

Astronomie/Astrophysik

Helioseismologie

Gizon, Laurent, E-Mail: gizon@mps.mpg.de

Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Katlenburg-Lindau

Selbständige Nachwuchsgruppe - Helio- und Asteroseismologie (MPG)

Zusammenfassung

Millionen von Pulsationsmodi, welche durch turbulente Konvektion angeregt werden, ermöglichen es Sonnenphysikern, in die Sonne hineinzusehen. Dreidimensionale helioseismische Verfahren bieten einzigartige Aussichten, um komplexe magnetohydrodynamische Prozesse zu erkunden und die Mechanismen des Sonnenzyklus aufzudecken, während die Ausweitung seismischer Untersuchungen auf entfernte Sterne eine neue Ära der beobachtenden stellaren Forschung eröffnet.

Abstract

Millions of modes of vibration, excited by turbulent convection, enable solar physicists to see inside the Sun. Three dimensional helioseismic techniques offer unique prospects for probing complex magnetohydrodynamical processes and uncovering the mechanism of the solar cycle, while the extension of seismic investigations to distant stars will open a new era of observational stellar research.

Die Methoden der Helioseismologie können in zwei Klassen eingeteilt werden: global und lokal. Der eher traditionelle Ansatz der globalen Helioseismologie basiert auf der Messung der Frequenzen der einzelnen Oszillationsmoden, mit der die Suche nach einem seismologischen Sonnenmodell, dessen Eigenfrequenzen mit den beobachteten übereinstimmen, einhergeht. Damit kann der großskalige Aufbau der Sonne sowie die Rotation als Funktion der Tiefe und der heliographischen Breite angegeben werden (**Abb. 1**). Ergänzend zur globalen Helioseismologie werden neue Methoden der lokalen Helioseismologie entwickelt, mit denen dreidimensionale Abbildungen des Sonneninneren gewonnen werden können. Die grundlegende Idee ist dabei, Tiefeninformationen aus der Laufzeit solarer Wellen zwischen zwei beliebigen Punkten an der Oberfläche zu gewinnen.

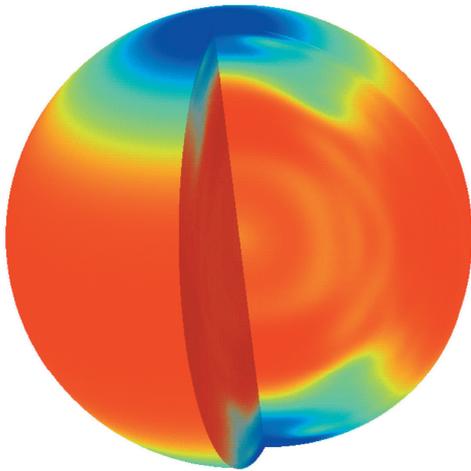


Abb. 1: Rotation in der Sonne, bestimmt mittels Helioseismologie globaler Oszillationen und Daten vom SOHO-Satelliten. Rot ist schneller; blau langsamer. Die Breitenabhängigkeit der differentiellen Rotation besteht in der Konvektionszone, während die Strahlungszone nahezu gleichförmig rotiert.

Urheber: Stanford University

Die globale Helioseismologie war bei weitem die präziseste Überprüfung der Theorie des inneren Aufbaus und der Entwicklung der Sterne, die insbesondere zu einer Revision des Standardmodells der Teilchenphysik geführt hat, um das Problem der Sonnenneutrinos zu lösen. Heutzutage ist der aufregendste Aspekt der Helioseismologie die Suche nach den Zusammenhängen, die den Ursprung und die Variabilität des Magnetfelds der Sonne betreffen. Dies ist wahrscheinlich das wichtigste ungelöste Problem der Sonnenphysik. Allgemein wird angenommen, dass ein Dynamoprozess für den Zyklus des Magnetfeldes der Sonne verantwortlich ist. Entsprechend dieser Vorstellung werden Magnetfeldlinien durch innere Scherbewegungen gedehnt und verdreht. Deshalb ist es wichtig, innere Materiebewegungen, Abweichungen von der Kugelsymmetrie und deren zeitliche Variation zu kartografieren. Die globale Helioseismologie konnte hierzu weitere grundlegende Ergebnisse beisteuern, wie z.B. die Entdeckung von Bereichen rotationsbedingter Scherungen im Sonneninneren, Variationen der Rotationsrate mit dem Sonnenzyklus und noch unverstandene quasi-periodische Variationen am Boden der Konvektionszone.

Es wird erwartet, dass die weiteren Fortschritte mit lokaler Helioseismologie erzielt werden. Obwohl diese noch eine recht junge Wissenschaft ist, hat sie bereits einen Mechanismus für den breitenabhängigen Transport des magnetischen Flusses erklären können, der die Dauer des Sonnenzyklus festlegen könnte. Detaillierte 3-D-Karten der oberen Konvektionszone ermöglichen neue Einblicke in den Aufbau, die Entwicklung und die Gliederung aktiver Gebiete und konvektiver Strömungen. In einer weiteren Anwendung kann die lokale Helioseismologie dazu verwendet werden, Abbildungen aktiver Gebiete auf der Rückseite der Sonne zu gewinnen. In all diesen Fällen hat man inzwischen eine Vorahnung der vielfältigen Möglichkeiten erhalten, jedoch sind bessere Daten und Weiterentwicklungen der Methoden notwendig, um das volle Potenzial ausschöpfen zu können.

Ein wichtiger technologischer Schritt für die Helioseismologie wird mit dem HMI-Instrument auf dem Solar Dynamics Observatory der NASA erfolgen, das 2008 gestartet wird. Mit einer hohen räumlichen Auflösung über die gesamte sichtbare Sonnenhemisphäre ist HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) das erste Instrument, das speziell für lokale Helioseismologie konzipiert ist. Später, in etwa einem

Jahrzehnt, soll der Solar Orbiter der ESA erstmals Informationen über den Aufbau und die Dynamik von Bereichen unterhalb der Sonnenoberfläche der Polregionen liefern. Diese neuen Beobachtungen werden weitere Verbesserungen im Bereich der Modellierung der Sonne erforderlich machen. Insbesondere werden theoretische Untersuchungen und numerische Simulationen benötigt werden, um die Wellenausbreitung in stark magnetisierten Fluiden zu verstehen. Dies ist eine Grundvoraussetzung bei der Anwendung lokaler Helioseismologie in aktiven Gebieten. Die lokale Helioseismologie befindet sich heutzutage in einer rasanten Entwicklung und verspricht viele weitere Entdeckungen. Eines der ambitioniertesten Ziele ist die direkte Abbildung des Magnetfelds im Inneren der Sonne.

Asteroseismologie ist die Untersuchung globaler Oszillationen in entfernten Sternen. Auch sie tritt in eine sehr aufregende Phase großer Entdeckungen ein. Viele Sterne, mit einem breiten Spektrum an Massen und Entwicklungszuständen, sind dafür bekannt, dass sie Schwingungen aufweisen. Aber erst in den letzten Jahren ist es mit hochentwickelten Spektrographen und großen bodengebundenen Teleskopen möglich geworden, diese Oszillationen in sonnenähnlichen Sternen nachzuweisen. Stellare Oszillationen haben ein beachtliches diagnostisches Potenzial und erlauben, die Masse und das Alter eines Sterns mit beispielloser Genauigkeit zu bestimmen. Derartige Kenntnisse für eine ausreichende Anzahl an Sternen wird die Untersuchung der Entwicklung von Sternen und Galaxien revolutionieren. Asteroseismologie bietet des Weiteren die Möglichkeit, den Bereich der Rotation im Inneren von Sternen einzuschränken und die Ränder von Konvektions- und Ionisationszonen festzulegen. Diese Informationen könnten dazu beitragen, die von einem Dynamo verursachten stellaren Aktivitätszyklen und den solar-stellaren Zusammenhang zu verstehen.

Diese vielversprechenden Möglichkeiten zur Untersuchung des inneren Aufbaus, der Entwicklung und der Aktivität von Sternen können vollständig realisiert werden, sobald nur für eine genügend große Anzahl von Sternen Beobachtungen verfügbar werden. Die Genauigkeit der Frequenzbestimmung von globalen stellaren Oszillationen ist jedoch sehr stark durch die verfügbare Teleskopzeit beschränkt. Das ist der Grund, weshalb Weltraumteleskope, die allein diesem einen Zweck gewidmet sind, eine attraktive Lösung sind, um Langzeitbeobachtungen pulsierender Sterne zu ermöglichen. Mit dem Start der CNES-Mission COROT werden hochpräzise photometrische Messungen im Jahr 2006 erwartet. In den folgenden Jahrzehnten wird die Asteroseismologie große Fortschritte machen, insbesondere auch durch die noch anspruchsvollere NASA-Mission Kepler sowie möglicherweise mit der ESA-Mission Eddington. Ganz genau wie im Fall der Helioseismologie bedarf es eines verbesserten Verständnisses was die Oszillationen und ihre Wechselwirkung mit magnetohydrodynamischen Prozessen in Sternen betrifft.

Lokale Helioseismologie der magnetischen Aktivität

Im vergangenen Jahr war am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung die Untersuchung von seismischen Wellen in der Nähe von Sonnenflecken eine wichtige Forschungsaktivität. Ein spezielles Ziel ist es dabei, die Plasmabewegungen unter der Oberfläche zu bestimmen, da geordnete Strömungen wichtige Folgerungen über die Stabilität und Entwicklung von Sonnenflecken ermöglichen könnten. Die lokale Helioseismologie von Sonnenflecken ist in mancherlei Hinsicht schwierig, denn sie benötigt im Prinzip ein gewisses Maß an Verständnis von der Wellenpropagation in stark magnetisierten Gebieten. In einem ersten Schritt jedoch ist es interessant, Strömungen außerhalb der Penumbra des Sonnenflecks zu entdecken. Dort kann man annehmen, dass magnetische Effekte vernachlässigt werden können. In der Time-Distance-Helioseismologie misst man die Laufzeit einer Welle von einem Punkt an der Sonnenoberfläche zu einem anderen. Strömungen entlang des Wellenpfads treten in Wechselwirkung mit den Wellen: Wellen laufen schneller entlang der Strömung als entgegen der Strömung. Die Laufzeitmessungen enthalten somit Informationen über die Strömungen. Um oberflächennahe Strömungen mit höchster räumlicher Auflösung zu untersuchen, muss eine genaue Inver-

sion der Laufzeitmessungen ausgeführt werden. Solch ein Verfahren wurde unter der Verwendung von Oberflächenschwerewellen (oder f-Modi) entwickelt, die sich horizontal ausbreiten und sensitiv auf horizontale Strömungen in einer Tiefe von etwa eintausend Kilometer unter der Oberfläche sind. Die dabei mögliche räumliche Auflösung ist vergleichbar mit der Wellenlänge der f-Modi oder etwa fünftausend Kilometer. Man findet ganz allgemein bei f-Mode-Inversionen um den Sonnenfleck eine Auswärtsströmung mit einer Amplitude von etwa 500 m/s (**Abb. 2**). Das schlägt die Existenz einer tieferen Einwärtsströmung vor, die helfen würde, den Sonnenfleck zu stabilisieren.

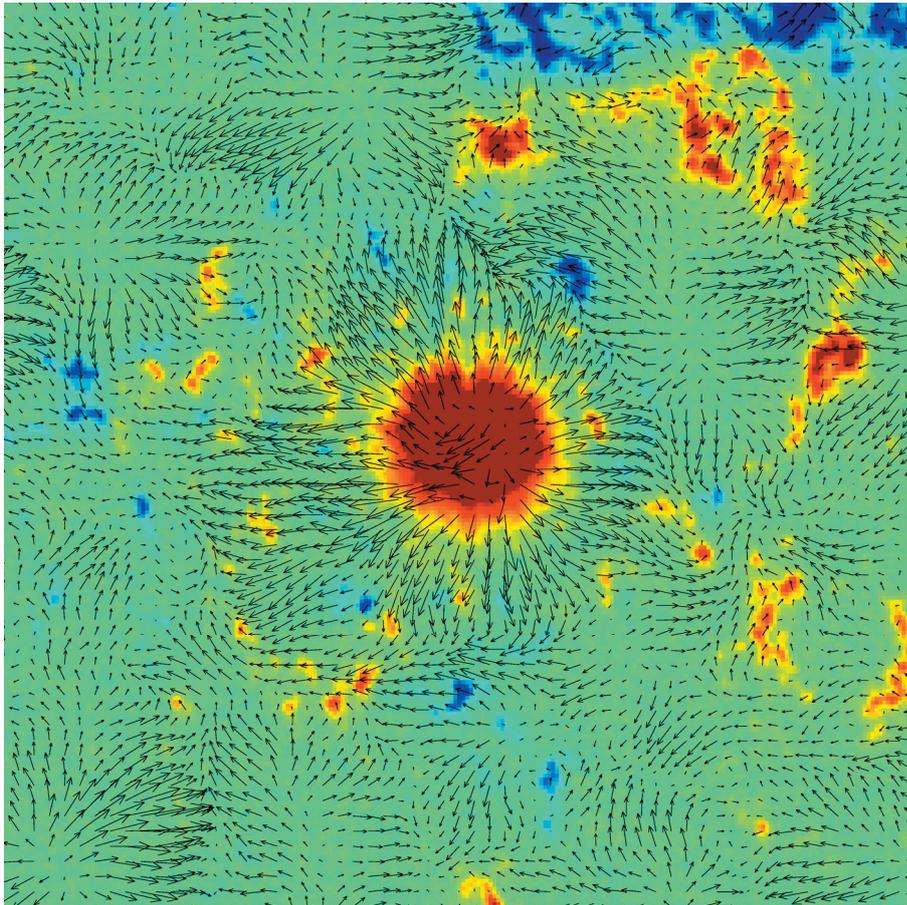


Abb. 2: Karte der horizontalen Strömungen um einen Sonnenfleck in einer Tiefe von 1000 km unter der Oberfläche. Strömungsgeschwindigkeiten (Pfeile) wurden aus gemessenen Anisotropien in seismischen Laufzeiten ermittelt. Der Sonnenfleck ist umgeben von einer Ausströmung mit einer Amplitude von etwa 500 m/s. Die Seitenlänge der Karte ist etwa 100000 Kilometer. Die roten und blauen Schattierungen zeigen die beiden Polaritäten des vom MDI/SOHO-Weltraumteleskop an der Oberfläche beobachteten Magnetfelds.

Urheber: Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung

Die physikalischen Bedingungen (Temperatur, Dichte, Magnetfeld) unterhalb eines Sonnenflecks hinterlassen ihre Spuren in den Wellen, die durch den Sonnenfleck laufen. Es ist bekannt, dass Sonnenflecken Wellen absorbieren, streuen und die Phasen der seismischen Wellen verschieben. Wie in **Abbildung 3** gezeigt, können diese Effekte direkt beobachtet werden, indem man das Wellenfeld an Beobachtungspunkten auf jeder Seite des Sonnenflecks korreliert. Die Interpretation der Beobachtungen ist jedoch eine außerordentliche Herausforderung. Denn in der Tat ändern einlaufende akustische oder Oberflächenschwerewellen ihre Art beim Eintritt in den Sonnenfleck und werden zu magneto-akustischen Wellen. Das kann nicht leicht mit Standardmethoden der Störungstheorie untersucht werden. Stattdessen wird die Ausbreitung von Wellen in magnetisierten Gebieten mit numerischen Simulationen untersucht, um so die helioseismischen Beobachtungen besser zu verstehen. Der von uns

entwickelte Code verfolgt die lineare Entwicklung von Wellenstörungen in einer dreidimensionalen, inhomogenen, magnetischen Atmosphäre. Ein vorläufiges Resultat zeigt **Abbildung 4**, welche die Wechselwirkung eines f-Mode-Wellenpakets mit einer magnetischen Röhre darstellt. Diese Simulation ist wichtig, da sie die früheren 2-D-Studien erweitert. Insbesondere erwähnenswert ist die Art, auf welche sich einlaufende Wellen in abwärtsgerichtete magneto-akustische Wellen umwandeln. Man erhofft sich von diesem Code viele weitere Anwendungen.

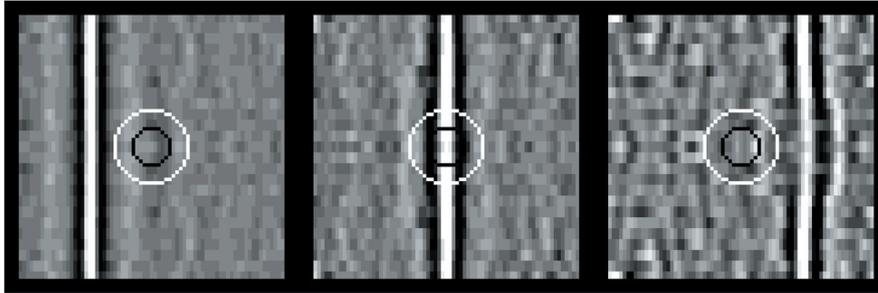


Abb. 3: Beobachtung der Verformung eines Wellenpakets (f-Modi) beim Durchgang durch einen Sonnenfleck. Die drei Abbildungen entsprechen drei verschiedenen Zeitpunkten (die Zeit schreitet von links nach rechts fort). Weiße Schattierungen entsprechen den Stellen großer Wellenamplitude. Eine Dispersionskorrektur wurde angewandt. Die Stelle des Sonnenflecks ist durch die schwarzen (Umbra) und weißen (Penumbra) Kreise angegeben. Das rechte Bild zeigt deutlich, dass das Wellenpaket beschleunigt wurde, als es den Sonnenfleck durchquerte.

Urheber: Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung

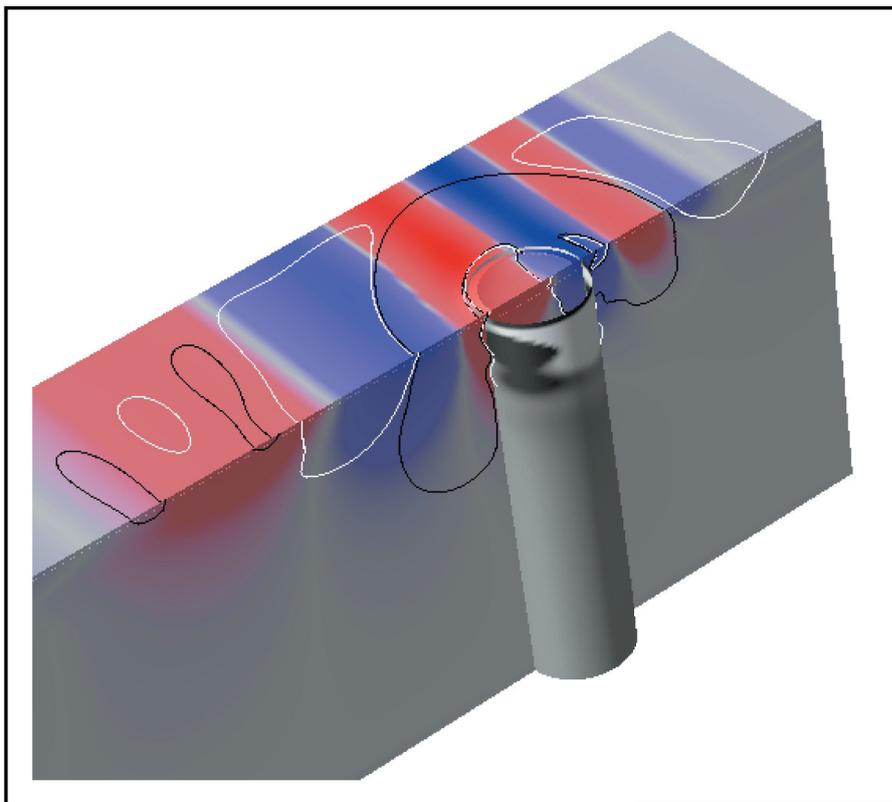


Abb. 4: 3-D numerische Simulation der Wellenausbreitung durch eine sonnenfleckartige Struktur in einer geschichteten Atmosphäre. Ein f-Mode-Wellenpaket läuft von rechts nach links. Die vertikale Komponente der Geschwindigkeit ist in blau und rot angezeigt. Die schwarzen und weißen Konturen zeigen die gestreute Komponente des Wellenfelds. Magneto-akustische Wellen werden innerhalb der Röhre angeregt.

Urheber: Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung

Obwohl die lokale Helioseismologie von Sonnenflecken und magnetisch aktiven Gebieten noch in den Kinderschuhen steckt, ist der kürzlich erzielte Fortschritt sowohl auf Seiten der Beobachtung als auch der Theorie sehr ermutigend. Es ist abzusehen, dass es in einer nicht zu fernen Zukunft möglich sein wird, magnetische Aktivität unter der Oberfläche abzubilden, noch bevor sie an der sichtbaren Sonnenoberfläche in Erscheinung tritt. Die Folgerungen wären weit reichend, insbesondere, um im Voraus vor aktiven Phänomenen in der Sonnenatmosphäre warnen zu können. Für weitere Informationen siehe unter: <http://www.mps.mpg.de/projects/seismo/>.