttürme zu gewinnen. Damit gelang es 2019 erstmalig, den Radius eines Neutronensternes direkt zu messen. Man vermutet auch, dass sich im Innern von Neutronensternen die Elementarteilchen noch weiter auflösen und die dabei entstehenden Quarks mit den Wechselwirkungsteilchen *Glukonen* eine Art Quarkmaterie bilden. Nachgewiesen ist das allerdings noch nicht. Die NASA-Mission NICER (Neutron star Interior Composition Explorer) will unter anderem genau das klären.⁵²

Neben den regelmäßigen Pulsar-Signalen gibt es aber auch kurzzeitige Ausbrüche von Radiostrahlen, die *Fast Radio Bursts* (FRBs), deren Ursache aber bisher unbekannt ist. Der erste Ausbruch dieser Art wurde 2001 in Australien aufgenommen, doch erst fünf Jahre später beim Durchforsten der alten Messdaten entdeckt.⁵³ Mittlerweile hat man

mehr als hundert solche Ereignisse mit Radioteleskopen beobachtet. Jedoch ist nach einigen Millisekunden alles vorbei. Auch hier gab es Spekulationen, ob nicht irgendwelche Aliens Explosionen gewaltigen Ausmaßes verursachen. Doch das ist eher unwahrscheinlich. Manches deutet darauf hin, dass auch hier Neutronensterne eine Rolle spielen. Gewiss ist aber nichts.

Noch unvorstellbarer als in Neutronensternen werden die Verhältnisse, wenn Sterne kollabieren, die um ein Vielfaches schwerer als unsere Sonne sind. Die Massen werden dann auf so engem Raum konzentriert, dass dadurch entsprechend der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie die Raumzeit massiv verzerrt wird. Nicht einmal Licht kann diesen Gebilden entkommen. Sie erscheinen daher komplett schwarz und heißen folgerichtig *Schwarze Löcher*. Bevor wir uns mit diesen merkwürdigsten Himmelsobjekten befassen, bleiben wir zunächst noch etwas bei den »normalen« Sternen. Sie faszinieren allein durch ihren Anblick. Doch wenn man sich etwas näher mit ihnen beschäftigt, dann kann man Mark Aurel zustimmen. In seinen »Meditationen« schreibt er: »Blicke oft zu den Sternen empor – als wandeltest Du mit ihnen. Solche Gedanken reinigen die Seele von dem Schmutz des Erdenlebens.«⁵⁴