

# Die heißen äußeren Schichten der Sonne

von Peter Ulmschneider

*Die Sonne und auch andere Sterne sind in ihren äußeren Schichten von einer heißen Hülle, der Korona umgeben. Sie hat eine extrem geringe Dichte und sehr hohe Temperaturen. Ihre Form und Struktur ist von der Sonnenaktivität abhängig. Aus der Sonnenkorona fließt ständig heißes Gas (Sonnenwind) in den interplanetaren Raum.*

## Komponenten und Temperatur der Sonnenkorona

Schon in der Antike wunderte sich der interessierte Beobachter über die bei einer Sonnenfinsternis sichtbare Korona (Krone) der Sonne, eine weiße, sich über mehrere Sonnenradien erstreckende, ausgedehnte faserige Hülle um die vom Mond abgedeckte Sonnenscheibe (Photosphäre). Verglichen mit der Intensität in der Mitte der Sonnenscheibe ist die der Korona am Sonnenrand (d. h. in der Entfernung  $r$  von einem Sonnenradius  $R_{\odot}$ ) um einen Faktor  $10^6$  kleiner, fällt bei  $r = 2 R_{\odot}$  um einen weiteren Faktor 100 und bis  $r = 5 R_{\odot}$  nochmals um einen Faktor 10 ab. Wie man heute weiß, rührt das Leuchten der Korona von dem am dünnen Koronamaterial gestreuten intensiven Licht der verdeckten Photosphäre der Sonne her. Es besteht aus zwei Hauptkomponenten. Die Streuung an den sich schnell und ungeordnet bewegenden Elektronen verschmiert das photosphärische Spektrum in ein Kontinuum, die *K-Korona*, während bei der Streuung an den massiven, sich langsam bewegenden Staubteilchen das photosphärische Linienspektrum (Fraunhoferspektrum) erhalten bleibt, die *F-Korona*. Bei zunehmender Entfernung von der Sonne überwiegt immer mehr der Anteil der *F-Korona*.

Eine dritte Komponente des Leuchtens der Korona ist die *E-Korona*, die aus einer Reihe von Emissionslinien besteht, von denen die grünen und roten Koronallinien die hellsten sind. Die bei weitem stärkste grüne Koronallinie bei 530,3 nm rührt von Fe XIV her, die rote bei 637,5 nm von Fe X. Die Identifikation dieser Linien gelang erst 1941 durch W. Grotrian und B. Edlén, und die Anwesenheit von 9 und 13-fach ionisiertem Eisen bewies eindeutig, dass die Korona ein bis zu 6 Millionen Grad heißes Gas darstellt. Die hohe Temperatur des koronalen Gases bewirkt, dass die

Bewegungsenergie der Elektronen so groß ist, dass sie mühelos 9 bis 13 gebundene Elektronen aus dem Eisenatom herauszuschlagen kann. Da die Oberflächentemperatur der Sonne ca. 6.000 K beträgt, hat man das erstaunliche Ergebnis, dass die Sonne von einer 1000 mal heißeren Hülle rings umschlossen ist. Es treten dort Temperaturen auf, die fast so hoch sind wie die Zentraltemperatur des Sonnenkernes, in dem Kernfusionsprozesse die Energie der Sonnenstrahlung erzeugen.

Die 1941 entdeckte hohe Temperatur der Sonnenkorona erklärte auf einen Schlag eine Reihe von Rätseln. Noch in der 1938 erschienenen Erstauflage des Lehrbuches „Physik der Sternatmosphären“ von A. Unsöld wurde intensiv über das Problem nachgedacht, wie das Koronagas in so große Höhe über die Sonnenoberfläche gelangen konnte. Bei einer Oberflächentemperatur von  $T = 5.700$  K hat man nämlich eine Skalenhöhe von nur 140 km. Die Skalenhöhe ist die Höhendistanz, bei der die Gasdichte um einen Faktor  $e = 2.7$  abfällt. Damit hätte man im Abstand von  $r = 2 R_{\odot}$  (d. h. 700.000 km, über der Sonnenoberfläche) einen Dichteabfall um den phantastischen Faktor  $10^{-2171}$  ( $2171 = 700.000 \cdot \log e / 140$ ), d. h. bei einer Gasdichte von  $10^{17}$  Teilchen an der Sonnenoberfläche dürfte dort überhaupt keine Materie mehr vorhanden sein. In Unsölds Buch half man sich damals mit gewagten Spekulationen über das Wirken des Strahlungsdruckes. Die hohe Temperatur brachte mit einem Schlag die Lösung: Die Skalenhöhe betrug nun 150.000 km, und die Gasdichte fiel wesentlich weniger stark nach außen hin ab. Dieser schwache Abfall setzt sich übrigens zu größeren Distanzen hin weiter fort, so dass wir in Erdentfernung noch ein Gas mit  $T = 200.000$  K vorfinden, bei einer Dichte von 5 Teilchen/cm<sup>3</sup>. Auch das starke Verschmieren des Fraunhoferspektrums in der K-Korona konnte nun

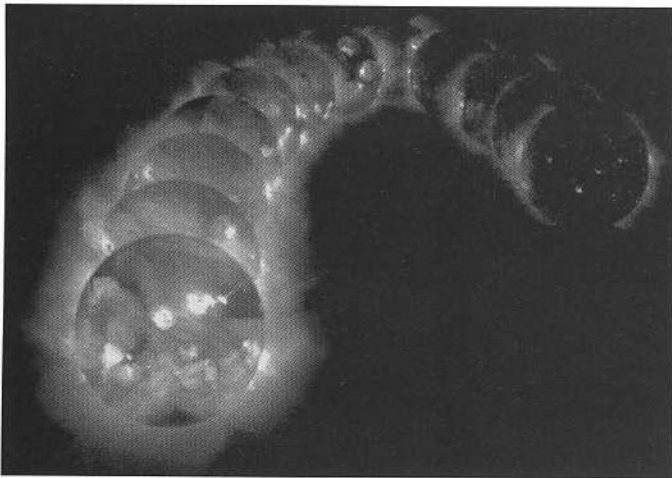
auf die starke Bewegung eines Millionen K heißen Elektronengases zurückgeführt werden, wie auch die Tatsache, dass das Koronagas so viele freie Elektronen besitzt, anstatt aus kaltem neutralem atomarem oder molekularem Wasserstoff zu bestehen.

Wie häufig in den Naturwissenschaften führte die Klärung einer Reihe ungewöhnlicher Beobachtungstatsachen zu weiteren Problemen. Einmal, warum ist die Sonne – seit Milliarden Jahren von einer geschlossenen, tausend mal heißeren Korona umgeben – nicht bereits ebenfalls auf diese hohe Temperatur aufgeheizt worden? Zum zweiten, wie kommt es überhaupt zu solch hohen Temperaturen in den äußeren Sonnenschichten? Welche Mechanismen bewirken diese starke Aufheizung? Während man die erste dieser Fragen heute beantworten kann, ist die zweite trotz intensiver Forschung bis heute noch ungeklärt. Ja, man weiß noch nicht einmal, ob die Heizung von magnetischen Wellen herrührt oder von einer direkten Dissipation von Magnetfeldern.

## Koronen bei anderen Sternen

Bevor wir die Heizungsfrage der Korona genauer besprechen, soll zuerst die Frage erörtert werden: Haben auch andere Sterne Koronen, oder ist die Sonne ein Einzelfall? Eine Reihe von seit dem Ende der 80er Jahre gestarteten Satelliten, wie der IUE-Satellit, der EINSTEIN-Satellit und ROSAT haben gezeigt, dass wahrscheinlich alle Sterne heiße Hüllen, so genannte *Chromosphären*, besitzen. Eine Chromosphäre ist eine dünne (bei der Sonne etwa 2.000 km dicke) Hülle um den Stern, in der die Temperatur von der Sternoberfläche nach außen hin auf Werte von etwa  $T = 10.000$  K anwächst. Diese Schichten kann man durch die aus ihnen stammende Emission im ultravioletten Spektralbereich nachweisen. Für den einzigen Sterntyp (aus den Spektralklassen O, B, A, F, G, K, M) bei dem man noch keine UV-Emission nachgewiesen hat, den A-Sternen, bestehen gewichtige theoretische Gründe, warum auch solche Sterne sehr dünne Chromosphären besitzen.

Die Koronen als Millionen K heiße Hüllen überlagern die Chromosphären, wobei zwischen Chromosphäre und Korona ei-



**Bild 1:** Die wechselhafte Korona im Laufe von 4 Jahren, aufgenommen im Röntgengebiet vom YOKO-Satelliten.

ne dünne, bei der Sonne nur einige 100 km dicke *Übergangsschicht* besteht, in der die Temperatur von 10.000 auf Millionen K anwächst. Zusätzlich zu den oben beschriebenen Emissionen der Korona im sichtbaren Spektralbereich (K, F, E-Korona) senden Koronen intensive Radiostrahlung und vor allem Röntgenstrahlung aus. Wie mit Satelliten durchgeführte Röntgen-Beobachtungen gezeigt haben, besitzen mit wenigen Ausnahmen fast alle Sterne auch Koronen. Sterne die keine Koronen haben, sind rote Riesensterne jenseits der so genannten *Linsky-Haisch-Trennlinie* und sehr wahrscheinlich A-Sterne. Da der weitaus überwiegende Teil aller Sterne F-, G-, K- und M-Hauptreihensterne sind, wird deutlich, dass das Phänomen Korona eine typische und normale Eigenschaft eines Sternes darstellt. Wie können wir dieses Phänomen erklären?

## Eigenschaften der Korona

Zunächst ist klar, dass Koronen, wie auch Chromosphären, Phänomene sind, die vom Inneren der Sterne her verstanden werden müssen. Von der Theorie her reichen genau drei Parameter aus, um einen Einzelstern wie die Sonne eindeutig zu beschreiben: Das sind die Masse, die anfängliche chemische Zusammensetzung (die Sonne ist ein so genannter Populations-I-Stern) und das Alter. Eine weitere wichtige Größe, die Rotationsrate, ist eine Funktion des Alters, denn alle der Sonne vergleichbar alten Sterne rotieren ähnlich langsam (z. B. in 27 Tagen) um ihre Achse. Die Korona müsste also, wenn wir ihre physikalische Logik verstanden hätten, durch die Angabe dreier Parameter eindeutig festgelegt sein.

Bild 1 zeigt die Sonnenkorona im Laufe von 4 Jahren (im Abstand von jeweils 120 Tagen), aufgenommen im Röntgengebiet bei 1 nm, vom japanischen Röntgensatelliten YOHKOH. Ähnlich schöne Bilder der Sonnenkorona erhält man übrigens auch neuerdings von dem europäischen SOHO-Satelliten. Auf dem Bild 1 sind folgende Eigenschaften deutlich zu erken-

nen: Die Röntgenemission ist sehr ungleichmäßig über die Sonnenoberfläche verteilt, an manchen Stellen, den *aktiven Gebieten*, hat man eine sehr starke Emission, an anderen, den *coronal holes*, hat man dagegen fast keine. Man weiß heute, dass diese Ungleichmäßigkeit der Emission von Magnetfeldern herrührt. Die coronal holes sind Gebiete, in denen die Magnetfelder von der Sonnenoberfläche bis in den Weltraum hinaus reichen, man nennt dies offene Gebiete. In diesen Gebieten fließt Millionen Grad heißes Gas von der Sonne in den interplanetaren Raum ab. Diese Gasströmung bildet den *Sonnenwind*. Die hellen, aktiven Gebiete stellen geschlossene Magnetfeldregionen dar, in denen das Feld einen bogenförmigen Verlauf hat, wobei die beiden Fußpunkte in der Sonnenoberfläche verankert sind. In diesen als *coronal loops* bezeichneten Bögen treten um ein vielfaches höhere Temperaturen auf als in den coronal holes.

Bild 1 zeigt noch eine weitere deutliche Eigenschaft der Korona, ihre starke Variation mit dem 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus (von dem man hier etwas weniger als einen halben Zyklus sieht). Diese zyklische Eigenschaft kennt man seit langem aus den Beobachtungen im sichtbaren Licht bei Sonnenfinsternissen, wo man im Fleckenminimum eine auf die Äquatorregion begrenzte typische *Minimumkorona* beobachtet, im Fleckenmaximum dagegen die in alle Richtungen ausgedehnte *Maximumkorona* (siehe auch Bild 1). Schon seit dem 17. Jahrhundert hat man Aufzeichnungen über die Anzahl der Sonnenflecken und fand bald den genannten, ziemlich regelmäßigen Fleckenzyklus. Da Sonnenflecken Gebiete mit starkem Magnetfeld sind, ist es nicht verwunderlich, dass die magnetische Aktivität der Korona mit dem Auftreten der Sonnenflecken korreliert ist.

Die Frage, warum die Sonne überhaupt Magnetfelder besitzt, ist sicher ein Problem das man lösen muss, wenn man die Korona verstehen will. Eines ist dabei klar: Das Magnetfeld der Sonne ist keinesfalls fossil, d. h. es stammt nicht von ihrer Geburt aus dem *interstellaren Medi-*

*um*. Diese fossilen Felder hat die Sonne längst verloren. Heute weiß man, dass die Magnetfelder vom *Dynamo-Mechanismus* erzeugt werden, bei dem zwei Eigenschaften entscheidend sind: die Rotation der Sonne und die Tatsache, dass die Sonne eine *Konvektionszone* hat. Die Konvektionszone, deren äußeren Rand man als Granulationszellen im sichtbaren Licht auf der Sonnenoberfläche beobachtet, reicht bis zu einem Drittel des Sonnenradius (d. h. bis 210.000 km) in die Tiefe. In dieser Zone, die man inzwischen sehr gut berechnen und mittels der *Helioseismologie* auch gut beobachten kann, findet der Transport der im Kern der Sonne erzeugten Energie mittels aufsteigender Gasblasen statt. Dieses Aufsteigen von Blasen erzeugt in dem rotierenden Stern helikale Gasströmungen und damit Magnetfelder. Die diesen Prozess beschreibende Dynamotheorie ist leider zur Zeit noch nicht weit genug ausgebaut, um sichere Vorhersagen zu machen, dürfte aber in einigen Jahrzehnten so weit entwickelt sein, dass das Auftreten von Magnetfeldern, von Sonnenflecken und des Fleckenzyklus detailliert simuliert werden kann. Die lokale Variabilität der Magnetfelder wird dabei auf die stochastischen Eigenschaften der Konvektion zurückgeführt.

## Zur Aufheizung der Korona

Das Bestehen von Magnetfeldern erklärt aber weder, warum die Korona heiß ist, noch warum die coronal loops so intensiv emittieren und warum in coronal holes der Sonnenwind abgetrieben wird. Es lässt sich ja auch eine von Magnetfeldern durchsetzte kalte äußere Sonnenhülle denken, die im UV- und Röntgenbereich nicht emittiert und keinen Sonnenwind produziert. Was heizt also die äußeren Schichten auf?

Zunächst einige grundlegende Überlegungen zum Strahlungstransport in der Sonne. In der sichtbaren Sonnenoberfläche, der Photosphäre, wird die Energie nicht mehr durch Konvektion (aufsteigende Gasblasen) transportiert, sondern durch Strahlung. Strahlungstransport funktioniert derart, dass in einer tieferen Schicht eine höhere Temperatur herrscht als in einer weiter außen liegenden Schicht. Dadurch werden heiße energiereiche Photonen nach außen, kalte energiearme nach innen befördert. An der Oberfläche hat jeder Stern also eine geringere Temperatur ( $T = 5.700$  K, bei der Sonne) als im Sterninneren. In den weiter außen liegenden Schichten der Chromosphäre und Korona müsste also nach dieser auf reinem Strahlungstransport beruhenden Vorstellung die Temperatur weiter abfallen. So stellte man sich Sterne vor Grotrian und Eddlön vor.

Seit der Entdeckung der heißen äußeren Hüllen der Sterne weiß man aber, dass es einen weiteren aus dem Sonneninnern



stammenden Energiefluss geben muss, den man *mechanischen Energiefluss* nennt, der, neben dem konvektiven *Energiefluss* und dem *Strahlungsfluss*, Energie aus dem Sonneninneren nach außen bringt. Man stellt sich vor, dass dieser mechanische Fluss Energie in die äußeren Schichten transportiert, sie zu den hohen Temperaturen aufheizt und in den offenen Gebieten den Sonnenwind abtreibt. Die besonders hohe Temperatur der coronal loops rührt nach dieser Vorstellung daher, dass die gesamte mechanische Energie in Heizung übergeht, während in den kühleren coronal holes ein erheblicher Teil in das Abtreiben des Windes gesteckt wird. Dass eine äußere heiße Schicht eine innere viel kühlere Sternoberfläche nicht aufheizt, liegt an der Wärmekapazität. In der äußeren, sehr dünnen koronalen Gasschicht mit ca.  $10^8$  Teilchen/cm<sup>3</sup> steckt trotz hoher Temperatur nur sehr wenig Energie, sie kann die Sonnenoberfläche, wo Dichten von  $10^{17}$  Teilchen/cm<sup>3</sup> herrschen, nicht aufheizen. Das ist ähnlich wie bei der Erde, die von einem 200.000 K heißen Sonnenwind umflossen wird. Der Erde, wo typischerweise Dichten von  $10^{23}$  Teilchen/cm<sup>3</sup> bestehen, können die  $5$  Teilchen/cm<sup>3</sup> des Sonnenwindes nichts anhaben.

Die Mechanismen zu identifizieren, die für die Aufheizung der äußeren Schichten der Sonne verantwortlich sind, erweist sich als sehr schwierig. Hier hat die Kernfusionsforschung sehr geholfen, denn auch dort hat man das Problem, hohe Temperaturen zu erreichen. Im Laufe der letzten 50 Jahre ist eine Vielzahl von Heizungsmechanismen vorgeschlagen worden, die alle im Labor funktionieren, deren Existenz in den äußeren Sternhüllen jedoch nur sehr schwierig nachzuweisen ist. Man kann die Heizungsmechanismen in hydrodynamische und magneti-

sche Mechanismen einteilen. Die hydrodynamischen sind im Wesentlichen Schallwellen, während es bei den magnetischen Mechanismen Wellen (longitudinale magneto-hydrodynamische Röhrenwellen, Alfvénwellen, Oberflächenwellen) und Stromschichten gibt. Während Schallwellen und longitudinale Röhrenwellen durch Ausbildung von Stoßwellen heizen, dissipieren die anderen Wellentypen durch eine Vielzahl anderer Prozesse und die Stromschichten durch die Bildung von Mikroflares, d. h. von kleineren Verwandten der gigantischen, von der Sonne und vielen anderen Sternen bekannten, Flare-Ausbrüche. Alle erwähnten Heizungsformen kommen vor. Welche Heizungsform aber wo und mit welcher Intensität auftritt, ist unbekannt.

Erst in den letzten drei Jahren gelang es, wenigstens für die Chromosphäre, Schallwellen als wichtigsten Heizungsmechanismus nachzuweisen. Dieser Mechanismus funktioniert folgendermaßen: Die solare Konvektionszone erzeugt Schall, der sich in die äußeren dünnen Schichten des Sterns ausbreitet. Wie bei einer Meereswelle, die auf einen Strand zuläuft, wird dabei die Wellenamplitude immer größer, weil die sich ausbreitende Schwingungsenergie der Welle eine immer kleinere Materiemenge erfasst. Die stetig anwachsende Amplitude teilt sich zu Stoßwellen auf, deren Dissipation die Chromosphäre zu hohen Temperaturen aufheizt. Paradoxerweise konnte dieser grundlegende Mechanismus, trotz der Nähe der Sonne, erst durch Beobachtungen an anderen Sternen eindeutig identifiziert werden, da die heutigen Instrumente noch nicht in der Lage sind, den in Metern zu messenden Wirkungsbereich der verschiedenen Heizungsmechanismen aufzulösen. Die Beobachtung anderer Sterne erlaubte jedoch die grundlegenden Sternparame-

ter, Oberflächentemperatur, Schwerebeschleunigung, Metallgehalt, in weiten Bereichen zu variieren und so den Mechanismus eindeutig festzulegen.

Die Schallwellen heizen alle Oberflächengebiete gleichmäßig auf. Zusätzliche Heizung bringen die magnetischen Mechanismen. Auf der Sonne treten die Magnetfelder in Form von senkrecht aus der Oberfläche tretenden (trompetenartigen) Flussröhren auf. In diesen Röhren werden durch Quetschung und Schütteln verschiedene magnetische Wellentypen erzeugt, die ihre Energie in unterschiedlichster Weise in den höheren Schichten ablagern. Die Gasströmungen der Konvektionszone verweben dabei noch die Flussröhren zu komplizierten Gebilden, wobei Stromschichten entstehen. Durch die Dissipation (Mikroflares) der gespeicherten Energie können die kompliziert verwebenen magnetischen Gebilde durch Aufbruch von Feldlinien (Rekonstruktion) in Gebilde mit einfacherer Geometrie zurückverwandelt werden. Solche Vorgänge kann man erst jetzt mit den leistungsfähigsten Computern berechnen. Es besteht deshalb die Hoffnung, dass in absehbarer Zeit, durch massive Simulation der Konvektionszone und der darin enthaltenen Magnetfelder, die Heizung der Korona und die Abtreibung des Sonnenwindes auf die grundlegenden Parameter der Sterne zurückgeführt werden können, um so, wie es sein muss, die Korona und den Sonnenwind als wohldefinierte Komponenten eines Sternes verstehen zu können.

*Anschrift des Verfassers:*

**Prof. Dr. Peter Ulmschneider**, Institut für Theoretische Astrophysik, Tiergartenstraße 15, 69121 Heidelberg  
E-mail: [ulm@ita.uni-heidelberg.de](mailto:ulm@ita.uni-heidelberg.de).

Anzeige

## Ihre eigene Sternwarte...

können Sie mit einem Fernrohr von **KOSMOS Service** selbst verwirklichen! Ob Einsteigerfernrohr oder computergesteuertes Profigerät – jedes Fernrohr hat seinen Himmel.

Bei uns finden Sie ein umfangreiches Angebot an Teleskopen und Zubehör – und Sie bekommen eine kompetente Fachberatung rund um das faszinierende Hobby Astronomie.

**Unsere ausführlichen Astro-Gerätecataloge erhalten Sie gegen Voreinsendung von 5,- DM in Briefmarken bei**

**KOSMOS**  
SERVICE

Pfizerstraße 5-7  
70184 Stuttgart  
Tel. 0711 / 2191-267  
FAX 0711 / 2191-350

