

Die Aufheizung der Korona der Sonne und anderer Sterne

Karl-Otto Eschrich

Kurzfassung

Die hohe Temperatur der Sonnenkorona muss dort selbst erzeugt werden. Dafür bietet sich die Kernfusion an, ähnlich der im Inneren der Sonne, jedoch wegen der anderen Umgebungsbedingungen mit einem anderen Mechanismus. Er besteht im Grunde aus drei Stufen. Zuerst der Generation von Neutronen aus einem Beschleunigungsmechanismus in der Chromosphäre, sodann in der Korona durch die Verbindung dieser Neutronen mit den ausströmenden Protonen zu Schwerem Wasserstoff und letztlich der Fusion zweier dieser Isotope zu Helium (oder anderer Reaktionen).

Die Korona der Sonne ist mit bloßem Auge nur bei einer totalen Sonnenfinsternis sichtbar oder nicht mit weiteren Hilfsmitteln zu fotografieren. Bei den ersten Beobachtungen wurde vermutet, dass die Korona eine Art Überstrahlung des Mondes sei. Erst der Astrophysiker und Astronom Walter Grotrian vom Astrophysikalischen Observatorium in Potsdam stellte im Jahr 1929 zweifelsfrei fest, dass die sichtbare Korona ein Bestandteil der Sonne ist und stellte ihre Temperatur bei der Auswertung seiner Fotoplatten auf über eine Million Kelvin fest. Entscheidend sind hierbei nicht die Fotos der Korona direkt, sondern die Aufnahmen der Spektren mit den Spektrallinien. Damit wurde die Expedition in das Gebiet der totalen Sonnenfinsternis auf Sumatra ein weltweit überraschender Erfolg.

Die Gestalt der Korona ist Abhängig vom globalen Magnetfeld der Sonne in ihrem 22,4 jährigen Zyklus. Bei jedem zwischenzeitlichen Nulldurchgang beim Umpolen des einigermassen dipolartigem Magnetfeldes, kenntlich an der aktiven Sonne mit den häufigeren kräftigen Sonnenflecken, ist der Dipolcharakter verschwunden und die Korona ringförmig ausgebildet (siehe Abb. • 3, Finsternis von 1999). Durch die Rotation der aufsteigenden Globulen entstehen kleinräumige chaotisch erscheinende Magnetfelder mit dem eingeschlossenen Plasma hoher Temperatur. Durch die komplexe Wechselwirkung der Felder und Ströme entstehen lokale Unregelmässigkeiten.

Derzeitige Aufnahmen mit hoher Auflösung (Raumsonde Parker Solar Probe), nicht nur im optischen, sichtbaren Bereich des Sonnenspektrums, zeigen eine feine Struktur der Korona, die auf die vorhandenen Magnetfelder zurückzuführen ist.

Die Magnetfelder im Inneren der Sonne

Durch die Entwicklung des Koronografen, bei dem durch eine Blende im Fernrohr die Sonne abgedeckt und damit die Korona nicht mehr überstrahlt wird, lassen sich die Beobachtungen unabhängig von totalen Sonnenfinsternis-

sen machen. Und siehe da, je nach Phase des Sonnenzyklus hat die Korona eine andere Gestalt. Während der aktiven Zeit mit häufigen Sonnenflecken und Protuberanzen, explosionsartigen Materieauswürfen, ist die Korona gleichmäßiger zwischen Äquator und Polregionen verteilt. Hingegen während der „ruhigen“ Sonne ist die Korona stärker an den Polen der Sonne angesiedelt. Offenbar hat die Sonne in ihrem Inneren starke Magnetfelder, die teilweise auch durch ihre Oberfläche hindurch in die Umgebung hinausreichen bzw. hinausgelangen. Da diese Magnetfelder quasiperiodischen Änderungen unterliegen, können es keine „eingefrorenen“ Felder wie bei einem Stabmagneten sein. Ihre stete Änderung wird durch eine Art Dynamomechanismus hervorgerufen, der Ende der sechziger Jahre des 20. Jahrhunderts in Jena von dem Physiker Max Steenbeck (1904 – 1981) intuitiv erfasst und von seinem Mitarbeiter, dem Mathematiker Fritz Krause (* 1927), in eine schlüssige Theorie gegossen wurde.

Für ein wechselndes Magnetfeld sind zwei Mechanismen vonnöten, die in verschiedenen Schichten der Sonne die beiden Typen von Magnetfeldern hervorrufen. Ein Effekt ist bereits lange Zeit bekannt gewesen. Er beruht auf der ungleichförmigen Rotation der Sonne. Sie ist von der Tiefe in der Sonne abhängig, vor allem aber vom Abstand vom Äquator zu den Polen, der sogenannten differentiellen Rotation. Da in einem elektrisch leitendem Medium, wie dem Sonnenplasma, die Magnetfelder von dem Medium mitgenommen werden, wird ein bereits vorhandenes dipolartiges Magnetfeld wie dem eines Stabmagneten um die Rotationsachse „aufgewickelt“. Dieses Magnetfeld ist im Inneren der Sonne ringförmig, und in beiden Halbkugeln jenseits des Äquators in entgegengesetzte Richtung gepolt. Es sind die beiden toroidalen Magnetfelder, welche aus dem poloidalen generiert werden.

Der zweite Mechanismus zur Umwandlung des toroidalen Magnetfeldes in das poloidale wurde von Max Steenbeck ersonnen. Er beruht auf die kleinteilige Strömung des Sonnenplasmas von den tieferen Schichten, im oberen Drittel der Sonne, der Konvektionszone. Die Wärmeenergie der Sonne wird dort hauptsächlich durch Materieströmung an die Oberfläche gebracht, was man gut auf einer Abbildung der Sonne auf eine grosse helle Fläche beobachten kann. Die Sonne brodeln, wobei diese heißen Zellen etwa den Durchmesser der Erde haben. Was man dabei nicht so einfach sehen kann ist, dass diese Konvektionszellen etwas rotieren, ähnlich der von aufsteigender oder abfallenden Luft über der Erdoberfläche, den gegensätzlich rotierenden Hochs und Tiefs. In der Konvektionszone der Sonne liegen aber auch die toroidalen, ringförmigen Magnetfelder, die ihrerseits nun im kleineren Masstab verdreht werden. Die Summe all dieser Verdrillungen ergibt wieder ein poloidales Magnetfeld, allerdings nicht am gleichen Ort wie das ursprüngliche poloidale Feld und diesem entgegengesetzt gerichtet. So entstehen die doch stark irregulären Magnetfelder, wie sie in der Korona der „ruhigen“ Sonne zu sehen sind. Zum Sonnendynamo gibt es auch einen populärwissenschaftlichen Artikel (Karl-Otto Eschrich: [Das Rätsel der Magnetfelder von Sonne und Erde – Hommage à Fritz Krause](#), auch in WIKIPEDIA „Sonne“ unter Weblinks angegeben).

Die beiden grossräumigen toroidalen Magnetfelder werden im Wechselspiel mit elektrischen Feldern und elektrischen Strömen infolge der sogenannten Lorentzkraft in kleinere Magnetfeldschläuche gespalten, bis zerfasert.

Diese Magnetfeldschläuche, mit Plasma durchsetzt, stehen zwar im Druckgleichgewicht mit der Umgebung, nicht jedoch im gravitativen Gleichgewicht zur ihr, sie sind wesentlich leichter, erhalten daher einen gewissen Auftrieb; ein Magnetfeld hat wesentlich weniger (schwere) Masse als das Plasma. Andererseits wirken Kräfte im Magnetfeldring, die bestrebt sind ihn zusammenzuziehen. Ein damit bestehendes Gleichgewicht der Kräfte ist sehr stabil und kann Störungen durch aufsteigende Konvektionszellen meist überstehen. Stösst jedoch einmal eine größere Zelle den Magnetfeldring an einer Stelle so weit nach oben, dass er sich in der weniger dichten Photosphäre ausdehnt, nimmt seine Dichte ab und er dehnt sich weiter aus. Gerät er bis über die Photosphäre hinaus, explodiert er regelrecht. Ein solcher mit einem Magnetfeld gekoppelter Materieauswurf erzeugt die Sonnenflecken. Die beiden Fusspunkte der Sonnenflecken erscheinen in der Draufsicht dunkler als die Umgebung. Weshalb diese Sicht in einen Magnetfeldschlauch kühler und damit dunkler ist, wurde in einem einfachen Modell prinzipiell geklärt. Meine Arbeit hierzu lag einige Jahre in meinem Schreibtisch, mein Chef fand sie zu unbedeutend. Bis ich eines Tages in einer amerikanischen Fachzeitschrift (APJ) eine Artikelserie des damals führenden amerikanischen Astrophysikers Eugene Newman Parker (1927–2022) las, der sich auch mit unserem Modell befasste. Ohne das Modell berechnet zu haben war er intuitiv der Meinung, dass die fehlende Energie im Sonnenfleck unmittelbar um ihn herum austreten, also ein heller Rand vorhanden sein müsse. Die Rechnungen jedoch zeigten, selbst für nicht sehr tiefe Sonnenflecken, dass diese Aufhellung unter der Beobachtergrenze in dem brodelndem Plasma gerade einmal einige Kelvin betragen, in einem Ring, dessen Grenze bis weit weg vom Fleck reicht. Daraufhin wurde mir erlaubt die Arbeit zu veröffentlichen. (Eschrich, K.-O. & Krause, F. *Astronomische Nachrichten*, vol. 298, no1, 1977, p. 1-8. in German. oder [SAO/NASA Astrophysics Data System \(ADS\)](https://www.ads.aip.de/).)

Die Aufheizung der Chromosphäre

Insbesondere direkt über der dünnen Grenzschicht der Sonne, der Photosphäre (200 km), sind gleichmässig über die gesamte Sonne dicht an dicht die aus den tieferen Schichten aufsteigenden Plasma-Blasen, die Granulen, sichtbar. Angelangt an der wesentlich dünneren quasi Oberfläche der Sonne zerplatzen sie regelrecht. Mitgenommen mit der stofflichen Materie wird das in ihr enthaltene Magnetfeld, welches dabei einerseits „verdünnt“ wird. Die zurückfallende Materie und das verbundene Magnetfeld werden beim Zurückfallen auf die dichtere Photosphäre andererseits wieder komprimiert. Jede Änderung der magnetischen Flussdichte induziert um sie herum eine elektrische Ringspannung, die unmittelbar die dort vorhandenen Elektronen und Protonen, allerdings in gegensätzlicher Richtung, beschleunigen [Induktionsgesetz]. Diese ringförmigen Ströme erzeugen Wärme und damit eine Erhöhung der Temperatur.

Diese relativ dünne Schicht mit einer Dicke von 2.000 km und einer Temperatur von 4000 K bis 10.000 K im oberen Bereich bildet die Chromosphäre.

Bei den Flares mit ihrer wesentlich grösseren Ausdehnung und ihren viel stärkeren Magnetfeldern werden z.B. die Elektronen auf viel höhere Geschwindigkeiten gebracht, deren Bremsstrahlung im Röntgen- und

sogar im Gammastrahlenbereich durch die Streuung an den Protonen und anderen Ionen beobachtet werden kann [persönliche Mitteilung von Dr. Alexander Warmut, vom Astrophysikalischen Institut in Potsdam].

Die wesentlich langsameren Elektronen e^- aus den platzenden Granulen werden kaum an den Protonen p^+ gestreut, sondern vielmehr von ihnen „verschluckt“. Dieser Vorgang wird heutzutage durch das Schema



beschrieben, wobei ein Neutron n und ein Elektronneutrino ν_e entstehen, ausserdem werden 0,78MeV an Energie hauptsächlich aus der Bewegung der links stehenden Teilchen (und eingefangener Gluonen) beigesteuert.

Die Punkte ... stehen für hier nicht angegebene Gluonen aus einer (notwendigen) erweiterten Theorie [siehe: Karl-Otto Eschrich „Grundlagen der Theorie der Elementarteilchen“, in www.karl-otto-eschrich-potsdam.de].

Die aufsteigenden Granulen sind an der Oberfläche der Sonne seit langem bekannt, sind sie doch auf einem Bildschirm als helle Flecken zu beobachten, ihr ständiges Werden und Vergehen, als gleichsam lebendige Objekte. Dabei bleiben die einzelnen Granulen im Mittel fünf Minuten bestehen. Sie haben eine Temperatur von etwa 5000 K; hingegen sind ihre Ränder aus absteigendem Plasma rund 500 K kühler. Nicht direkt sichtbar ist ihre langsame Rotation [infolge der Corioliskräfte, siehe oben zur Umformung toroidaler Magnetfelder].

Das aus den Granulen in die Sonne zurückfallende Plasma mit seinem Magnetfeld wird komprimiert, wie auf der neueren Aufnahme von Granulen (Abb. • 5, 2007) an den kleinen weißen Gebieten zu erkennen ist.

Da veränderliche Magnetfelder nach dem Induktionsgesetz ringförmige elektrische Felder hervorrufen, bewirken beide Felder gemeinsam eine Kraft, die sogenannte Lorentzkraft, die senkrecht zu beiden gerichtet ist und auf das dort vorhandene elektrisch geladene Plasma wirkt. Letztlich führt diese Kraft bei divergierendem Magnetfeld zu dessen „Zerfaserung“ und komplexen Verformung, ähnlich wie bei den Protuberanzen, nur wesentlich kleiner, wie am Rand der Sonne zu erkennen ist (Abb. • 7).

Effektiv bildet das von der Sonne abströmende erhitzte Plasma der Spikulen mit deren „eingefrorenem“ Magnetfeld und wegen ihrer dichten Lage über die gesamte Oberfläche der Sonne, die nahezu gleichmässig geformte, aber gezackte, Chromosphäre.

Die Aufheizung der Korona

Wie auf den Abbildungen (•1, •2, •3) der Korona ersichtlich ist, reicht die Korona 2 bis 3 Sonnenradien, in Zeiten hoher Aktivität sogar doppelt so weit in den Weltraum hinaus. Sie schließt sich nach einer schmalen Übergangsschicht an die Chromosphäre an und hat da schon eine Temperatur von 1 Mio K. Im weiteren Abstand werden in der Korona 2 bis 3 Mio K erreicht. Solche Temperaturen müssen direkt an Ort und Stelle „erzeugt“ werden. Dafür wäre die Dissipation von Plasmawellen oder auch Alfvénwellen sicherlich nicht ausreichend, wie derzeit favorisiert untersucht wird (andererseits müssen die in die Korona einlaufenden Alfvénwellen in der weiter außen dünner werdenden Materie dissipieren. Die Folge davon dürfte eine von der Sonne abströmende Korona sein, der sogenannten *Sonnenwind*).

Die in der Chromosphäre entstandenen Neutronen haben eine Anfangsgeschwindigkeit, weshalb ein Teil von ihnen in die Korona gelangt. Im Gegensatz zu den Protonen und den Neutrinos haben sie keine unbeschränkte, sondern eine mittlere Lebensdauer von 870 s (14,5 Minuten) und zerfallen gemäß:



einer der ersten bekanntgewordenen Reaktionen der Geschichte der Elementarteilchenphysik. $\bar{\nu}_e$ ist das dabei vorhergesagte Anti-Elektron-Neutrino.

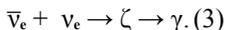
Als Teilchen mit einer Ruhenergie (/Ruhmasse) verlieren die Neutronen beim Aufstieg in die Korona Energie, werden also langsamer. Ist die Geschwindigkeit in etwa so groß wie die der Protonen in der Korona, verbinden sie sich jeweils mit einem von ihnen vermöge der starken Wechselwirkungskräfte. Dieser Zusammenschluss ist äußerst stabil und bewahrt das Neutron vor dem Zerfall. Diese Paarung kann sich mit einem zweiten Neutron zu einem überschweren Wasserstoffisotop verbinden, dem sogenannten Tritium, T. Tritium ist nicht stabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,32 Jahren zu dem stabilen Helium-3 Atomkern, plus einem Elektron und einem Antielektron-Neutrino:



[siehe WIKIPEDIA, Tritium]. Mit Helium-3 und langsamen Neutronen sind eine Reihe anderer Reaktionen möglich. Insgesamt wird dabei vor allem mit der Reaktion (2) extrem viel Energie frei. Damit scheint der Mechanismus zur Heizung der Korona gefunden worden zu sein. Ursächlich stammt die Energie zur Heizung der Korona von den beschleunigten Elektronen aus der Aufweitung der Magnetfeldröhren der Granulation. Allerdings sind zur Bestätigung dieser Annahmen noch Rechnungen und Beobachtungen erforderlich.

Da veränderliche Magnetfelder nach dem Induktionsgesetz ringförmige elektrische Felder hervorrufen, bewirken beide Felder gemeinsam eine Kraft, die sogenannte Lorentzkraft, die senkrecht zu beiden gerichtet ist und auf das dort vorhandene elektrisch geladene Plasma wirkt. Letztlich führt diese Kraft bei divergierendem Magnetfeld zu dessen „Zerfaserung“ und komplexen Verformung, ähnlich wie bei den Protuberanzen, nur wesentlich kleiner, wie am Rand der Sonne zu erkennen ist (Abb. • 7).

Die in der Reaktion (1) bei der Generation der Neutronen gebildeten ν_e -Neutrinos können mit den reichlich aus dem Inneren der Sonne austretenden $\bar{\nu}_e$ Antineutrinos annihilieren:



Das vorerst gebildete ζ -Boson besitzt ebenso wie das γ -Boson, das Photon, keine Ruhenergie und ist überhaupt mit ihm eng verwandt. Es ist ein quasi in höhere Dimensionen aufgeblähtes Photon und kann sich in einem dreidimensionalen Unterraum, in welchem seine Hauptachse und somit Bewegungsrichtung liegt, von sieben auf drei Dimensionen, also einem Photon in seinen drei Dimensionen reduzieren. Dieses Photon ist wegen seiner hohen Energie von rund 1,5 MeV ein Gamma-Quant, welches sich am Entstehungsort, der Chromosphäre, nachweisen lassen müsste (siehe hierüber in „Grundlagen der Physik der Elementarteilchen“).

In der gängigen Stringtheorie gibt es keine Vorstellung von der Natur der Neutrinos und folglich gibt es dort keine ζ -Bosonen. Lediglich, da in der Reaktion (1) auf der einen Seite ein Elektron steht, dafür auf der anderen Seite das Neutrino, stellt man einen Zusammenhang zwischen beiden her, der jedoch nicht sinnstiftend ist.

Es wurden zwar in der Übersichtsarbeit „From eV to EeV: Neutrino Cross-Sections Across Energy Scales“ alle möglichen Wechselwirkungen von Neutrinos mit Leptonen und Hadronen untersucht, jedoch nicht die Wechselwirkungen der Neutrinos untereinander, speziell ihre Annihilation, denn damit würde man den Rahmen der derzeitigen Standardphysik verlassen.

Seit Jahrzehnten wird versucht die hohe Temperatur der Sonnenkorona durch die Dissipation magnetohydrodynamischer Wellen (Alfvén-Wellen) zu erklären. Offenbar mit nicht befriedigendem Erfolg.

Es scheint jedoch einen anderen wesentlichen Einfluss dieser Wellen auf die Korona zu geben. Gelangt eine solche Welle in die Korona, wird sie in der nach außen hin dünner werdenden Korona nicht nur schneller, sondern ihre Amplitude wird, ähnlich die der Meereswellen zum Ufer hin bei abnehmender Wassertiefe, immer größer. Dabei entstehen Kräfte, welche die Korona vom Zentralkörper wegtreiben, in den Weltraum hinaus – der sogenannten Sonnenwind.

Potsdam, 06.02.2023/28.04.2023/29.01.2024/06.06.2024

Literatur:

WIKIPEDIA (dt. und ausführlicher engl.)

Walter Robert Wilhelm Grotrian (* [21. April 1890](#) in [Aachen](#); † [3. März 1954](#) in [Potsdam](#))

... Eine zweite wichtige Entdeckung gelang ihm mithilfe von Daten, die er 1929 auf einer Expedition nach [Sumatra](#) unter [Erwin Freundlich](#) gewonnen hatte, nämlich eine korrekte physikalische Erklärung des Spektrums der [Sonnenkorona](#) und damit eine Schätzung ihrer Temperatur auf über eine Million Grad Celsius.

Weblinks

Karl-Otto Eschrich: [Das Rätsel der Magnetfelder von Sonne und Erde – Hommage à Fritz Krause](#) (PDF; 56 kB), UTOPIE kreativ, Heft 208, 2008, S. 177–181.

[SAO/NASA Astrophysics Data System \(ADS\)](#)

Title: Anisotropic heat transport as a possible explanation for the temperature distribution in sunspots

Authors: Eschrich, K.-O. & Krause, F.

Journal: Astronomische Nachrichten, vol. 298, no. 1, 1977, p. 1-8. In German.

Bibliographic Code: 1977AN....298....1E

Titel: Grundlagen der Theorie der Elementarteilchen

Autor: Karl-Otto Eschrich

In: www.karl-otto-eschrich-potsdam.de

From eV to EeV: Neutrino Cross-Sections Across Energy Scales

in: arXiv:1305.7513v1 [hep-ex] 31 May 2013