

■ Heizung für die Sonnenatmosphäre

Neueste Beobachtungen der Sonne bestätigen, dass Alfvén-Wellen überall in der Sonnenatmosphäre existieren.

Seit einem halben Jahrhundert rätseln die Heliophysiker, welcher Mechanismus die äußerste Schicht der Sonnenatmosphäre, die Korona, aufheizt. Denn obwohl sich die Korona je nach Sonnenaktivität bis zu mehrere Sonnenradien in den kalten Weltraum erstreckt und zudem eine sehr geringe Dichte hat, ist sie mit über einer Million Kelvin rund tausendmal heißer als die Photosphäre, aus der das sichtbare Licht stammt. Zwischen Photosphäre und Korona liegt noch die einige Kilometer dicke Chromosphäre.

Als wahrscheinlichste Kandidaten für den Heizmechanismus der Korona kommen vor allem die aus der Plasmaphysik bekannten Alfvén-Wellen infrage, benannt nach ihrem Entdecker Hannes Alfvén (Physik-Nobelpreis 1970). Alfvén-Wellen sind inkompressible, transversale Schwingungen von Plasma und Magnetfeld. Da sie die Dichte des Plasmas unverändert lassen, sind sie nicht durch Intensitätsschwankungen von Spektrallinien nachweisbar. Aber mithilfe des Zeeman-Effektes und der Stokes-Polarimetrie kann man die Vektorkomponenten des solaren Magnetfeldes bestimmen, sodass sich seine transversalen Schwin-

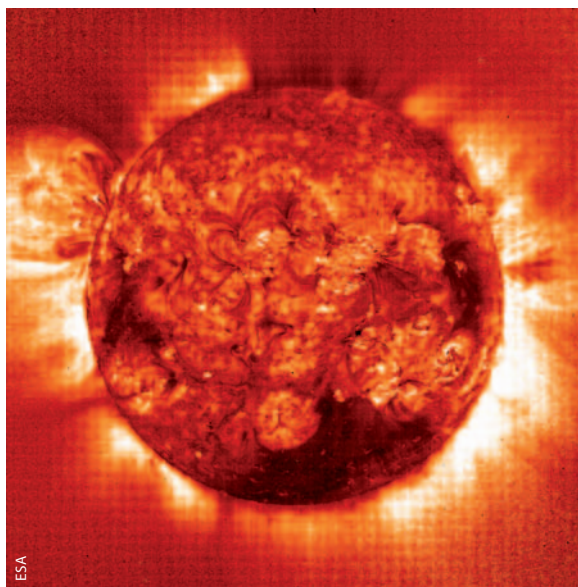


Abb. 1 Diese Aufnahme von SOHO zeigt die Temperaturverteilung der äußeren Sonnenatmosphäre. Je heller die Bereiche sind, umso heißer sind sie. Gut zu erkennen ist die über eine Million Kelvin heiße Korona mit ihren Magnetfeldbögen.

gungen und über den Dopplereffekt auch die Plasmageschwindigkeit vermessen lassen.

Zuerst fanden sich die Alfvén-Wellen im Sonnenwind [1], der aus der Korona in alle Richtungen des Sonnensystems mit einigen hundert Kilometern pro Sekunde abströmt. Mit dem Solar Optical Telescope (SOT) auf dem japanischen Satelliten Hinode (japanisch für Sonnenaufgang) gelang es seit 2007 auf sehr überzeugende Weise, Alfvén-Wellen in weiteren Regionen der Sonnenatmosphäre nachzuweisen, und zwar u. a.

- in den „Spikulen“, das sind „step-pengrasartige“ leuchtende, magnetische Strukturen mit Höhen von einigen tausend Kilometern, die besonders schön über dem Sonnenrand zu sehen sind [3],
- in den Protuberanzen, den gigantischen, relativ kühlen Magnetfeldbögen von vielen zehntausend Kilometern Höhe,
- und auch im Röntgenbereich wurden Alfvén-Wellen in Verbindung mit Plasmajets in der heißen Korona entdeckt [4].

Nun ist es erstmals mit einem optischen Polarimeter am Schwedischen Sonnen-Teleskop (SST) auf Teneriffa gelungen, Alfvén-Wellen in der unteren Sonnenatmosphäre selbst nachzuweisen.

Klar ist seit langem, dass das Magnetfeld der Sonne und seine Aktivität eine zentrale Rolle spielen bei den physikalischen Prozessen, die in der Sonnenatmosphäre ablaufen. Diese ist in Form von offenen Flussröhren und geschlossenen Bögen auf allen Skalen – vom Sonnenradius bis hinunter zu einigen hundert Kilometern – magnetisch stark strukturiert (Abb. 1). Die zeitlichen Variationen reichen vom Sonnenzyklus von elf Jahren bis hinunter zu Sekunden. Mit dem SST entdeckten die Forscher um David Jess von der Universität Belfast eine kleine Flussröhre (Abb. 2) von einigen 100 km Durchmesser am Sonnenrand zwischen Photosphäre und Chromosphäre [2]. Diese Flussröhre führte inkompressible Torsionsschwingungen aus und leitete Alfvén-Wellen in vertikaler Richtung in die Korona. Jess und Kollegen analysierten die Phasenbeziehungen dieser Schwingungen, die bei dem Helligkeitspunkt sichtbar werden, der mit einer magnetischen Flussröhre assoziiert ist. Dabei zeigte sich, dass die Oszillationen mit Perioden von hunderten Minuten und relativ zum Magnetfeld transversalen Geschwindigkeitsamplituden von ein bis drei Kilometern pro Sekunde auftreten. Jedes einzelne Ereignis weist einen relativ hohen

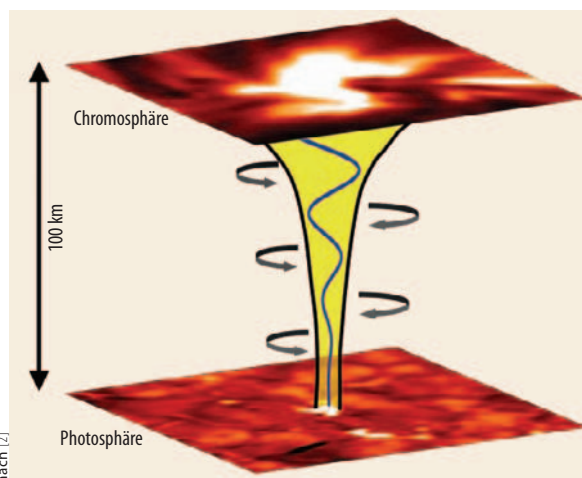


Abb. 2 Die jüngst entdeckte magnetische Flussröhre zwischen Photosphäre und Chromosphäre dient als Leiter für die Alfvén-Wellen. Die dazugehörigen Intensitätsbilder sind im H_α -Kontinuum (unten) und im Kern der Linie (oben, heller Punkt) aufgenommen worden.

Energiefluss auf, und gemittelt über die Sonnenoberfläche ergibt sich eine durchschnittliche Leistungsflächendichte von 100 bis 300 W m^{-2} , was etwa ausreichen würde, um die Korona zu heizen und den Sonnenwind anzutreiben. Damit ist zumindest die Frage, ob es Alfvén-Wellen überall in der Sonnenatmosphäre gibt, positiv beantwortet.

Ältere Ergebnisse im neuen Licht

Seit Jahrzehnten ist bekannt, dass im Bereich der Übergangszone der Sonnenatmosphäre, wo die Plasmatemperatur von etwa 10 000 auf mehr als eine Million Kelvin springt, vielfach ionisierte Atome der Elemente schwerer als Wasserstoff zahlreiche ultraviolette Spektrallinien emittieren. Diese Linien zeigen sehr stark verbreiterte Profile, wobei diese als turbulente Verbreiterungen interpretiert und allgemein magnetohydrodynamischen Wellenphänomenen zugeschrieben wurden. Im neuesten Übersichtsartikel zu diesem Thema finden sich typische Wellenamplituden mit Werten zwischen 10 und 30 km/s bei Temperaturen des koronalen Plasmas von bis zu einer Million Kelvin [5]. Bisher war jedoch nicht klar, ob diese Amplituden zu transversalen Alfvén-Wellen gehörten. Modellrechnungen, die durch Beobachtungen begrenzt sind, haben nun aber gezeigt, dass dies sehr wahrscheinlich ist [6]. Die im Plasma bei Temperaturen unterhalb von 250 000 K durch Elektronenstöße angeregten Linienverbreiterungen der kühleren Linien haben also ihren Ursprung wohl in den wellenartigen Bewegungen der chromosphärischen Spikulen.

Viel höher hinauf als die Spikulen (ca. 5000 bis 10 000 km) reichen die mit viel Plasma angefüllten großen (100 000 km und mehr) hellen Magnetfeldbögen der Korona. Diese wurden 2007 in der infraroten Spektrallinie von Eisen bei 1074,7 nm (Fe XIII) mithilfe des „Coronal Multi-Channel Polarimeters (CoMP) am National Solar Observatory in New Mexico, USA, polarimetrisch analysiert, sodass sich neben der Intensität auch die Doppler-Breiten und -Ver-

schiebungen dieser Linie messen ließen (Abb. 3) [7]. Die dabei überall entdeckten Wellen haben Phasengeschwindigkeiten von einigen tausend Kilometern pro Sekunde und Ausbreitungsrichtungen, die konsistent sind mit der Richtung des lokalen koronalen Magnetfeldes, die man aus linearen Polarisationsmessungen ableiten kann.

Angetrieben werden Alfvén-Wellen wahrscheinlich durch die magnetische Konvektion in der Photosphäre, wo die koronalen Magnetfeldlinien verankert sind, und durch magnetische Rekonnektion zwischen offenen (Trichtern) und geschlossenen (Bögen) Feldlinien, wobei auch Plasma geheizt und beschleunigt wird. Im Falle der obigen CoMP-Beobachtungen schwingen die Wellen im Fünfminutentakt in Resonanz mit den globalen solaren Oszillationen, die für ihre Anregung verantwortlich zu sein scheinen. Abschätzungen der Energiestromdichte der Alfvén-Wellen in der Chromosphäre zeigten, dass deren Energie ausreichen sollte, um die Korona zu heizen [3].

Dissipative Prozesse durch Coulomb-Stöße, wie Resistivität oder Viskosität, sind in dem heißen und dünnen Plasma der Korona nicht sehr effektiv, und die aus ihnen resultierende Dämpfung der Alfvén-Wellen ist um Größenordnungen zu klein. Daher bleibt somit noch

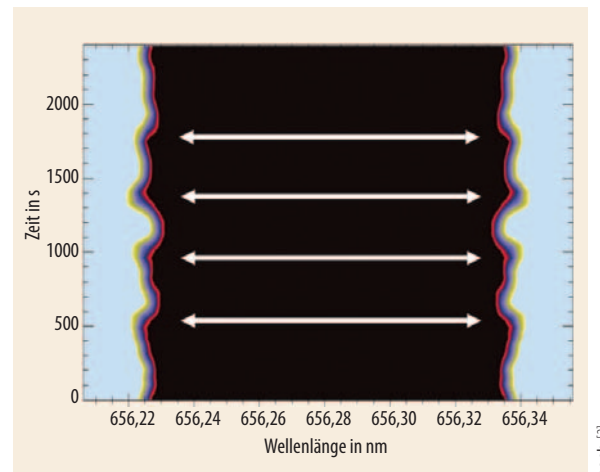


Abb. 3 Die Torsionsbewegungen der Alfvén-Welle erzeugen Doppler-Variationen in der Linienbreite von H_{α} , die hier als Funktion der Zeit gezeigt sind, und machen so die Plasma- und Magnetfeldschwingungen deutlich, mit einem Maximum bei einer Periode von 420 s.

das Geheimnis der Sonne zu klären, wie Alfvén-Wellen letztendlich dissipieren und ihre Energie an die Korona abgeben.

Eckart Marsch

- [1] C.-Y. Tu und E. Marsch, *Space Sci. Rev.* **73**, 1 (1995)
- [2] D. B. Jess et al., *Science* **323**, 1582 (2009)
- [3] B. DePontieu et al., *Science* **318**, 1574 (2007); J.-S. He et al., *Astron. Astrophys.* **497**, 525 (2009)
- [4] J. W. Cirtain et al., *Science* **318**, 1580 (2007)
- [5] K. Wilhelm et al., *Space Sci. Rev.* **133**, 103 (2008)
- [6] S. W. McIntosh et al., *Astrophys. J.* **673**, L219 (2008)
- [7] S. Tomczyk et al., *Science* **317**, 1192 (2007)

Prof. Dr. Eckart Marsch, Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Max-Planck-Straße 2, 37191 Katlenburg-Lindau

KURZGEFASST

■ Brillante Diamanten

Physiker der Uni Stuttgart haben in Zusammenarbeit mit einer englischen Firma die bislang reinsten Diamanten hergestellt: Die nur zwei Milligramm leichten Steine enthalten nur wenige ppb an Stickstoff-Verunreinigungen und bestehen zu 99,7 % aus dem Isotop ^{12}C , dessen Kernspin verschwindet. Daher sind die wenigen verbliebenen Verunreinigungen, insbesondere sog. Farbzentren, die aus einem Stickstoffatom auf einem Kohlenstoffplatz sowie einer Fehlstelle bestehen, in einer solchen „spin-freien“ Umgebung weitgehend voneinander entkoppelt. Einmal ausgerichtet, verlieren die Spins dieser Farbzentren daher selbst bei Raumtemperatur nur langsam (innerhalb von Millisekunden) ihre Polarisation. Sie sind deshalb vielversprechende Kandidaten für Quantenbits und eig-

nen sich auch als sehr empfindliche Magnetfeldsensoren.

G. Balasubramanian et al., *Nature Materials*, DOI: 10.1038/nmat2420

■ Isotope in der Falle

Die Nuklidkarte hat Zuwachs erhalten: Am Isotopenlabor ISOLDE des CERN hat eine im Wesentlichen deutsche Kollaboration das Isotop Radon-229 entdeckt, dessen Halbwertszeit 12 Sekunden beträgt. Bei dem Experiment wurde ein Uran-Target mit energiereichen Protonen beschossen und die entstehenden Radon-Isotope in einer Penning-Falle eingefangen. Mithilfe dieser Falle gelang es, die Massen der Isotope ^{223}Rn bis ^{229}Rn mit einer Genauigkeit von wenigen Millionstel Prozent zu bestimmen.

D. Neidherr et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 112501 (2009)