

# 2

## Höllenfeuer und Eiseskälte: Extreme der Temperatur

Verglichen mit den anderen Planeten des Sonnensystems ist die Erde ein recht gastfreundlicher Ort. Schließlich wimmelt es auf ihr von Lebensformen, für die es weder zu kalt noch zu heiß sein darf. Aber jeder, der einmal im Sommer in der australischen Wüste war oder eine Winternacht in Kanada verbracht hat, weiß, dass selbst auf unserem „perfekt justierten“ Heimatplaneten die Spanne der Oberflächentemperaturen enorm ist und weit über jene enge Komfortzone hinausreicht, die wir empfindliche Menschen bequem ertragen können. Die Extreme auf der Erde reichen von 57°C, die 1913 in Death Valley in Kalifornien verzeichnet wurden, bis zu markdurchdringenden – 93,2°C bei einer Messung in der Antarktis, die am 10. Dezember 2013 gemeldet wurde. Und natürlich ist es im Erdinneren weit heißer als irgendwo an der Oberfläche, während die Erdatmosphäre in großen Höhen deutlich kälter ist.

Aber die rauesten Klimabedingungen, die die Erde zu bieten hat, sind nichts verglichen mit dem, was sich draußen im Weltall findet. In den tiefen Weiten des Kosmos gibt es Orte, die Billionen Mal heißer sind als die heißeste Sauna, und andere Orte, die so kalt sind, dass im Vergleich

dazu Toronto an Heiligabend geeignet für ein Strandpicknick erscheint.

## Heiß und versteckt

Überlegen wir zunächst, was „heiß“ und „kalt“ eigentlich bedeutet.

Materie in ihren gewöhnlichen Formen (fest, flüssig oder gasförmig) besteht aus Atomen und Molekülen. In einem Festkörper werden die Atome oder Moleküle starr an ihrem Platz gehalten, ähnlich wie die verzahnten Teile eines Puzzles. In einer Flüssigkeit können sich die Teilchen bewegen, hängen aber immer noch in großen Gruppen aneinander. Und in einem Gas ist jedes Atom und Molekül unabhängig von den anderen und kann sich nach Belieben bewegen, wohin es möchte.

Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen gemein ist jedoch, dass die Atome und Moleküle, aus denen sie bestehen, unaufhörlich zittern und zappeln. In einem Festkörper bleibt jedes Teilchen in der Nähe seines angestammten Platzes, zittert dabei aber hin und her. (Man stelle sich ein Puzzle vor, bei dem die Teile nicht perfekt ineinander passen; jedes Teilchen kann sich ein wenig hin und her bewegen, verlässt aber seinen Platz nicht.) In einer Flüssigkeit oder einem Gas tanzen die Teilchen wie verrückt in alle Richtungen, wie ein außer Kontrolle geratenes Auto beim Autoskooter.

Was wir unter Temperatur verstehen, ist die Geschwindigkeit dieses Zitterns und Vibrierens auf mikroskopischer Skala. Ganz gleich, ob etwas fest, flüssig oder gasförmig ist, können diese zufälligen Zitterbewegungen langsam und

sanft sein – oder wahnsinnsschnell. Wenn die Bewegungen der Atome oder Moleküle langsam sind, ist das Objekt kalt; sind die Bewegungen schnell, ist es heiß. Wenn etwas abkühlt, verlangsamen die Teilchen ihre Bewegungen zu einem sanften Walzer; wird das Objekt erhitzt, starten sie einen rasenden Kosakentanz.

Das bedeutet nun, dass es für die Temperatur keine Obergrenze gibt: Erhitzt man etwas immer mehr, rasen die Teilchen im Inneren immer schneller umher. Mit diesem Bild vor Augen können wir jetzt die Frage stellen, wie heiß das Universum werden kann.

Beginnen wir mit der Sonne, einer riesigen brennenden Kugel aus Gas, die so heiß und gewaltig ist, dass man sie noch nicht einmal mit bloßem Auge anschauen kann. Die Sonne hat an der Oberfläche eine Temperatur von  $5500^{\circ}\text{C}$ , was zwar heiß ist, aber nicht unvorstellbar heiß. Die Sonnenoberfläche ist etwa fünfmal heißer als die Flamme einer Kerze oder doppelt so heiß wie die Flamme eines Schweißbrenners.  $5500^{\circ}\text{C}$  reichen aus, um Wolfram zu schmelzen, aber nicht, um es zum Kochen zu bringen.

Es gibt aber andere Sterne, die viel heißer als die Sonne sind.

Wir wissen alle, dass ein Metallstück zu glühen anfängt, wenn man es erhitzt. Ein Schüreisen im Feuer leuchtet orange oder rot, während der Wolframdraht einer konventionellen Glühbirne gelb oder weiß glüht, wenn er auf einige Tausend Grad erhitzt wird. Unsere Beispiele verweisen auf einen universellen Prozess, der zuerst vom deutschen Physiker Max Planck genau beschrieben wurde: Praktisch jedes Objekt (ob auf der Erde oder im All) strahlt Licht aus, dessen Farbe von seiner Temperatur abhängt.

Diesen Effekt, der durch das Plancksche „Gesetz der Schwarzkörperstrahlung“ beschrieben wird, beobachten wir, wenn wir die verschiedenen Farben der Sterne untersuchen. Unsere Sonne ist ein recht durchschnittlicher Stern. Ihre Oberflächentemperatur von  $5500^{\circ}\text{C}$  ergibt ein gelbliches Licht, genau wie es Plancks Gleichungen vorhersagen.

Beteigeuze, ein heller Stern im Sternbild Orion, ist viel kälter: Auf der Oberfläche herrschen etwa  $3800^{\circ}\text{C}$ , weswegen der Stern eine selbst mit dem bloßen Auge gut erkennbare rötliche Färbung hat. Der hellste Stern am Nachthimmel, Sirius (auch als „Hundsstern“ bekannt), hat dagegen eine Oberflächentemperatur von etwa  $10.000^{\circ}\text{C}$ , was ihm seinen bläulichen Schimmer gibt.

Es gibt aber auch Sterne, die man mit dem bloßen Auge nicht sehen kann, die noch viel heißer als Sirius sind. Wie wir etwas später in diesem Kapitel sehen werden, findet das wirkliche Geschehen tief im Kern eines Sterns statt, wo Fusionsprozesse wüten und über Milliarden von Jahren hinweg die gesamte Wärme und das Licht eines Sterns erzeugen. Aber wenn ein gewöhnlicher Stern schließlich seinen gesamten Brennstoff verbraucht hat, bläst er große Teile seiner äußeren Schichten in einer sich langsam ausdehnenden Gashülle davon, und der zentrale Kern liegt frei. In diesem Kern, einer kleinen und dichten Kugel aus Helium, Kohlenstoff und schwereren Elementen, findet zwar keine Fusion mehr statt, es ist aber dort noch immer unglaublich heiß. Diese verbliebene Glut macht den Stern zu einem „Weißen Zwerg“, zu einem der heißesten Sterne des Universums, der so heiß ist, dass er den umgebenden Schleier aus weggeblasenem Gas erleuchtet und dadurch ein exquisites Leuchten erzeugt, das als „planetarischer Nebel“ bezeichnet wird.

Wie heiß ist ein solch neu entstandener Weißer Zwerg? Der aktuelle Rekordhalter befindet sich im Herzen eines schönen planetarischen Nebels. Diese glühende Gaswolke, von Astronomen als „NGC 6537“ bezeichnet, aber besser bekannt als „Red-Spider-Nebel“ (Rote Spinne), befindet sich in etwa 2000 Lichtjahren Entfernung im Sternbild Schütze. (Ein Lichtjahr ist die Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegt: knapp 10 Billionen km. 2000 Lichtjahre sind also rund 20.000 Billionen km!)

Während des gesamten 20. Jahrhunderts entging der Weiße Zwerg im Zentrum des Red-Spider-Nebels seiner Entdeckung. Es gibt zwei Gründe, weshalb solche Sterne so schwer zu sehen sind. Erstens sind es winzige Objekte, die im Zentrum von leuchtenden und sehr hellen Wolken in ihrer Umgebung vergraben sind. Die Helligkeit und Komplexität der planetarischen Nebel verbirgt häufig den zentralen Stern vor unserem Blick.

Paradoxerweise ist der zweite Grund, dass gerade die extreme Hitze den Stern fast unsichtbar macht. Wie wir oben gesehen haben, sagt uns das Plancksche Gesetz der Schwarzkörperstrahlung, dass die Farbe eines Objekts von seiner Temperatur bestimmt wird. Was geschieht aber, wenn ein Stern noch heißer ist als der blaue Sirius mit seinen  $10.000^{\circ}\text{C}$ ? Das Plancksche Gesetz gilt natürlich auch dann, aber das resultierende Leuchten hat eine Farbe, die jenseits des Bereichs liegt, den unser Auge oder ein gewöhnliches Teleskop wahrnehmen kann. Das Licht von Objekten, die viel heißer als Sirius sind, strahlt im ultravioletten Bereich oder gar im Bereich der Röntgenstrahlung. Die Beziehung der Temperatur zur Farbe der Strahlung nach dem Gesetz der Schwarzkörperstrahlung besagt, dass scheinbar

so unterschiedliche Phänomene wie UV-Licht und Röntgenstrahlen einfach nur Teile des breiten „elektromagnetischen Spektrums“ sind, das somit einen riesigen Bereich verschiedener Farben umfasst, der weit über das schmale Band hinausgeht, das wir mit unseren Augen sehen können.

Weißer Zwerge sind also tief im Inneren ihrer planetarischen Nebel vergraben und sind so heiß, dass sie nur wenig sichtbares Licht, stattdessen vorwiegend Licht im UV- und Röntgenbereich des Spektrums aussenden. Daher ist es nicht überraschend, dass der superheiße Stern im Zentrum des Red-Spider-Nebels viele Jahrzehnte unentdeckt blieb. Dies änderte sich erst 2005, als Mikako Matsuura und ihre Kolleginnen und Kollegen das leistungsstarke Hubble-Weltraumteleskop, das sich in einer Umlaufbahn außerhalb der Erdatmosphäre befindet, dazu nutzten, einen winzigen Lichtfleck zu identifizieren, der dem Weißen Zwerg im Herzen des Red-Spider entsprach. In dieser und folgenden Studien gelang es Astronomen, Präzisionsmessungen der Farbe des Sterns durchzuführen und dann unter Anwendung des Planckschen Gesetzes der Schwarzkörperstrahlung dessen Temperatur zu berechnen.

Das Ergebnis war frappierend: Die Oberflächentemperatur des Sterns im Zentrum des Red-Spider-Nebels beträgt unglaubliche 300.000 °C. Damit ist er mehr als 50 Mal heißer als die Sonne und 30 Mal heißer als der mächtige Sirius.

Dieser faszinierende Stern mit seiner extremen Temperatur und dem spektakulär leuchtenden Nebel, der ihn umgibt, ist nicht nur von akademischem Interesse: Wenn wir auf den Red-Spider-Nebel blicken, sehen wir unser eigenes zukünftiges Schicksal! In etwa 5 Mrd. Jahren wird auch der

Sonne ihr Brennstoff ausgehen, und sie wird auf ähnliche Weise ihre äußeren Schichten abstoßen. Alles, was von unserem Stern und unserem Sonnensystem übrig bleiben wird, ist ein schöner planetarischer Nebel, angestrahlt von einem immens heißen Weißen Zwerg in seinem Zentrum.

## Der nukleare Brennofen

Sterne mögen hohe Temperaturen an ihrer Oberfläche haben, aber die feurige Hölle in ihrem Inneren ist unvorstellbar heißer. Unsere Sonne, ein durchschnittlicher und wenig bemerkenswerter Stern, stellt uns die Wärme und das Licht zur Verfügung und ermöglicht so Leben. Verglichen mit anderen Sternen mag sich die Sonne bescheiden ausnehmen, aber sie ist immer noch ein beeindruckendes Monster.

Die Sonne wiegt etwa 2.000.000.000.000.000.000.000.000 t (das ist etwa 330.000 Mal mehr als unsere Erde) und misst etwa 1.400.000 km im Durchmesser. Das Gas im Kern der Sonne besteht zu etwa 39 % aus Wasserstoff und zu 60 % aus Helium. Das verbleibende 1 % setzt sich aus kleinen Mengen Kohlenstoff, Sauerstoff, Silizium, Eisen und anderen schwereren Elementen zusammen. (Tatsächlich ist fast jedes bekannte Element in der Sonne in einer gewissen Menge nachgewiesen worden. Selbst von Elementen wie Silber, Gold und Uran wurden Spuren in der Sonne gefunden.)

Als die Sonne vor 4,6 Mrd. Jahren ihr Leben begann, war die Zusammensetzung ihres Kerns ganz anders als heute: Vermutlich bestand er aus 72 % Wasserstoff, 27 % Helium und einem Rest von 1 %. Diese massive Veränderung in

der Zusammensetzung des Kerns während der Lebensdauer der Sonne, also die Abnahme des Wasserstoffs von 72 % auf heute 39 %, gibt uns einen wichtigen Hinweis auf die extremen Vorgänge im tiefen Inneren der Sonne. Sie verrät uns, dass die Wärme und das Licht der Sonne aus einem Fusionsprozess stammen, bei dem Wasserstoff ständig in Helium verwandelt wird. Dabei werden große Mengen Energie freigesetzt. Auf dem gleichen Prozess beruht auch die zerstörerische Kraft der Wasserstoffbombe, nur läuft er bei der Sonne in einem weit größeren Maßstab ab.

Wie der Begriff schon erahnen lässt, vereinigen sich bei der Fusion Atomkerne – im Fall der Sonne sind es zunächst zwei Wasserstoffatomkerne, also Protonen. So etwas kann aber nicht so einfach geschehen, da die Protonen eine positive elektrische Ladung tragen, und zwei positive Ladungen sich vehement gegenseitig abzustößen versuchen, wenn sie nahe aneinander gebracht werden. Nur wenn die beiden Protonen so nahe aneinander geraten, dass sie sich praktisch berühren, verbinden sie sich miteinander und bilden Helium.

Der Trick besteht darin, die beiden Protonen so schnell wie möglich zusammenzubringen. Nähern sie sich nur langsam einander an, bleibt genug Zeit, damit ihre abstoßende Kraft wirksam wird und für die Trennung sorgt. Bewegen sie sich jedoch mit hoher Geschwindigkeit aufeinander zu, kann sie ihre gegenseitige elektrische Abstoßung nicht ausreichend abbremsten, um einen Zusammenstoß zu verhindern.

In der Sonne wird dies wie in einer Wasserstoffbombe erreicht, indem der Wasserstoff auf außergewöhnlich hohe Temperaturen erhitzt wird. Bei einer so hohen Temperatur



fliegen die Wasserstoffkerne mit enormen Geschwindigkeiten umher und ermöglichen die Fusion, weil sie mit einer derart hohen Geschwindigkeit zusammenstoßen.

Berechnungen zeigen, dass die für diese Reaktion erforderliche Temperatur im Kern eines Sterns etwa 5.000.000 °C beträgt. Bei dieser Temperatur verdampfen alle festen Stoffe und Flüssigkeiten zu Gas, alle Moleküle zerfallen zu einzelnen Atomen, und die Elektronen werden all diesen Atomen entrissen und lassen die Atomkerne entblößt zurück.

Diese Temperatur von 5.000.000 °C stellt das Minimum dar, bei dem ein Stern mittels eines Fusionsprozesses strahlen kann. Die Sonne ist aber noch heißer, sie hat eine Kerntemperatur von etwa 15.000.000 °C! Und wie oben erwähnt ist die Sonne kein besonders bemerkenswerter Stern. Schwerere Sterne erzeugen in ihren Kernen weit höhere Temperaturen – bis zu 50.000.000 °C.

Der Zeitabschnitt, in dem ein Stern in seinem Kern Wasserstoff in Helium verwandelt, wird in dem bekannten Schema der Sterngeschichte als „Hauptreihenphase“ bezeichnet und umfasst den Großteil des Sternenlebens. Die Sonne hat etwa die Hälfte ihrer Hauptreihenphase durchlaufen und hat dort noch etwa 5 Mrd. Jahre zu verbringen. Wesentlich schwerere Sterne, die heller leuchten und ihren Brennstoff schneller verbrennen, durchlaufen die Hauptreihe 1000 Mal schneller.

Wenn ein Stern den gesamten Wasserstoff in seinem Kern in Helium verwandelt hat, enden die Fusionsreaktionen, und der Stern fängt an, unter altersbedingten Gesundheitsproblemen zu leiden. Im Prinzip könnte das Helium, das sich jetzt im Kern befindet, weiter zu schwereren Elementen verschmelzen. Da aber der Kern des Heliumatoms

verglichen mit dem des Wasserstoffatoms eine doppelte positive Ladung hat, ist die elektrische Abstoßung zwischen zwei Heliumkernen viel stärker als zwischen zwei Wasserstoffkernen: Selbst bei den außergewöhnlichen Temperaturen im Zentrum des Sterns findet keine Heliumfusion statt.

Nachdem seine Wärmequelle erloschen ist, beginnt der Kern des Sterns unter seiner eigenen Schwerkraft zu kollabieren, wird dadurch kleiner, dichter und noch heißer. Der Stern wird zu einem „Roten Riesen“ (mehr darüber in Kap. 5). Schließlich erreicht die Temperatur des Kerns 100.000.000 °C, und damit eine Temperatur, bei der sich auch die Heliumteilchen schnell genug bewegen, um beim Zusammenstoß zu Kohlenstoff zu verschmelzen. Der Stern kann ein zweites Mal „Luft holen“ und erreicht eine Phase relativer Stabilität: Er befindet sich nun auf dem „Horizontalast“ der Sternentwicklung.

Aber irgendwann ist unweigerlich auch das Helium aufgebraucht. Für einen Stern wie die Sonne bedeutet das schon fast das Ende. Der Kern wird weiter komprimiert und aufgeheizt, aber die Masse reicht nicht aus, um weitere Fusionen auszulösen. Eine Reihe komplizierter Zuckungen beginnt, die schließlich dazu führen, dass die äußeren Schichten des Sterns fortgeblasen werden und einen wunderschön leuchtenden planetarischen Nebel wie den Red-Spider-Nebel bilden. Was einmal der Kern des Sterns war, bleibt als Weißer Zwerg zurück. Die unglaublich heiße, langsam abkühlende, dichte Glut ist alles, was vom zentralen Triebwerk übrigbleibt.

Für Sterne, die schwerer als die Sonne sind, ist aber das Spiel noch nicht aus. Sobald sämtliches Helium zu Koh-

Kosmos xxxtrem!

Eine Reise zu den größten, schnellsten, hellsten,  
heißesten, schwersten, dichtesten und ältesten  
Objekten im ganzen Universum

Gaensler, B.

2015, XII, 266 S. 1 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-662-43391-1