

DIE SONNE – UNSER NÄCHSTER STERN

JAN OLOF STENFLO

Ohne die Sonne als zuverlässige Energiequelle wäre das Leben auf der Erde undenkbar. Auch in der Astrophysik spielt die Sonne eine zentrale Rolle, obwohl sie nur ein ganz gewöhnlicher Stern unter hundert Milliarden anderen Sternen in unserer Heimatgalaxie, der Milchstrasse, ist. Nur an der Sonne können wir die Physik eines Sterns detailliert erforschen und die theoretischen Ansätze der Astrophysik in Einzelheiten überprüfen.

Die Sonne aufgenommen mit dem Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT) der Raumsonde SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) der ESA. Auffälligstes Merkmal ist eine gewaltige Protuberanz am linken unteren Bildrand, die sich über mehrere 100 000 km erstreckt. Bild: ESA, NASA

Da sich unser Wissen über entferntere kosmische Objekte massgebend auf die Ergebnisse aus der Sonnenforschung stützt, wird die Sonne oft als der «Rosettastein der Astrophysik» bezeichnet. Die von der Sonne abgestrahlte Energie entsteht durch thermonukleare Fusion von Wasserstoff zu Helium. Jeder Stern ist ein von der Schwerkraft eingeschlossener Fusionsreaktor. Der für diesen Prozess zugängliche Brennstoff ist aber begrenzt. Bisher hat die Sonne etwa die Hälfte davon aufgebraucht. Nach Verbrauch

dieses Brennstoffs wird kein Leben mehr auf der Erde möglich sein. Die Sonne entwickelt sich dann zu einem Roten Riesenstern mit einem Radius, vergleichbar mit dem der Erdbahn. Am Ende dieser Phase stösst die Sonne einen grossen Teil ihrer Hülle ab und zieht sich anschliessend enorm zusammen zu einem so genannten Weissen Zwergstern mit einem einhundertmal kleineren Radius als dem der jetzigen Sonne. Ihre Dichte wird zu dieser Zeit eine Million mal grösser als die von Wasser sein.

Als Weisser Zwerg hat die Sonne keine weiteren nuklearen Energiequellen zur Verfügung. Deshalb kühlt sie durch Abstrahlung der gespeicherten Wärmeenergie allmählich ab und endet damit auf dem «kosmischen Friedhof» als Schwarzer Zwergstern. Hans Bethe aus den USA erhielt 1967 den Nobelpreis für Physik für seine theoretische Erklärung, wie Sonne und Sterne ihre Energie durch Fusion von Wasserstoff zu Helium produzieren. Heute können wir die durch diese Fusionsprozesse erzeugten Neu-

trinos direkt beobachten und damit bestätigen, dass Fusion von Wasserstoff tatsächlich für die Energieproduktion der Sonne verantwortlich ist. Für ihre Pionierleistungen bei der Entwicklung der Neutrino teleskope wurden im letzten Jahr der Amerikaner Raymond Davis Jr. und der Japaner Masatoshi Koshiha mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

Das Innere der Sonne sichtbar machen

Die dem beschriebenen stellaren Entwicklungsweg zugrunde liegenden theoretischen Vorstellungen können an der Sonne überprüft und auf ein empirisches Fundament gestellt werden. Besonders erwähnenswert ist hier die in den letzten zwei Jahrzehnten entwickelte Methode der «Helioseismologie». Man kann beobachten, dass die ganze Sonne bei wohldefinierten Frequenzen schwingt. Es handelt sich um globale Schallwellen, die sich im Innern der Sonne ausbreiten und durch konstruktive und destruktive Interferenz ein reichhaltiges diskretes Spektrum mit einer Vielfalt von wohldefinierten «Tönen» produzieren. Solche Töne entstehen auch, wenn man eine Metallkugel anschlägt oder in jedem Musik-

instrument. Welche Töne oder Frequenzen entstehen, hängt von der Variation der Schallgeschwindigkeit im Innern der Kugel ab. In der Sonne verhält sich die Schallgeschwindigkeit proportional zur Wurzel der Temperatur. Das beobachtete Spektrum der Schwingungsfrequenzen wird mathematisch invertiert, um die Variation der Temperatur mit der Tiefe im Innern der Sonne empirisch zu finden. Diese Bestimmungen haben die theoretischen Standardmodelle der Sonne detailliert bestätigt.

Ein kosmisches Plasmalabor

Im Gegensatz zur Sonnenscheibe erscheinen die Sternscheiben meistens unaufgelöst als Punktobjekte. Die Sonne bietet uns die Möglichkeit zu untersuchen, welche physikalischen Prozesse sich in den Sternatmosphären abspielen. Die klimatischen Prozesse auf den Sternen unterscheiden sich aber grundlegend von den gasdynamischen Prozessen der Erdatmosphäre. Wegen der hohen elektrischen Leitfähigkeit der Sternmaterie können nämlich starke elektrische Ströme durch Induktionseffekte erzeugt werden. In einem solchen Medium, auch Plasma genannt, spielen die magnetischen Kräfte eine fundamentale Rolle. Die Wech-

selwirkung der Magnetfelder mit den turbulenten und zyklischen Plasmabewegungen führt zur grossartigen Variabilität von Sonne und Sternen. Sichtbar wird sie in Sonnenflecken (siehe Abb. 2), Eruptionen, dem 11-jährigen Aktivitätszyklus und einer Vielzahl anderer Erscheinungen. Durch das Studium der Sonne versuchen wir zu verstehen, wie sich diese physikalischen Effekte auf andere astrophysikalische Systeme übertragen lassen.

Als plasmaphysikalisches Labor kann die Sonne nicht durch Erdlaboratorien ersetzt werden, da man bei einer Anpassung der solaren Dimensionen an die Laboratorien auf der Erde die magnetischen und elektrischen Feldstärken entsprechend aufskalieren müsste, um wesentliche Eigenschaften des Plasmas invariant zu halten. Dies würde zu Feldstärken führen, die viele Grössenordnungen jenseits der künstlich herstellbaren Feldstärken liegen. Am Beispiel der Sonne erforscht man deshalb einen Bereich der Plasmaphysik, der mit anderen Mitteln nicht untersucht werden kann. Das dadurch erweiterte Verständnis der Plasmaphysik befruchtet indirekt andere anwendungsorientierte Bereiche, z. B. die Plasmafusion zur Lösung der Energieversorgung der Erde.

Solare Magnetfelder

In einem Versuch, das Auftreten von Sonnenflecken zu erklären, hat der Schwede Hannes Alfvén die Magnetohydrodynamik, einen wichtigen Zweig der Plasmaphysik, entwickelt und wurde dafür 1970 mit dem Nobelpreis für Physik belohnt. Heute sucht man die Erklärung der magnetischen Aktivität der Sterne im Rahmen der so genannten Dynamotheorien, mit denen das Entstehen makroskopischer Magnetfelder überall im Kosmos erklärt werden soll, wie z. B. das Magnetfeld der Milchstrasse oder das der Erde. Der 11-jährige Aktivitätszyklus der Sonne ist ein Spezialfall eines kosmischen Dynamos, der eine 11-jährige topologische Schwingung zwischen einem poloidalen und toroidalen Zustand des Magnetfeldes aufweist. Durch ihre Nähe zu uns bietet die Sonne die einzigartige Möglichkeit, die Dynamotheorien detailliert zu überprüfen.

Wie die chemischen Elemente, hinterlassen auch die Magnetfelder ihre «Fingerabdrücke» oder Signaturen im Sonnenspektrum, und zwar in der Polarisation der Spektrallinien. Durch Spektropolarimetrie ist es möglich, Struktur, Dynamik und Entwicklung der Sonnenmagnetfelder empirisch zu untersuchen und mit den Plasmatheorien zu vergleichen. Solche Untersuchungen bilden ei-

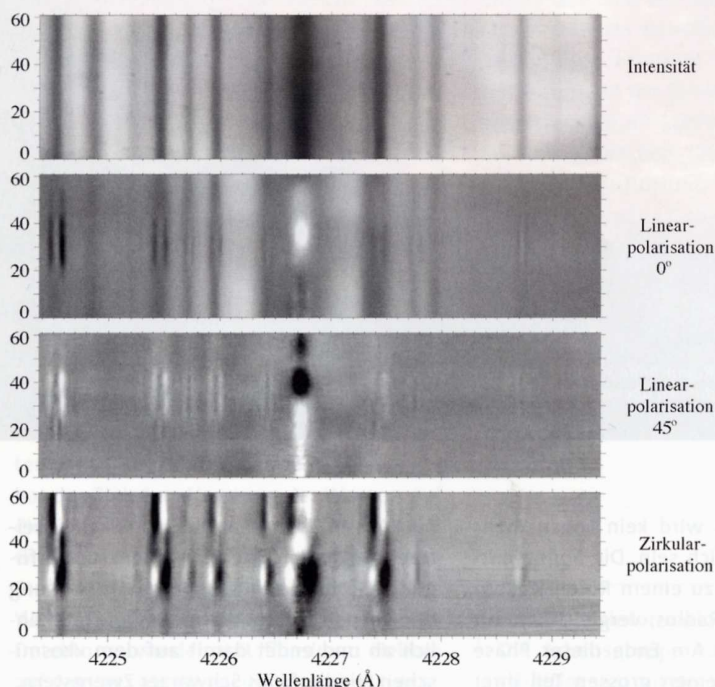


Abb. 1: Spektrales «Gesicht» der Sonne. Gezeigt wird ein winziger Ausschnitt aus dem blauen Teil des polarisierten Sonnenspektrums, aufgenommen mit dem Zurich Imaging Polarimeter (ZIMPOL) der ETH Zürich am Kitt Peak Observatorium (Arizona) am 9. März 2002 (siehe Abb. 5, S. 13). Die vier gleichzeitigen Bilder repräsentieren (von oben nach unten) die Intensität, zwei Linearpolarisationen und die Zirkularpolarisation. Die vertikale Skala gibt die relative Position auf der Sonnenscheibe längs dem Spektrographenspalt in Einheiten von 1000 km an. Die spektralen Strukturen enthalten in verschlüsselter Form reichhaltige Informationen über die physikalischen Prozesse in der Sonnenatmosphäre.

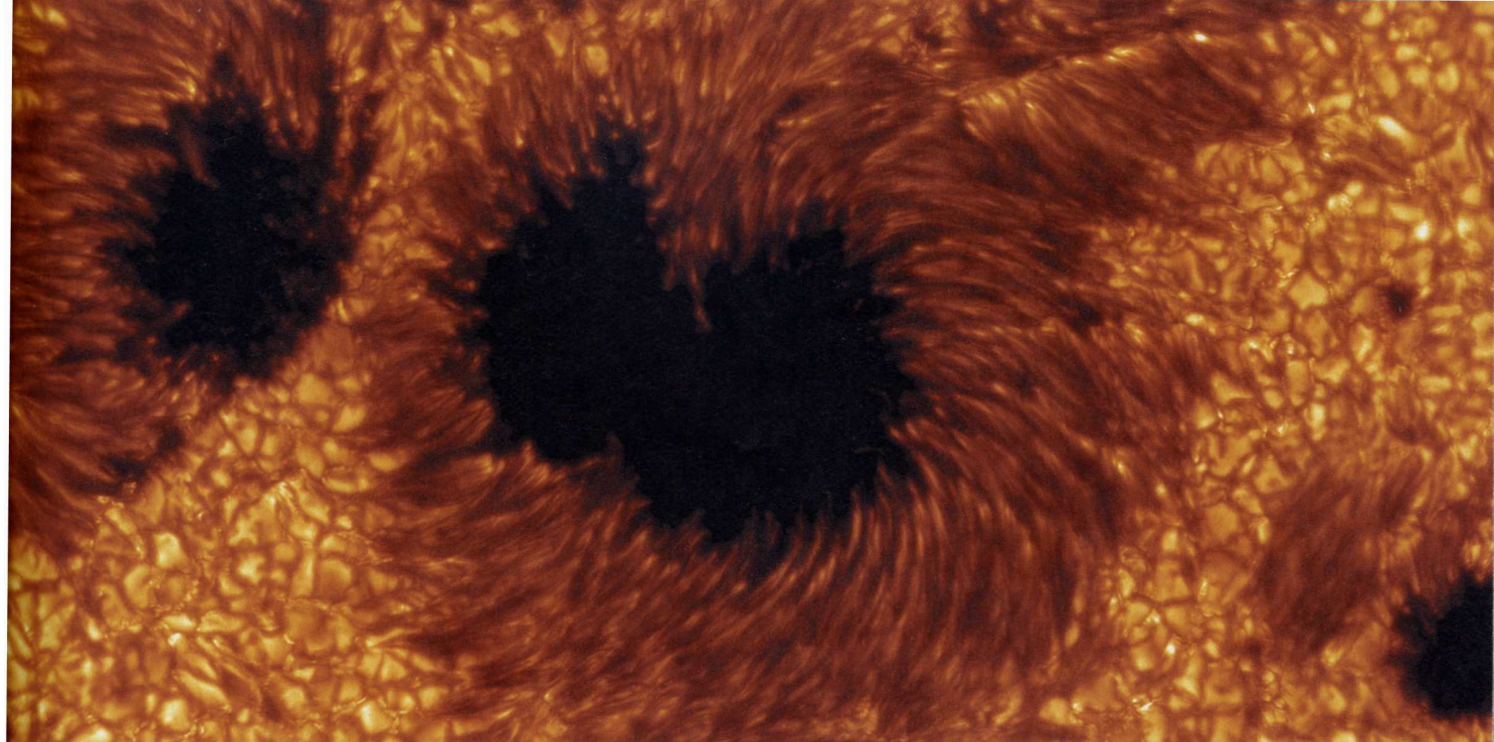


Abb. 2: Sonnenflecken, Ausdruck der magnetischen Aktivität eines Sterns. Das Bildfeld entspricht etwa 0,2% der Fläche der Sonnenscheibe. Die Aufnahme wurde am 15. Juli 2002 auf La Palma mit dem neuen Teleskop der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften gemacht.

Glossar

Dynamotheorien:

Wie aufwendige Laborexperimente mittlerweile bestätigen, können rotierende, elektrisch leitende Flüssigkeiten ein stabiles Magnetfeld verursachen. Solche Plasmen und Schmelzen sind in der Sonne und der Erde zu finden und zeichnen sich dort für die Magnetfelder dieser Objekte verantwortlich.

Hanle-Effekt:

Die magnetische Beeinflussung der Polarisation der Lichtemission. Dabei bewirkt ein Magnetfeld in Beobachtungsrichtung eine mit zunehmender Feldstärke wachsende Depolarisation der Strahlung (1924).

Plasma:

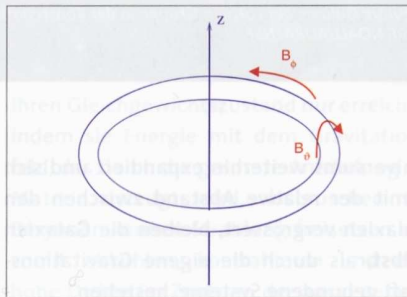
Ein Gasmisch extrem hoher Temperatur, das sich aus freien Elektronen und Ionen zusammensetzt.

Polarisation:

Schwingt die elektromagnetische Welle (das «Licht») in einer Ebene, spricht man von linear polarisiertem Licht. Beschreibt die Spitze des Lichtvektors in einer zur Ausbreitungsrichtung senkrechten Ebene einen Kreis, handelt es sich um zirkular polarisiertes Licht. Wird hingegen eine Ellipse beschrieben, nennt man das Licht elliptisch polarisiert.

poloidaler/ toroidaler Zustand:

Zwei verschiedene Moden magnetischer Felder. Die einfachste Realisierung eines Toroidfeldes ist das ringförmige Feld um einen geraden Leiter (B_ϕ). Die poloidale Komponente (B_θ) verläuft entlang des Polarwinkels, z.B. in Dipolfeldern. Magnetfelder enthalten i.A. Anteile beider Moden (siehe Abbildung).



Zeeman-Effekt:

Im Jahr 1896 hat Pieter Zeeman festgestellt, dass sich Spektrallinien im Magnetfeld aufspalten. Aus der Aufspaltung der Spektrallinien lassen sich Rückschlüsse auf die Atomstruktur ziehen.

St. Scholz, A. Koch

nen Schwerpunkt der Forschung am Institut für Astronomie der ETH. Unter Verwendung elektrooptischer Technologien haben wir ein hochpräzises Polarimetriesystem entwickelt, mit dem zweidimensionale Bilder des vollen Polarisationszustandes mit viel höherer Genauigkeit als mit anderen vergleichbaren Systemen der Welt aufgenommen werden können. Ein Bild des Polarisationsvektors lässt sich in den vier gleichzeitigen Bildern von Intensität, zwei Linearpolarisationen und Zirkularpolarisation darstellen. Ein Beispiel sehen wir in Abb. 1. Die auftretenden polarisierten Spektralstrukturen sind Signaturen nicht nur von Magnetfeldern durch Zeeman- und Hanle-Effekte, sondern auch solche von schlecht verstandenen Prozessen der Atom- und Quantenphysik. Die Sonne dient also auch als ausgezeichnetes atomphysikalisches Labor.

Forschungsinformationen

Die Forschungsinteressen der Arbeitsgruppen um Prof. Stenflo gelten der solaren Astrophysik, insbesondere der astrophysikalischen Polarimetrie.
http://www.astro.phys.ethz.ch/home_nf.html

Prof. Dr. Jan O. Stenflo

ordentlicher Professor für Astronomie und Vorsteher des Instituts für Astronomie der ETH Zürich