

The background of the slide is a composite image. On the left, a large, bright, orange-yellow sun is shown, with its surface covered in solar granulation. To the right of the sun, there are blue, concentric, wavy lines that resemble ripples on water, set against a dark, star-filled space background. The overall color palette is dominated by the warm tones of the sun and the cool blues of the waves.

Unsere Sonne – Feuer des Lebens
Öffentliche Vortragsreihe

Helioseismologie: Einblicke in das Innere der Sonne

Dr. Markus Roth,
Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung
25.4.2007



Die Sonne ein Stern

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

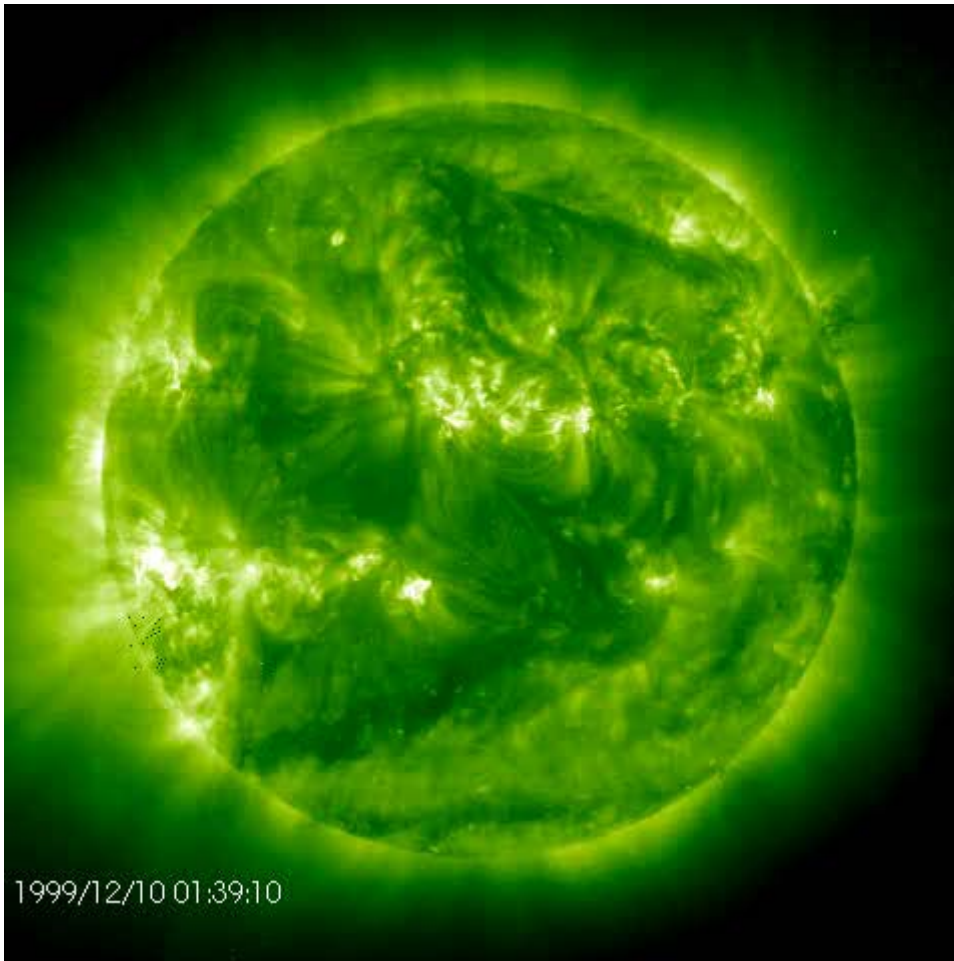
Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick

SOHO / EIT $\lambda=19.5 \text{ nm}$



Die Sonne ist ein gewöhnlicher Stern:

Masse:

$2 \times 10^{30} \text{ kg}$ (Erde: $6 \times 10^{24} \text{ kg}$)

Durchmesser:

1,5 Mio km (Erde: 12500 km)

Entfernung:

150 Mio km

Alter:

4,6 Mrd Jahre

Oberflächentemperatur:

ca. 6000° C

(Schmelztemperatur Eisen: 1538° C)



Theoretische Kenntnisse über das Sonneninnere

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere der Sonne

Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick

Wie ist die Sonne aufgebaut?

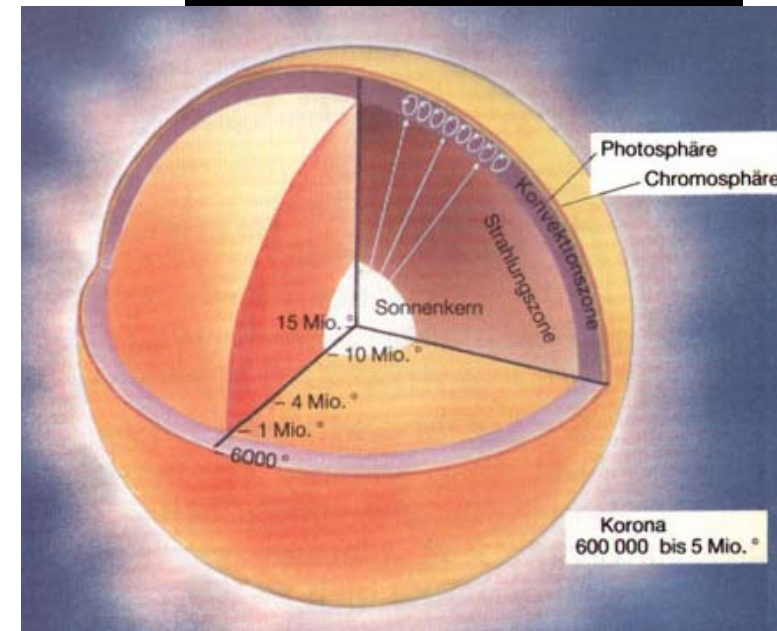
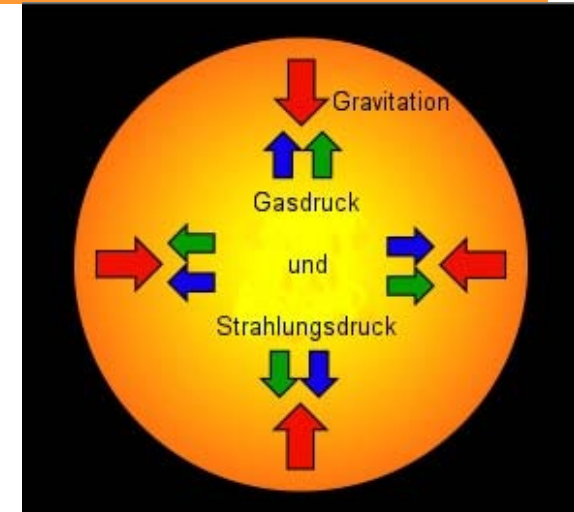
Theorie des inneren Aufbaus der Sterne basiert auf den Grundgesetzen der Physik:

**Energieerhaltungssatz,
Massenerhaltung,
Impulserhaltung**

Druck und Gravitation halten sich die Waage
→ **die Sonne ist stabil**

Aus physikalischen Gesetzen kann ein
theoretisches Modell der Sonne erstellt werden.

**Gibt es Möglichkeiten
in die Sonne „hineinzusehen“?**





Leightons Messungen der Sonnenoszillationen

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

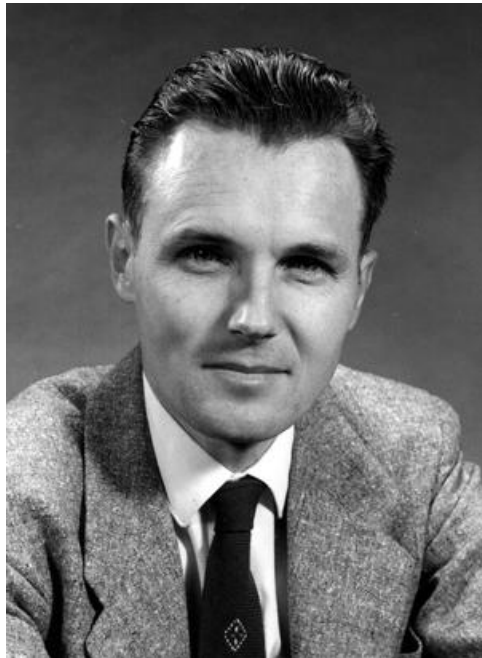
Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick



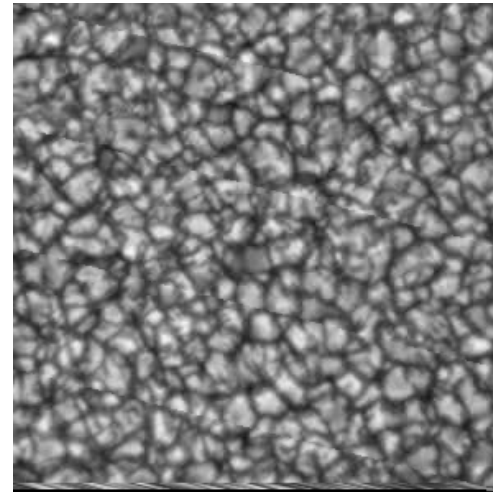
Robert Leighton

10.9.1919 - 9.3.1997

Messungen der Bewegungen der Sonnenoberfläche

Ziel:

Lebensdauer von Granulen („Gasblasen“) bestimmen



Granulation

Verwendeter physikalischer Effekt:
Doppler-Effekt



Der Doppler-Effekt

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick

Der Doppler-Effekt führt zu einer Frequenzveränderung einer Welle, wenn der Sender bewegt ist.



Ch. Doppler
(29. 11.1803 – 17.3.1853)

Vor dem Sender:

höhere Frequenz

hinter dem Sender:

niedrigere Frequenz

Ein Effekt, den man u.a. bei vorbeifliegenden Stechmücken hören kann.

Geschwindigkeit des Senders ergibt sich aus der Frequenzveränderung



Wichtig: Auch Licht ist eine Welle, Dopplereffekt meßbar



Leightons Messungen der Sonnenoszillationen

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

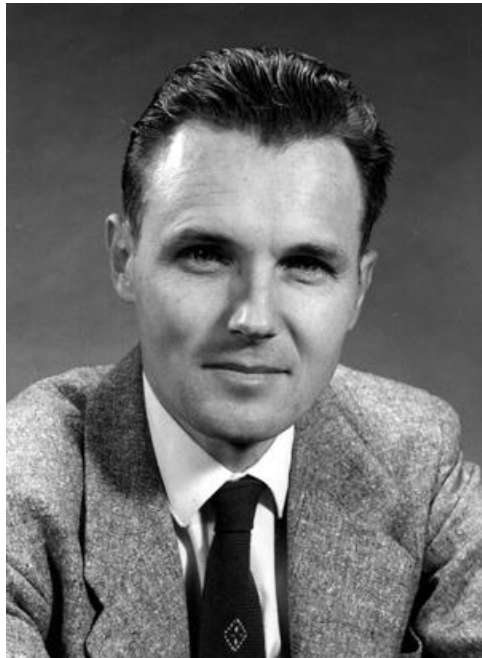
Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

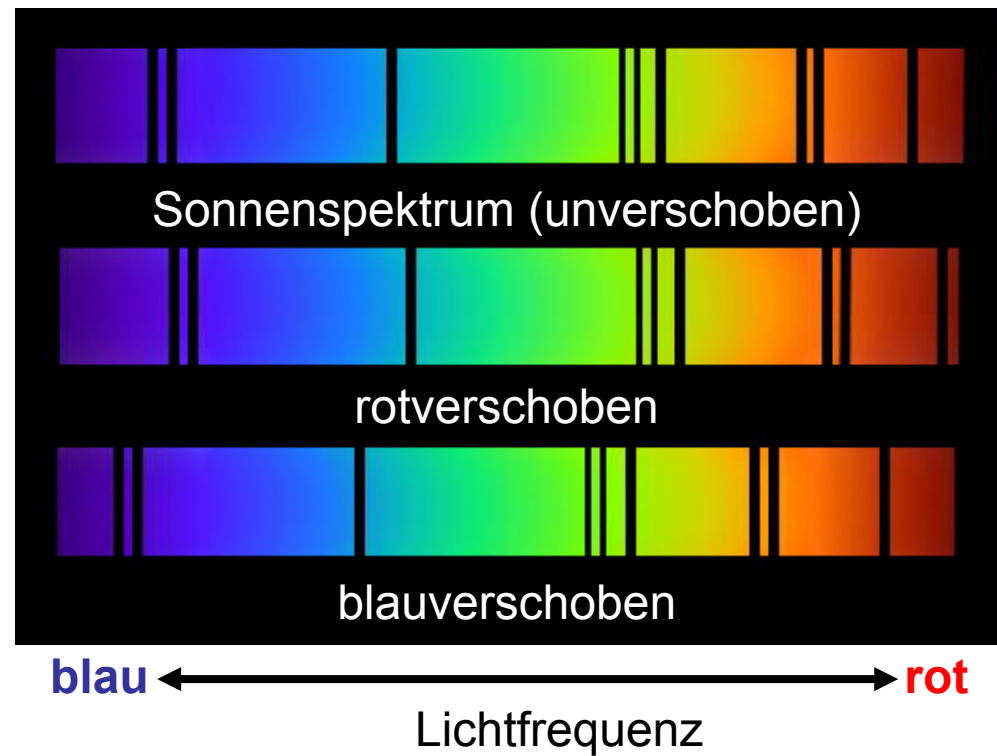
Ausblick



Robert Leighton

10.9.1919 - 9.3.1997

Messungen der Bewegungen der Sonnenoberfläche
über Dopplereffekt des Sonnenlichts:



Geschwindigkeitskarte der Granulation



Leightons Messungen der Sonnenoszillationen

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

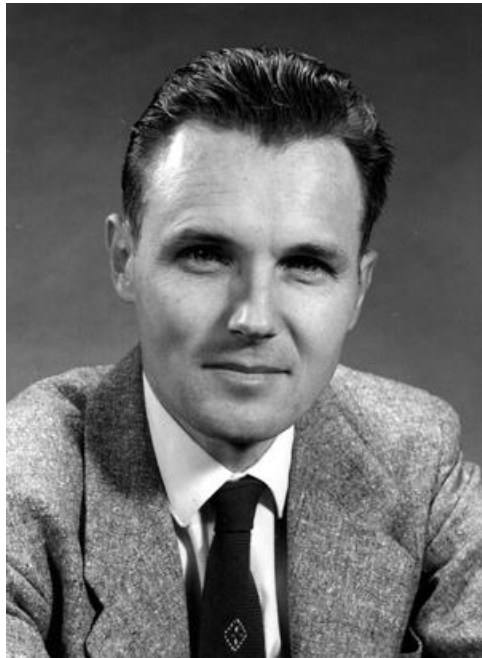
Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick



Robert Leighton

10.9.1919 - 9.3.1997

Messungen der Bewegungen der Sonnenoberfläche
über Dopplereffekt des Sonnenlichts:

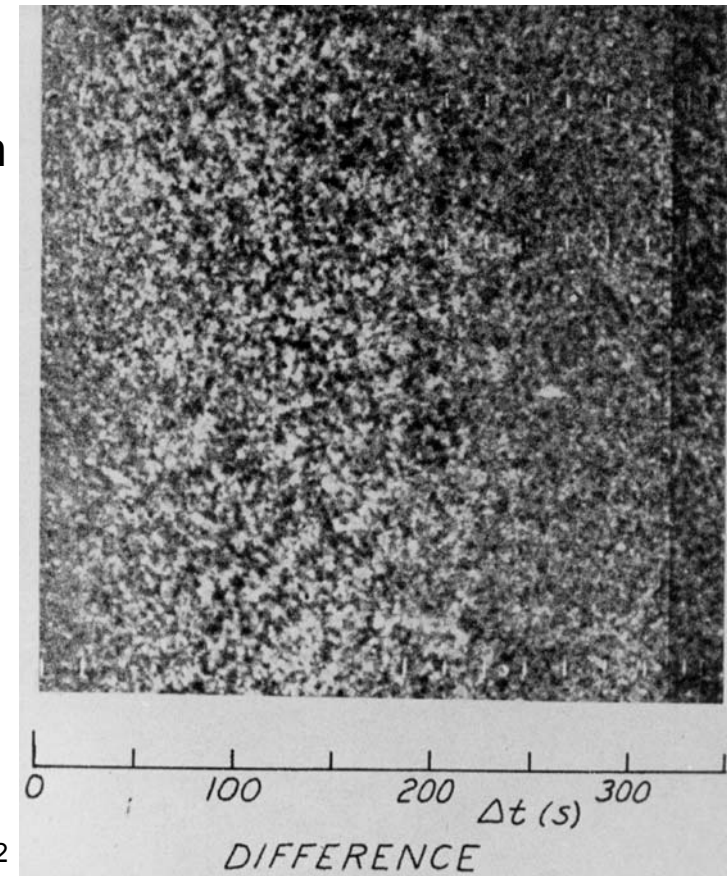
Ziel:

Lebensdauer von Granulen
(Gasblasen)
aus Veränderungen in der
Geschwindigkeitskarte

stattdessen:

Sonne schwingt im
5 Minuten Rhythmus

**Woher kommen diese
Schwingungen?**





Theoretische Erklärung

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

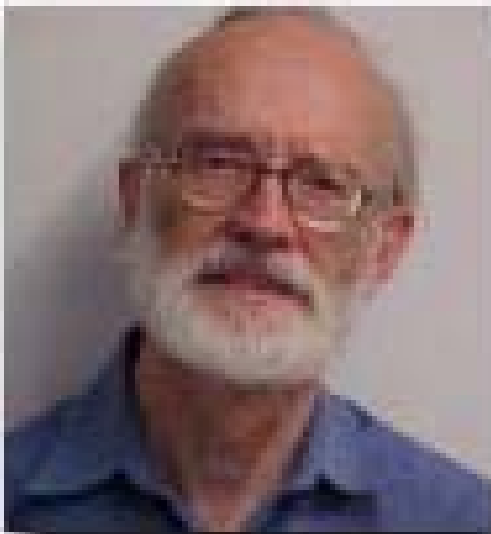
Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick



John Leibacher & Robert Stein



Roger Ulrich

→ **Die Sonne schwingt wie ein Musikinstrument**



Schwingungen einer Saite

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

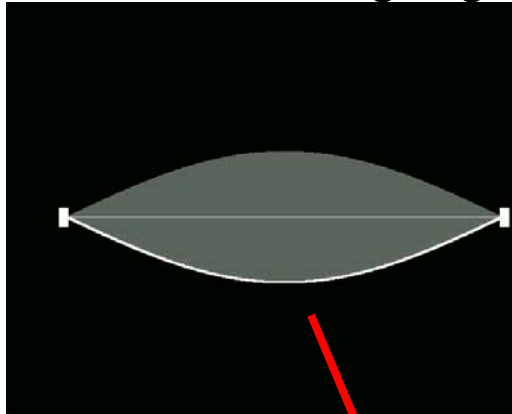
Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

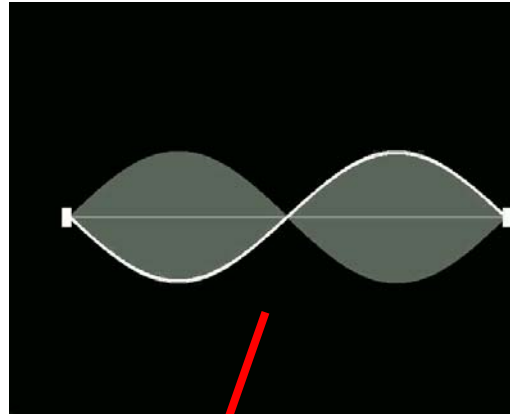
Ergebnisse

Ausblick

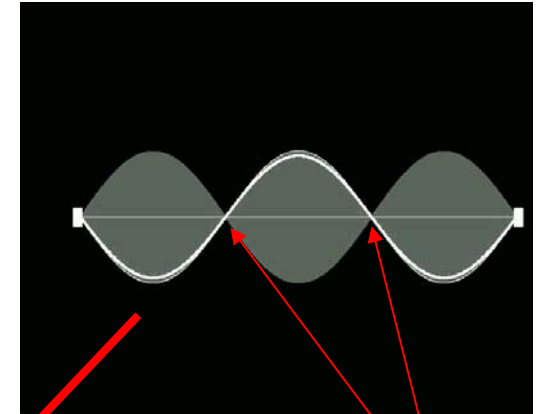
Grundschiwingung



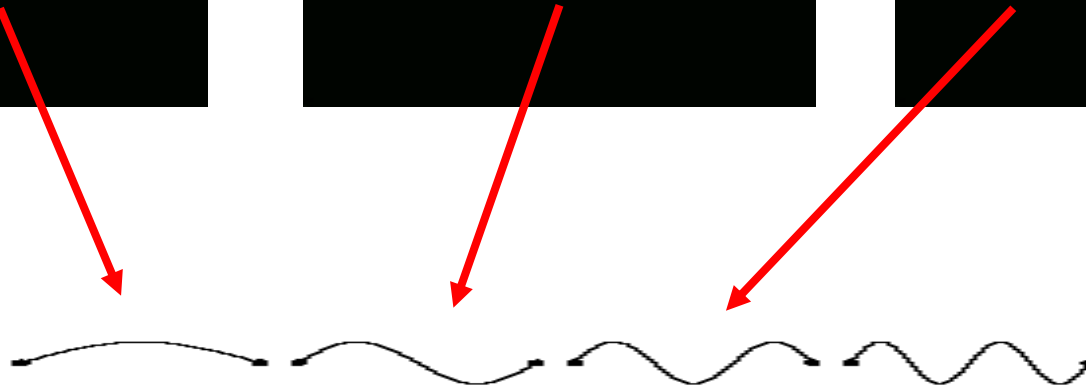
1. Oberton



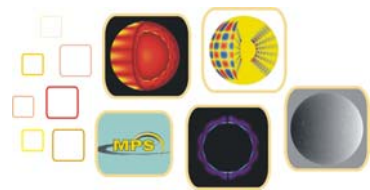
2.Oberton



Knoten



Frequenz steigt



Resonanzkatastrophe: Die Zerstörung der Tacoma Brücke

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick



Tacoma/USA, 7. November 1940

Bestimmte Wellen (Resonanzen) können sich in Objekten
aufschaukeln

→ **Resonanzkatastrophe**



Oszillationen in der Geige

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick



Klänge einer Geige sichtbar gemacht:

Die Resonanzschwingungen machen den typischen Klang eines Instruments aus



Schwingungen der Sonne

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick

So ist das auch bei der Sonne und vielen Sternen!

→ **Die Sonne kann zu Schwingungen angeregt werden**

Anregung:

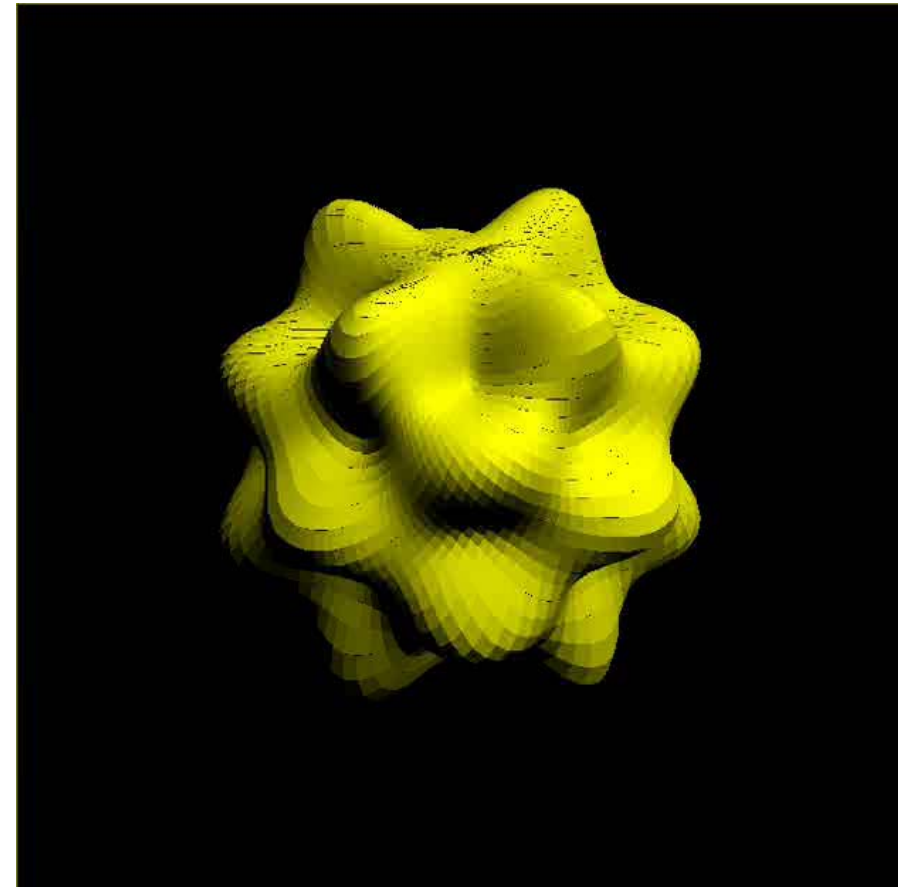
Kleine Auslenkungen aus dem Gleichgewichtszustand der Sonne führen zu Oszillationen.

kleinen Auslenkungen = Schallwellen

Ursache: Granulation (Turbulenzen)

Die Überlagerung der Schallwellen führt zur Verstärkung oder zur Auslöschung.

→ **Grundschiwingung und Obertöne sind möglich**





Solare Resonanzschwingungen

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

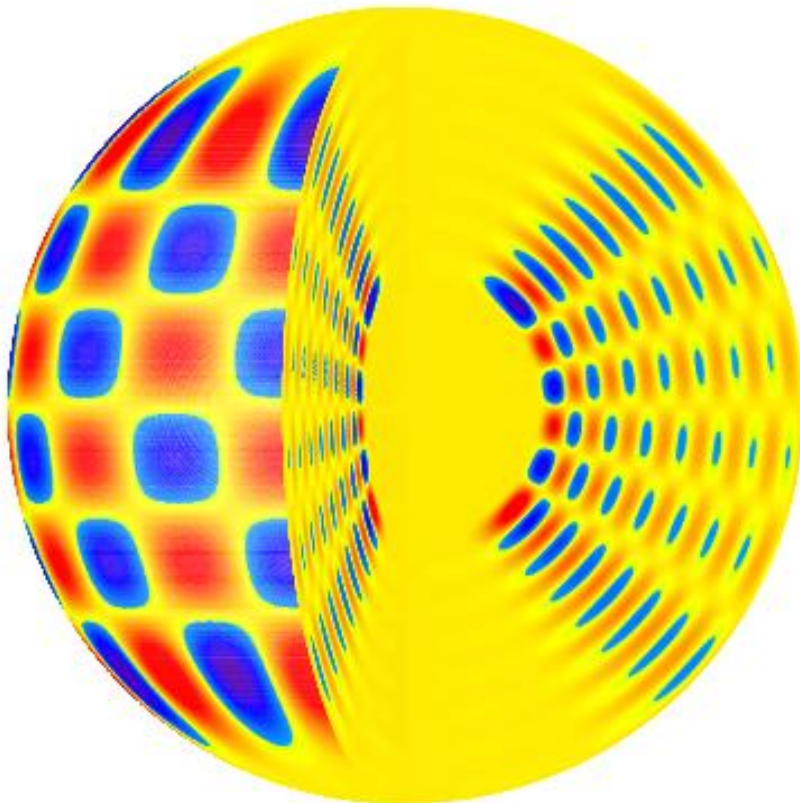
Helioseismologie

Ergebnisse

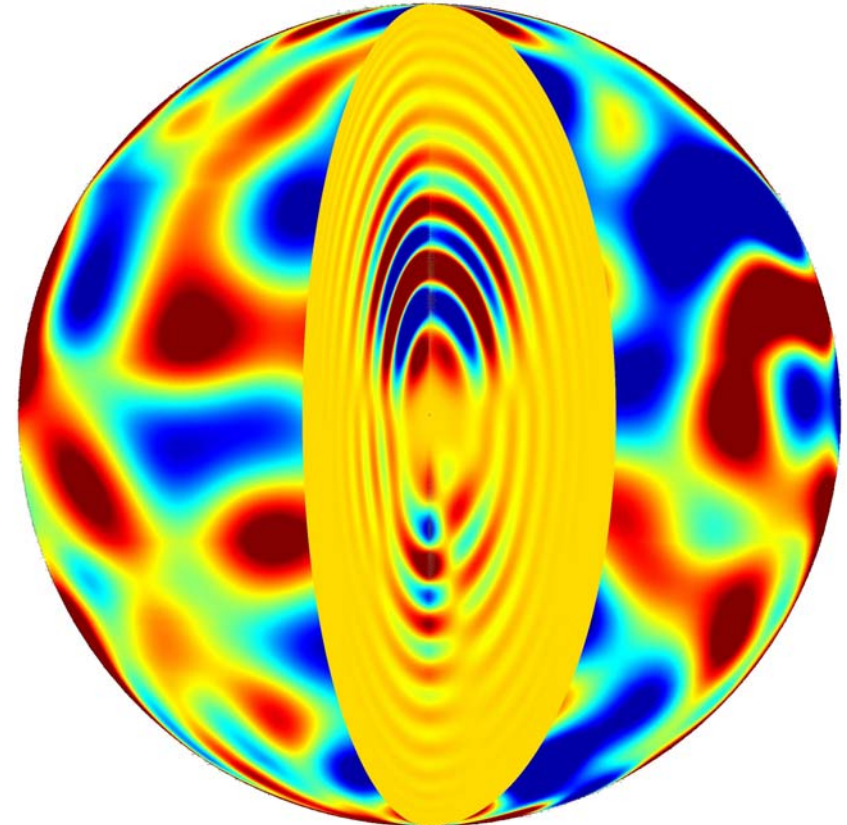
Ausblick

Alle Schwingungen sind in der Sonne gleichzeitig angeregt

Einzelner Schwingungsmodus



Überlagerung vieler Schwingungsmodi





Solare Resonanzschwingungen

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

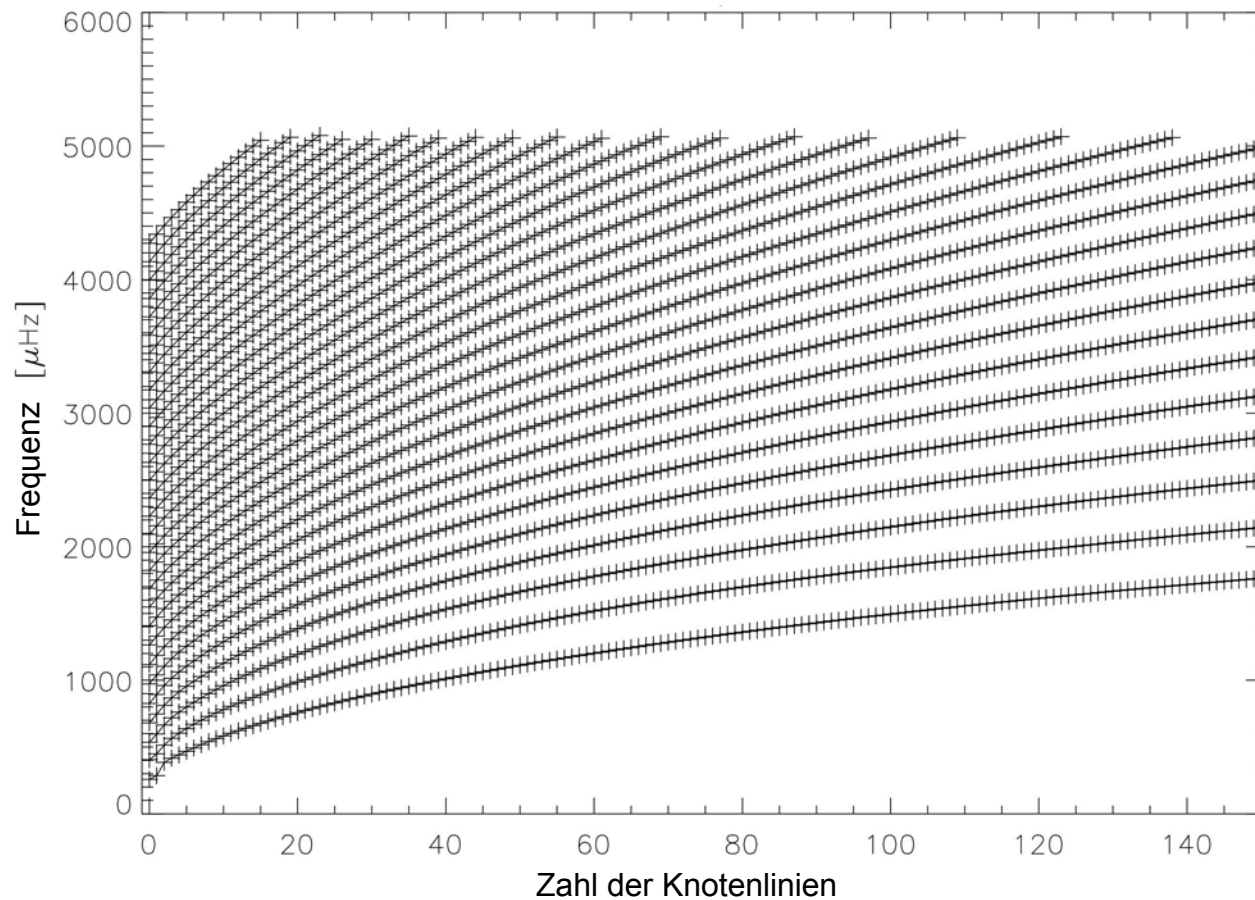
Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick

Die „Töne“ der Sonne (Theorie, ein kleiner Ausschnitt)





Experimenteller Nachweis

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

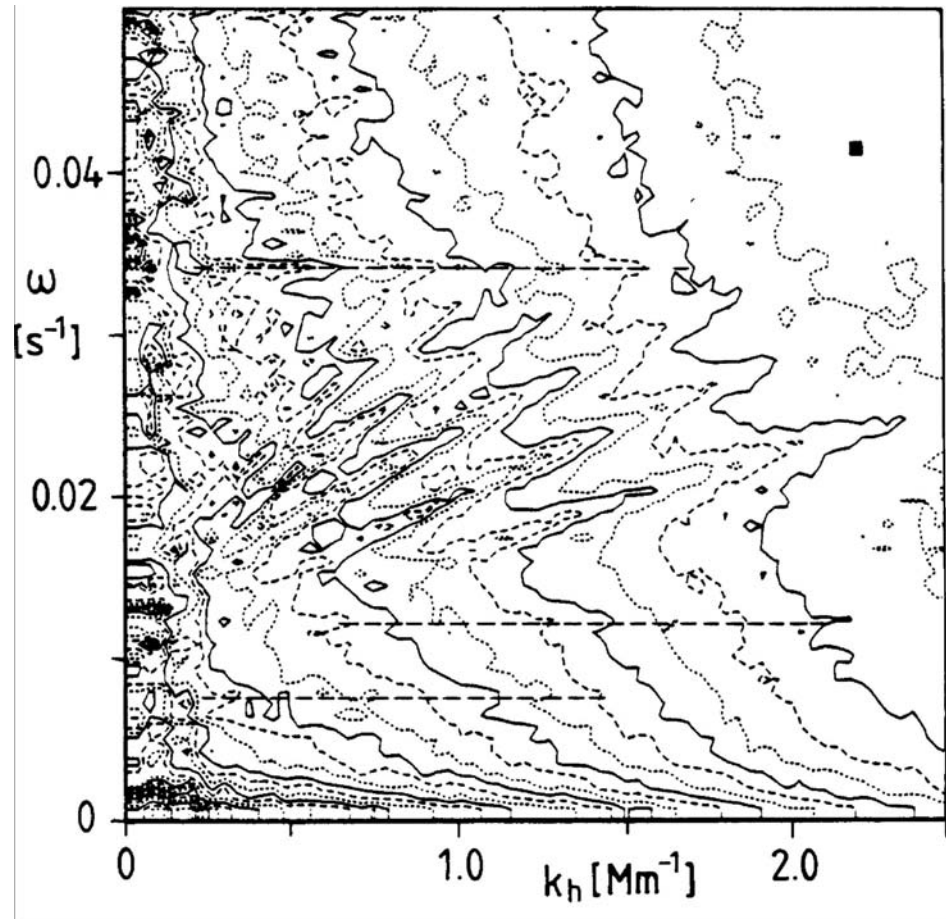
Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick



Franz-Ludwig Deubner, 1974





Seismologie der Sonne

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick

Unterschiedliche Wellen laufen durch unterschiedliche Bereiche in der Sonne
→ Information aus verschiedenen Tiefen

Seismologie der Sonne damit möglich

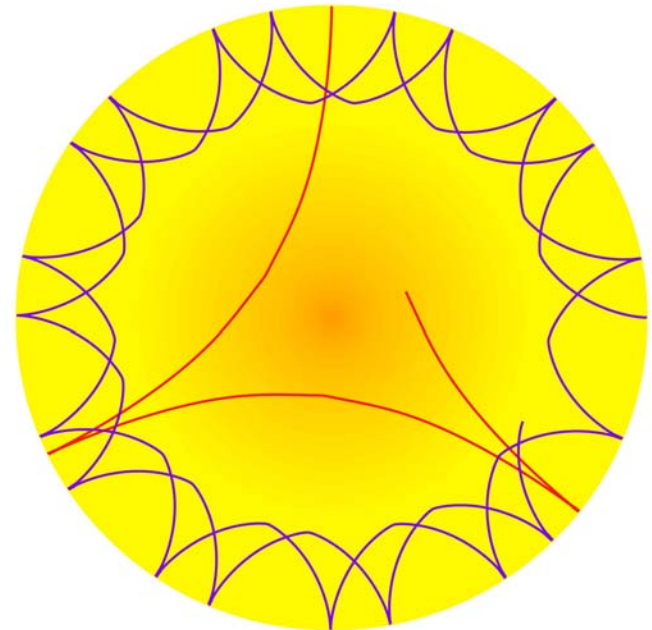
„Helioseismologie“

*Aus den Tönen, auf den Aufbau des
Instruments schließen*

Voraussetzungen:

- Sehr genaue Messung der Frequenzen, um die Wellen trennen zu können
- lange u. ununterbrochene Messungen

Frequenzauflösung: $\Delta\nu = \frac{1}{T}$





Instrumente

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick

GONG (Global Oscillation Network Group)



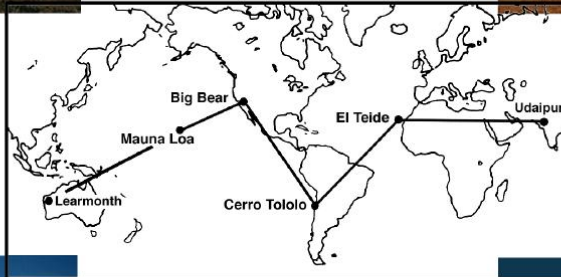
Mauna Loa



Big Bear



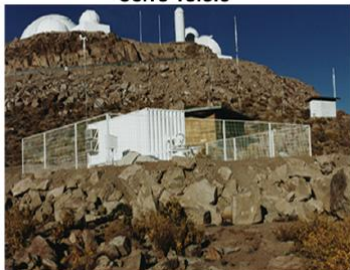
Udaipur



Cerro Tololo



Learmonth



El Teide

Netzwerk aus sechs kleinen
Sonnenteleskopen seit 1995

Ständige Sonnenbeobachtung
möglich (keine nächtliche
Unterbrechung)

Stationen sind vollständig
automatisiert.



Instrumente

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

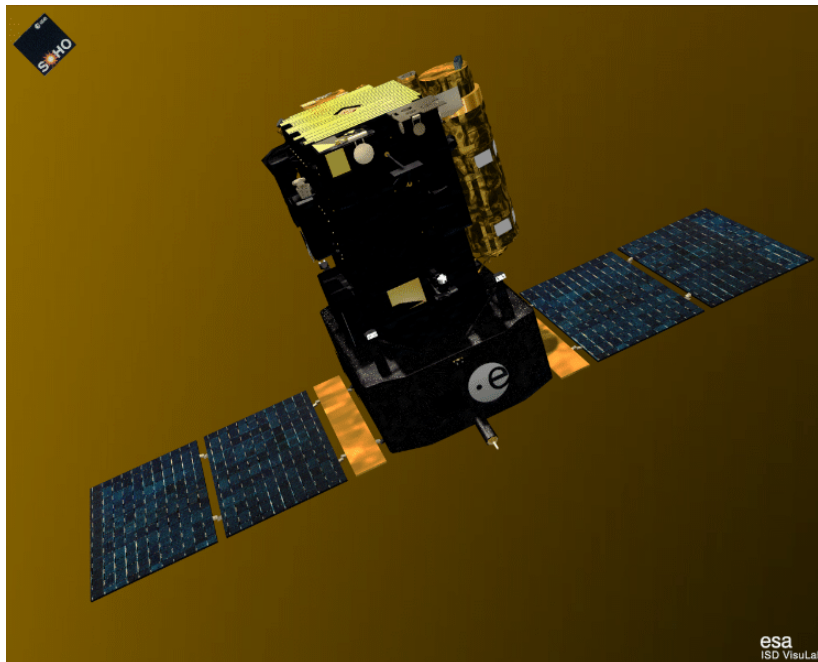
Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick

SoHO (Solar Heliospheric Observatory)



Sonnenobservatorium im
Weltraum seit 1996

ununterbrochene
Sonnenbeobachtung möglich

befindet sich an einem
Lagrange-Punkt
(Gleichgewicht zwischen der
Anziehung von Erde u. Sonne)



Sonnenoszillationen heute

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

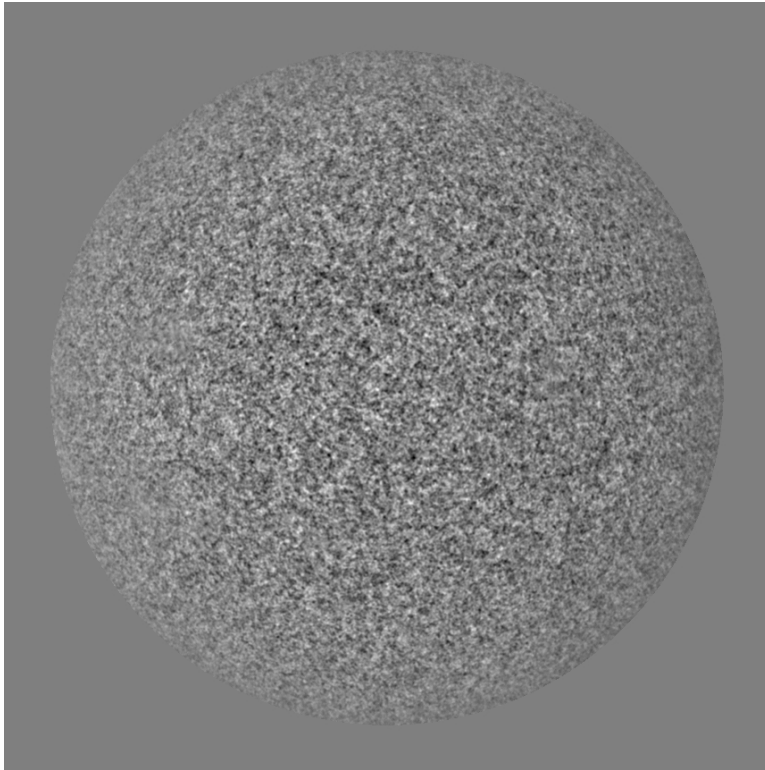
Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

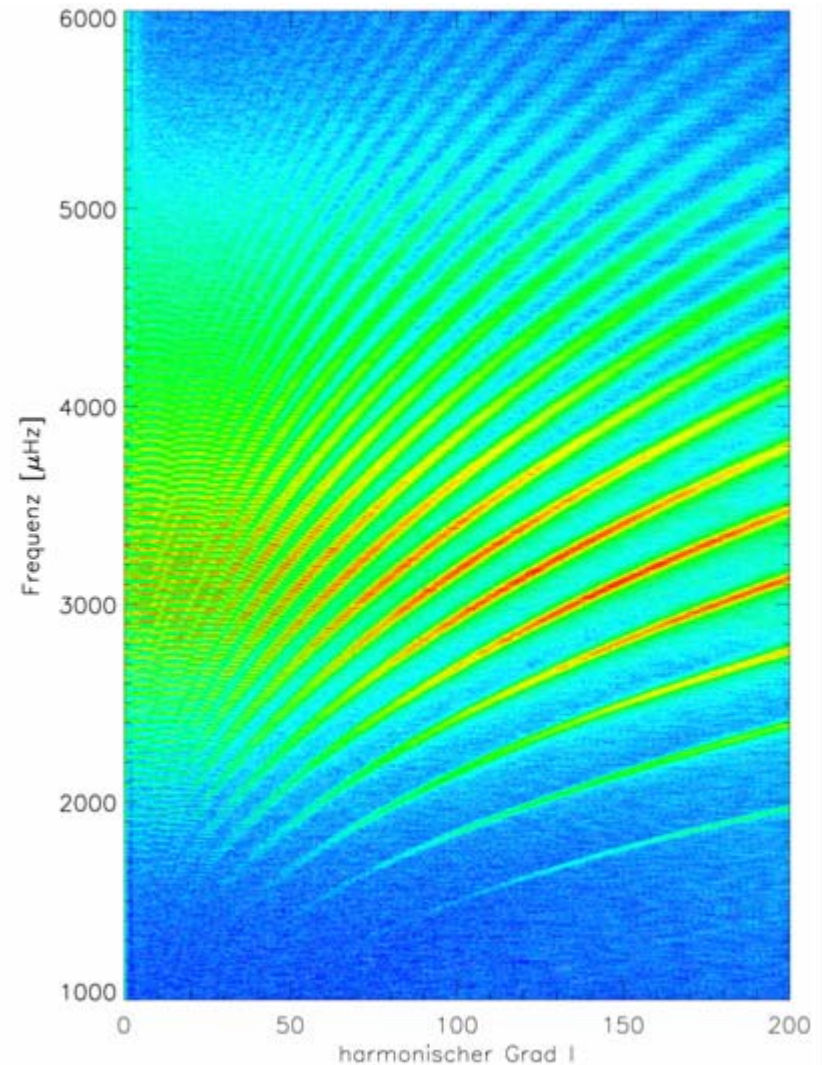
Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick



10 Millionen Schwingungen,
gleichzeitig angeregt.





Innerer Aufbau der Sonne

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

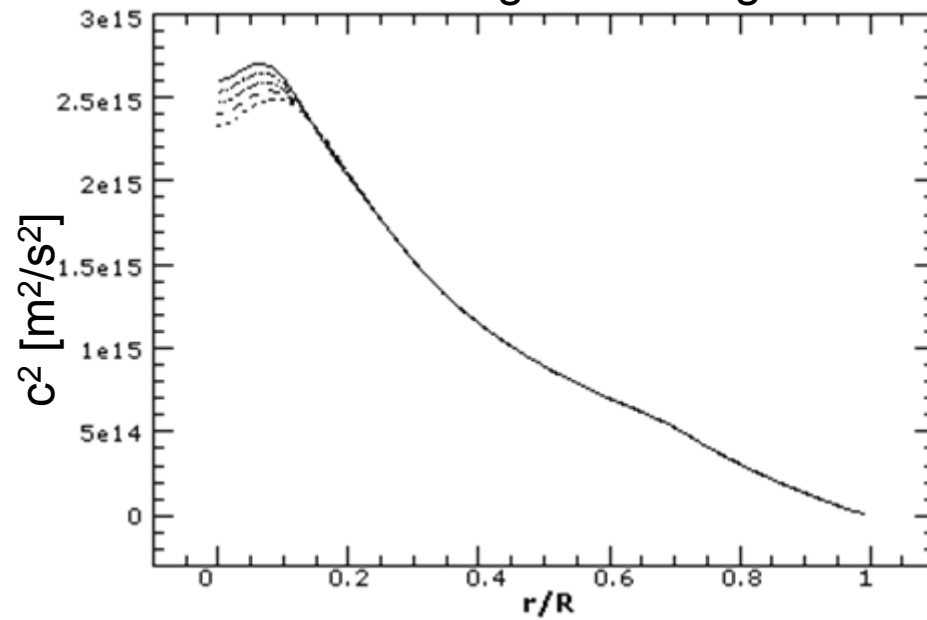
Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

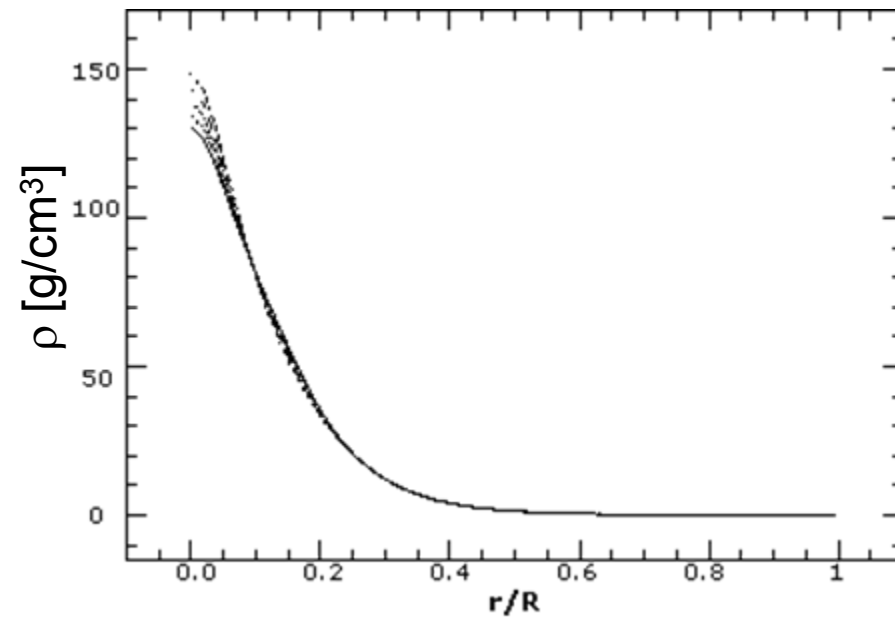
Ausblick

Schallgeschwindigkeit



(Kosovichev, 1996)

Dichte



(Vorontsov, 2002)



Innerer Aufbau der Sonne

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

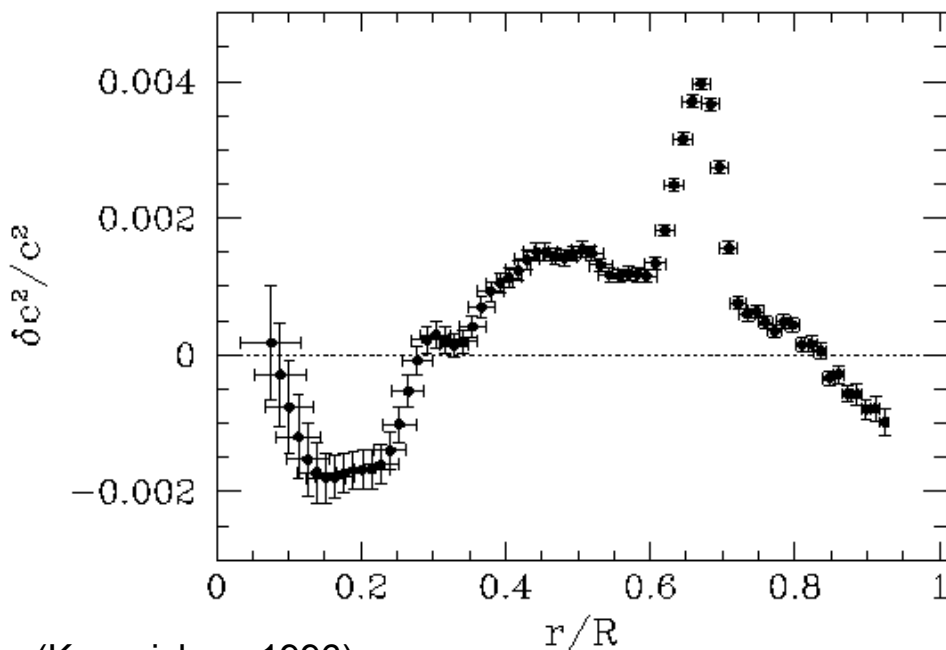
Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

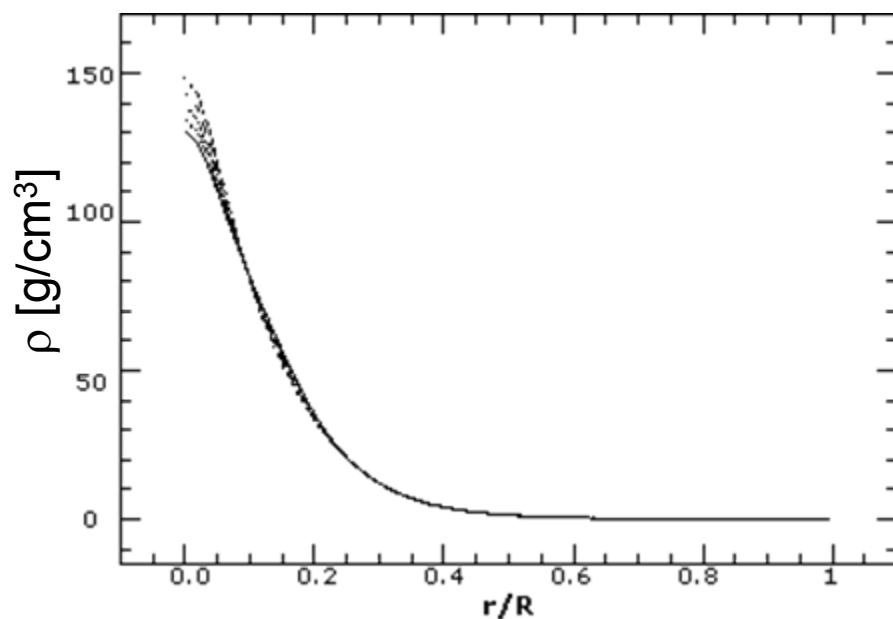
Ausblick

Schallgeschwindigkeit



(Kosovichev, 1996)

Dichte



(Vorontsov, 2002)

Unterschied zwischen theoretischem Modell des inneren Aufbaus der Sonne und Helioseismologie: **etwa 2%**



Zentraltemperatur der Sonne

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

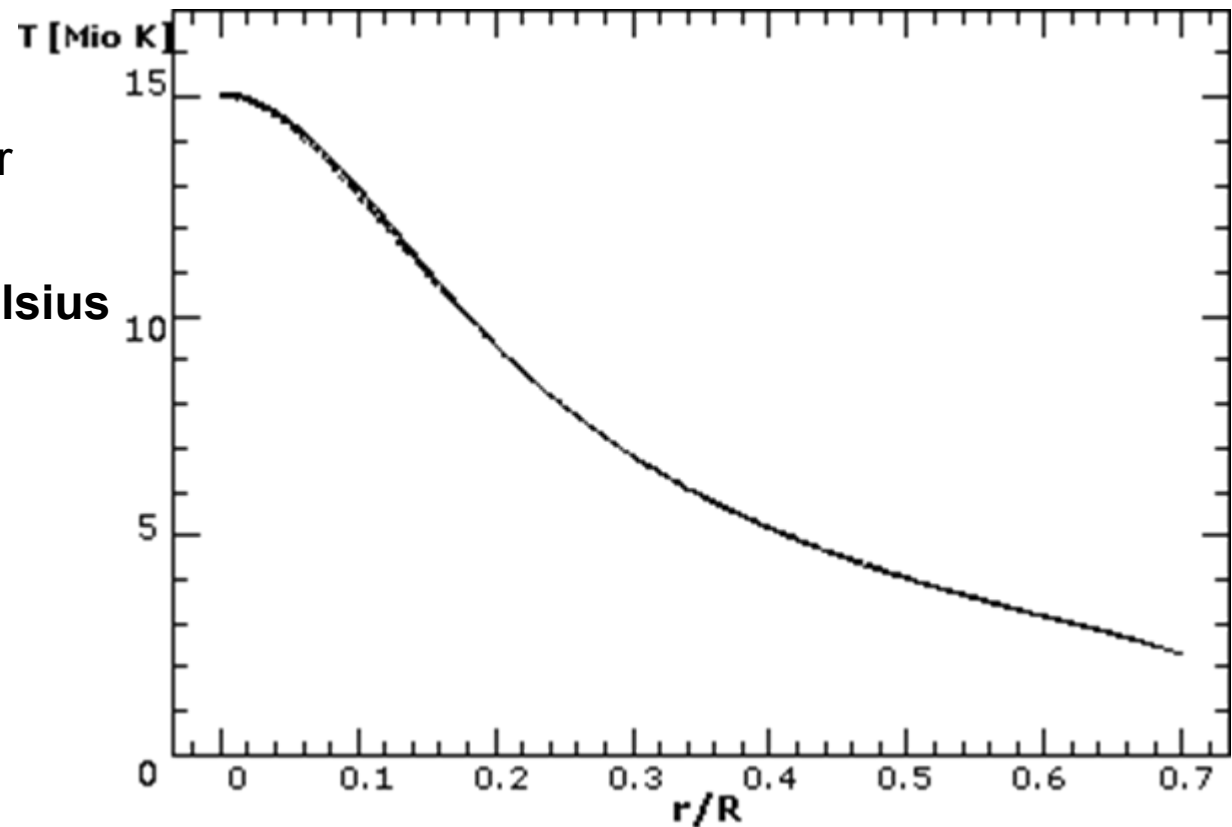
Ausblick

Die Zentraltemperatur der
Sonne beträgt:

15,7 Millionen Grad Celsius

Unsicherheit: 2%

→ **Neutrinoproblem**



(Vorontsov, 2002)



Neutrinoproblem der Sonne

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

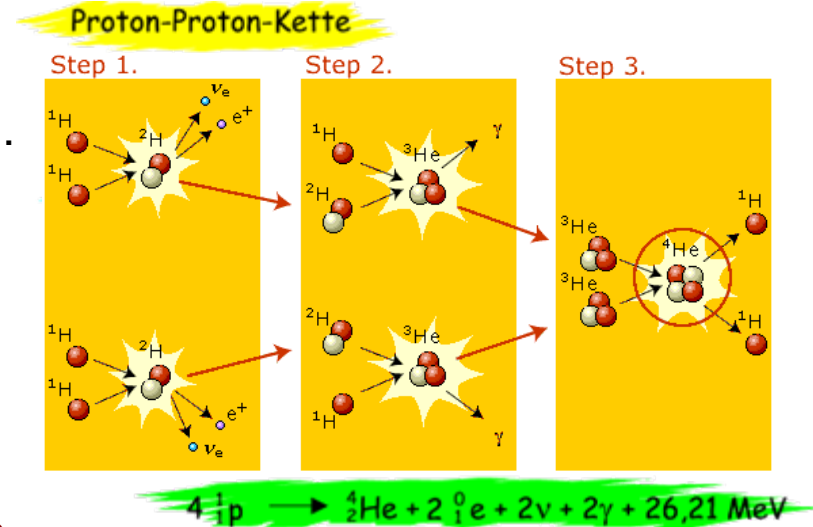
Ergebnisse

Ausblick

Geschwindigkeit von Kernfusionsprozessen im Sonneninnern sind sehr temperaturempfindlich.

Freiwerdende Neutrinos (ν_e) können auf der Erde nachgewiesen werden.

Problem: *Weniger Neutrinos nachgewiesen als Theorie des inneren Aufbaus der Sonne vorhersagt (1/3 – 1/2).*



Aber: Helioseismologie bestätigte die theoretisch erwartete Temperatur im Kern der Sonne → **Sonnenmodell richtig!**

Annahme der Teilchenphysik: Neutrinos sind masselos

Lösung: Neutrinos mit Masse ändern den Typ.
Andere Typen waren bisher nicht nachweisbar.



Differentielle Rotation

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

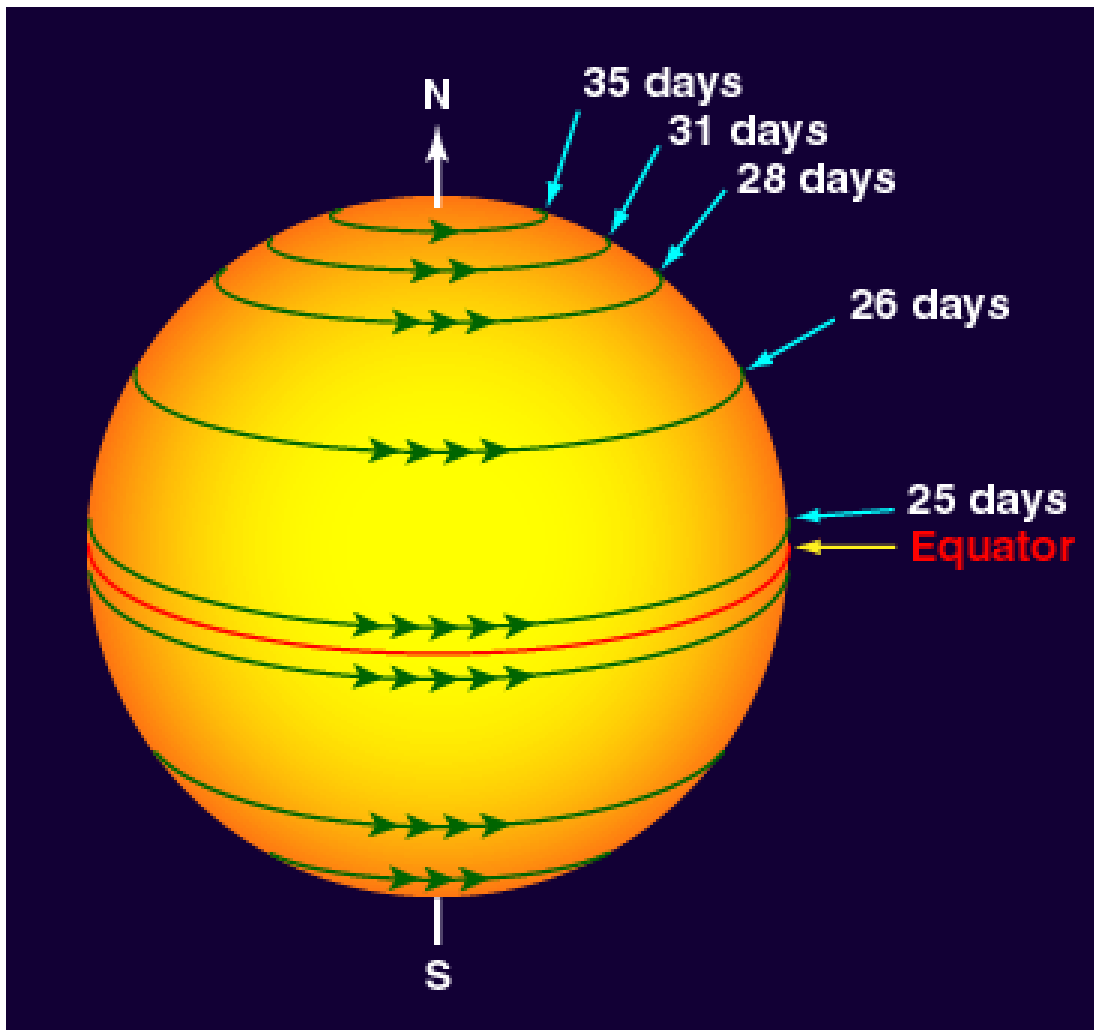
Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick



Sonne rotiert differentiell:

*Äquator rotiert schneller als
die Polregionen*

Bestimmung des Verlaufs der
Rotation im Sonneninneren
mittels **Helioseismologie**



Die Rotation des Sonneninnern

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

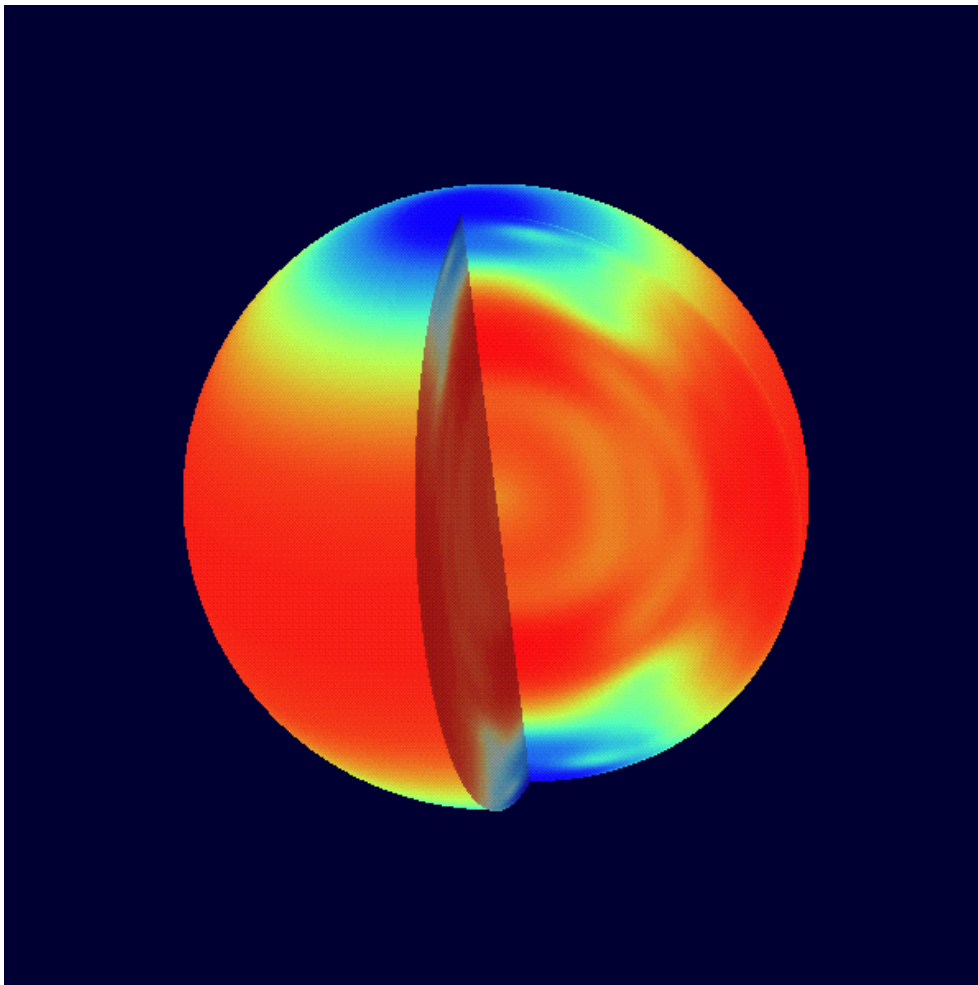
Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick

langjähriges Mittel der differentiellen Rotation in der Sonne:



Unter der Oberfläche:
Ausgedehnter Bereich
schneller Strömung

Tiefe: ca. 200.000 km

Breite: ca. 500.00 km

rote Bereiche bewegen
sich etwa 2000 km/h
schneller als die blauen Bereiche

Kern rotiert starr

(Universität Stanford)



Zonale Strömung

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

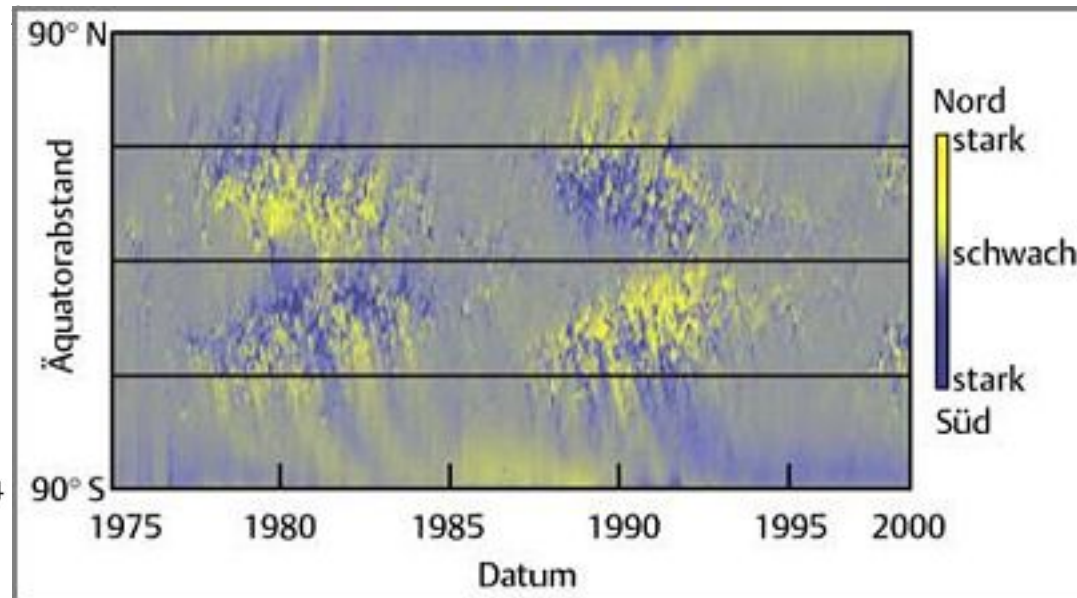
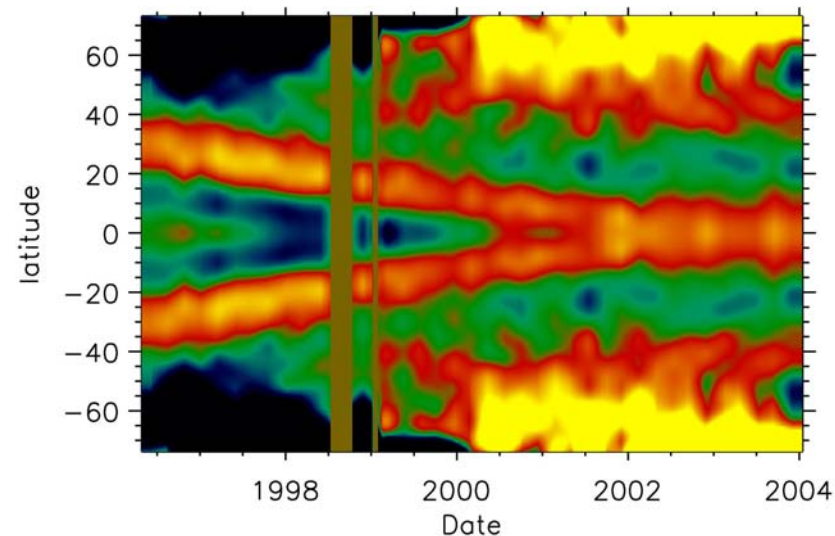
Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick

Differenz zwischen monatlicher Messung und langjährigem Mittel
zeigt Zonen schneller und langsamerer Rotation.

Zeitskala: 11 Jahre



Erscheinungsorte der Sonnenflecken

→ Zusammenhang zwischen Veränderungen im Sonneninnern und anderen
Schwankungen der Sonne



Der Herzschlag der Sonne

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

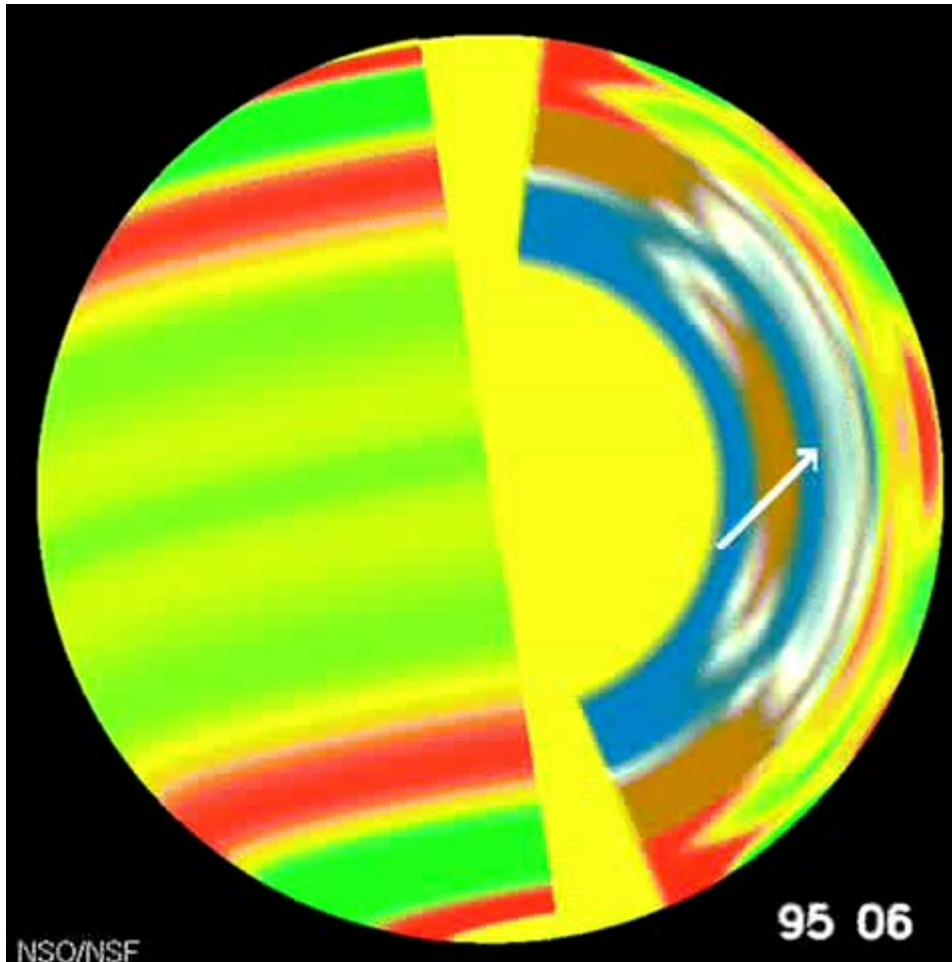
Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick



Nicht nur das Magnetfeld variiert
mit einem 11 Jahres-Rhythmus,

auch die innere Dynamik der
Sonne ist variabel.

Am Boden der Konvektionszone,
zeigt sich sogar ein
1,3 Jahres-Rhythmus

(NASA Animation)



Schwankungen der Sonne

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

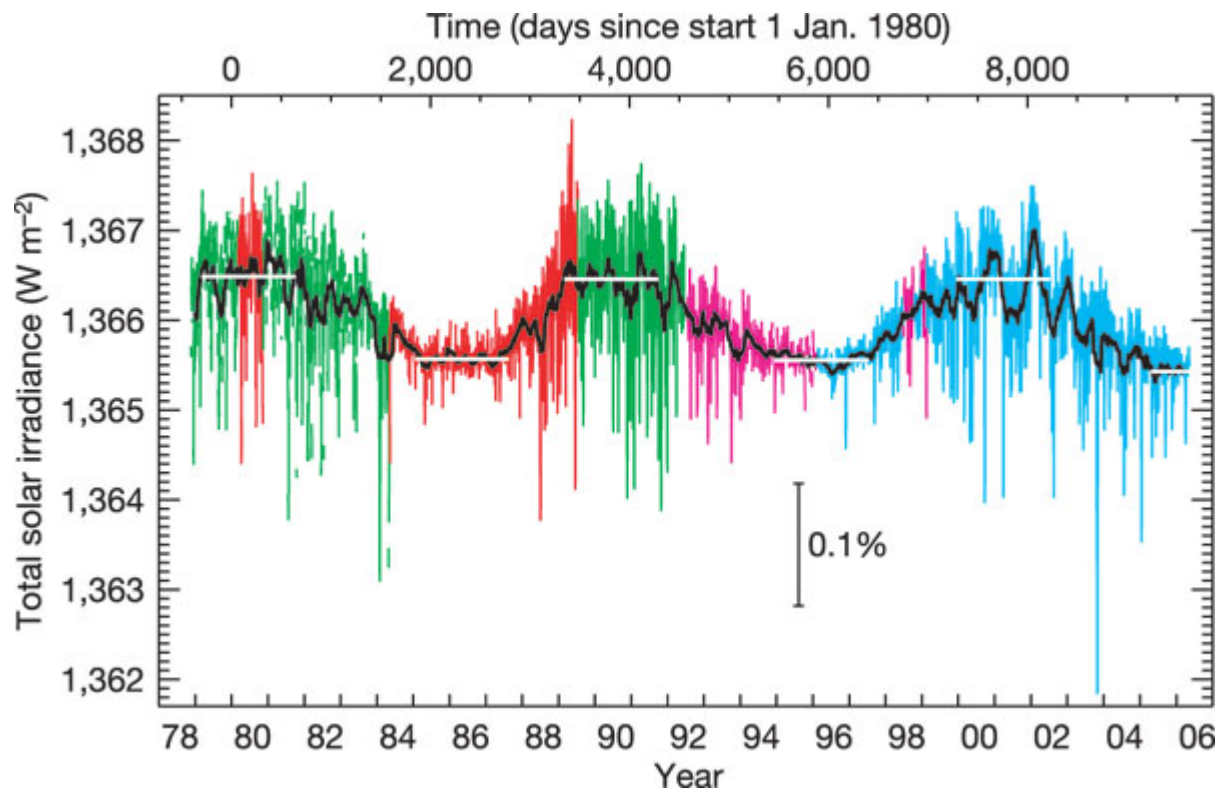
Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick

Schwankungen in der Gesamtstrahlung zeigen einen 11-Jahres-Rhythmus





Schwankungen der Sonne

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

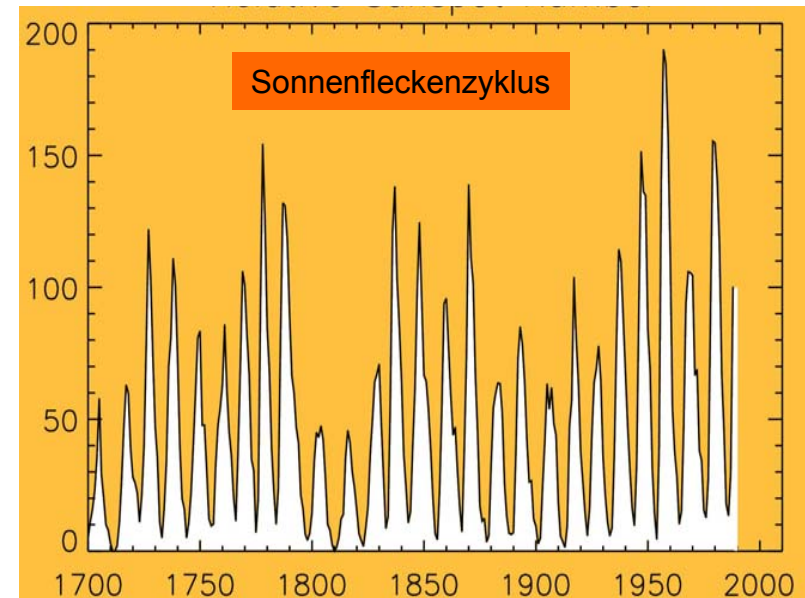
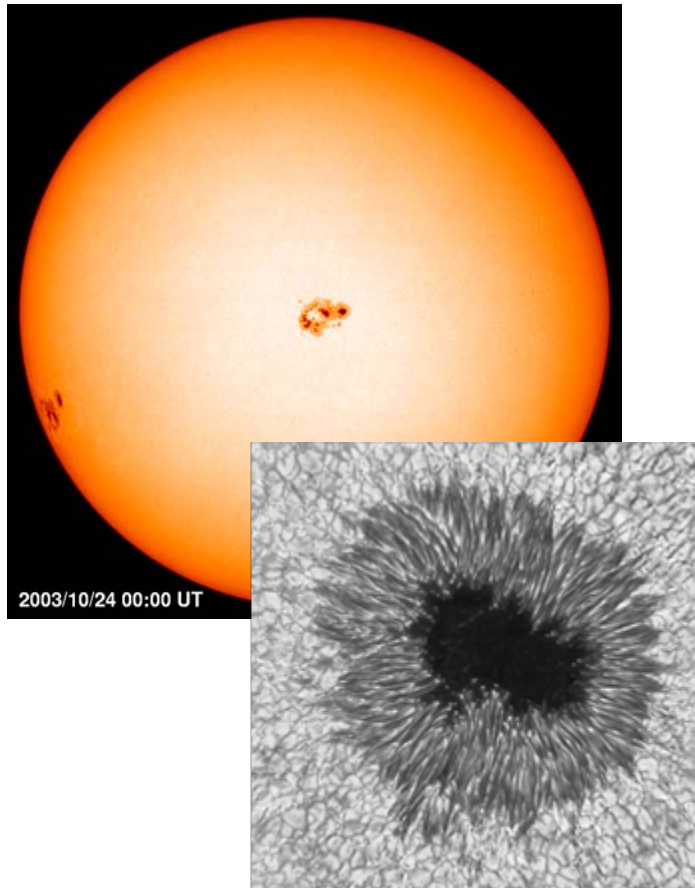
Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick

Die Häufigkeit von Sonnenflecken schwankt ebenfalls innerhalb von 11 Jahren



Ziele der Helioseismologie/Sonnenphysik:
Physikalische Ursachen im Sonneninnern
verstehen

→ *Einfluß auf Leben / Erdklima?*
(Vorträge nächste Woche / Juni)



Time-Distance Helioseismology

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

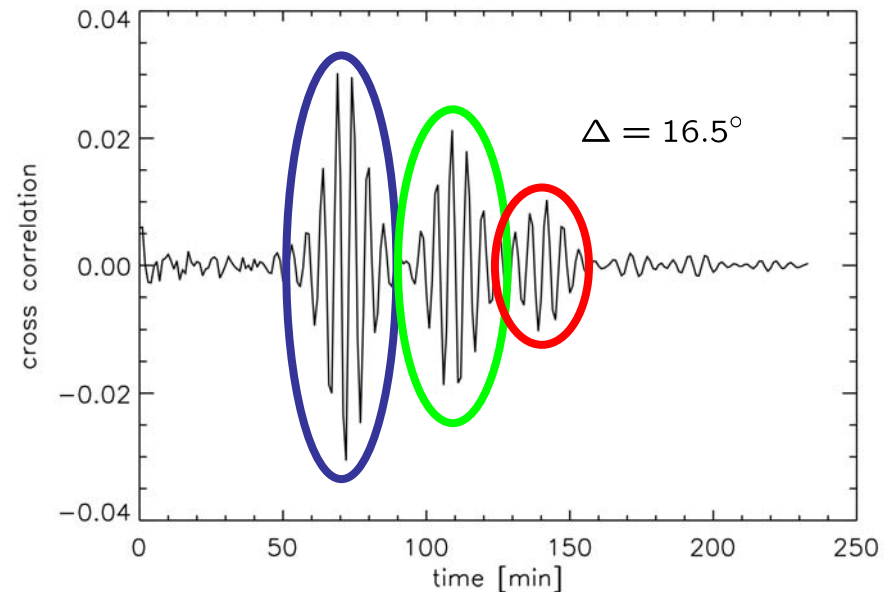
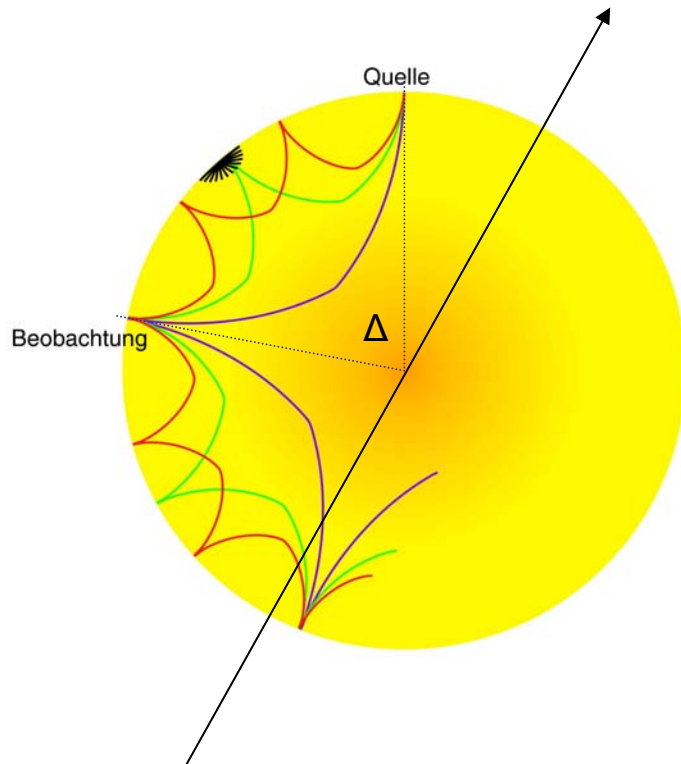
Ausblick

Ausnutzen von der Beziehung zwischen
Laufzeiten und Laufstrecken:

Hindernisse auf dem Weg einer Welle führen zu
Verzögerungen am Beobachtungsort.

Damit ist das Aufspüren von

Hindernissen = Schwankungen in Wellengeschwindigkeit
möglich





Tiefenstruktur eines Sonnenflecks

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

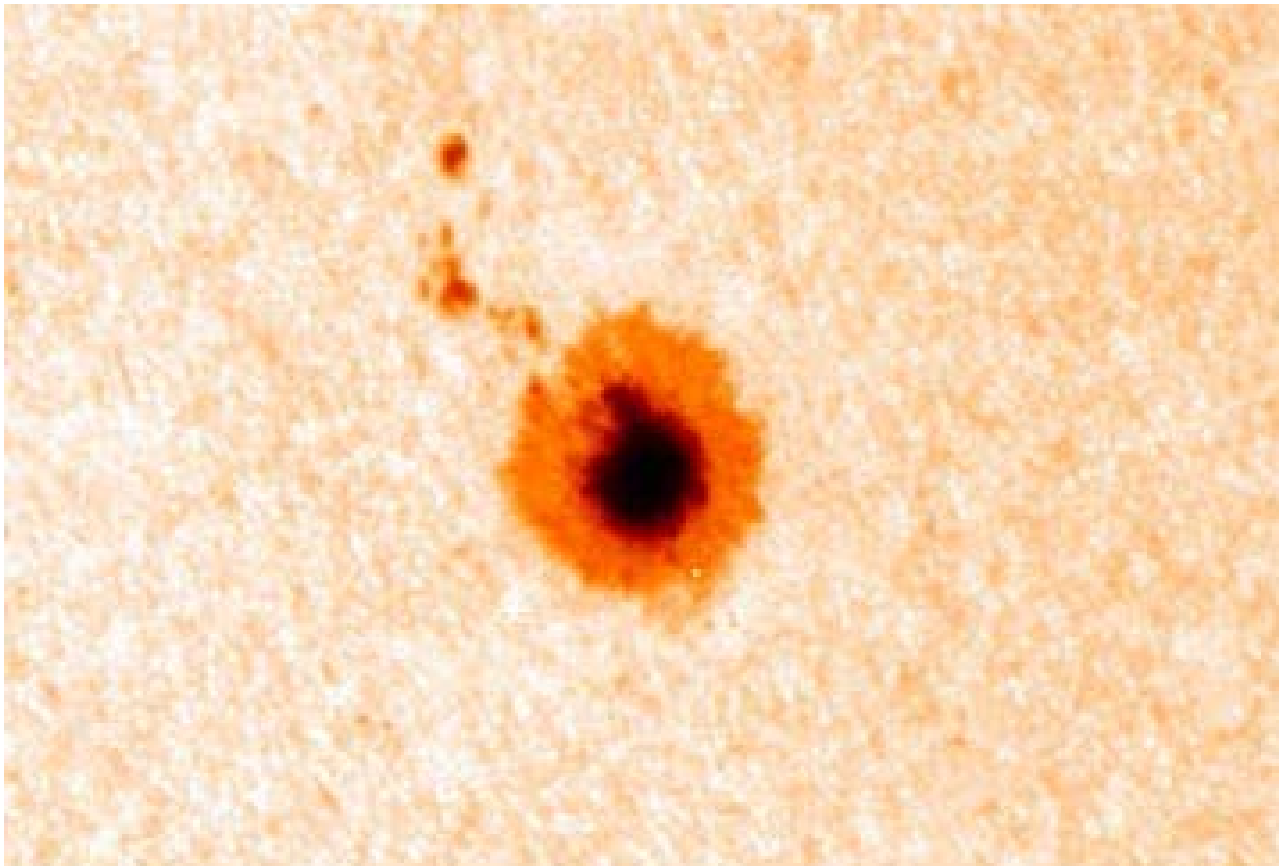
Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick



(SOHO Movie Gallery)



Abbildung der Sonnenrückseite

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

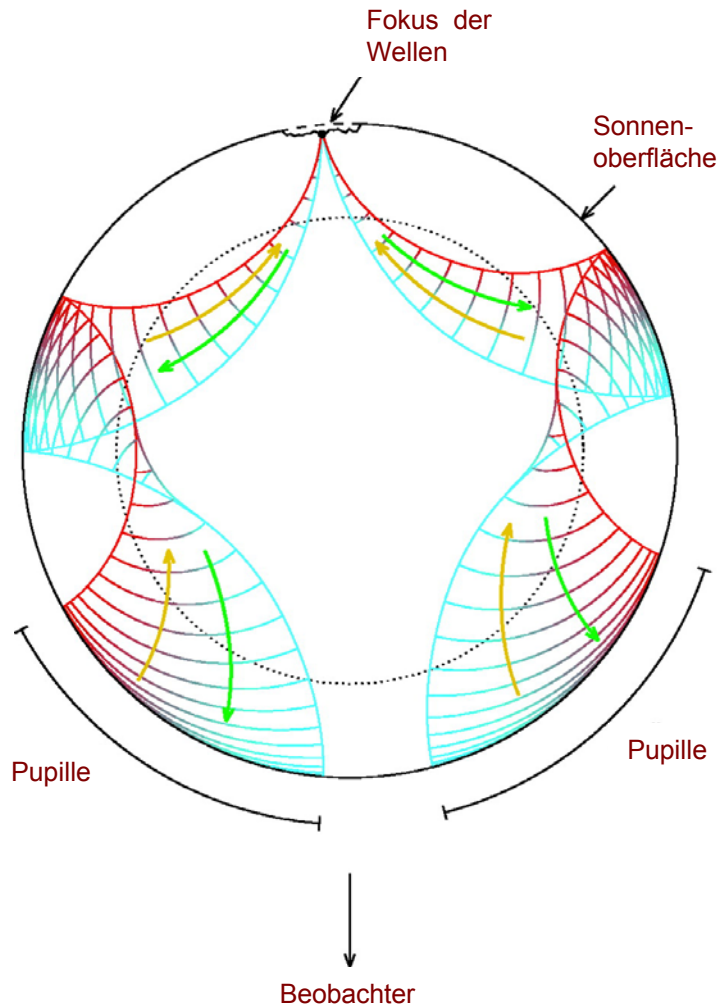
Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick



Wellen von der Rückseite erreichen
Sonnenvorderseite

Umgekehrt: Wellen von der Vorderseite
erreichen Punkt auf der Rückseite

*Differenz von ein- u. auslaufenden Amplituden
und
die Zeitverzögerung zw. den Wellen ergibt*

Abbild der Sonnenrückseite



Abbildung der Sonnenrückseite

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

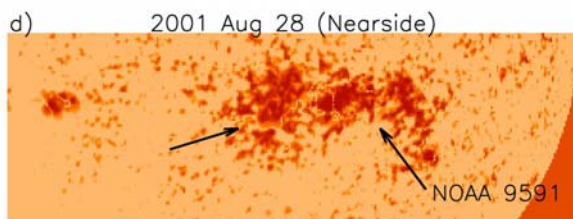
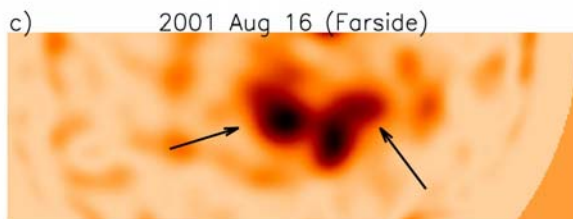
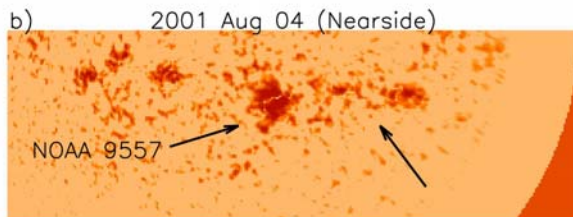
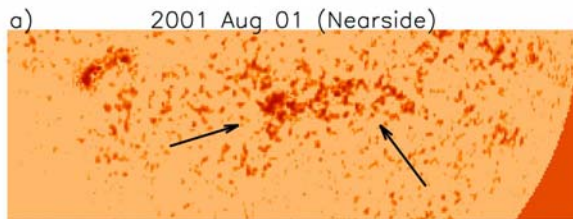
Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick



400 Mm

Verfolgung eines aktiven Gebietes während eines Umlaufs.

(Lindsey & Braun, 2001)



Abbildung der Sonnenrückseite

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

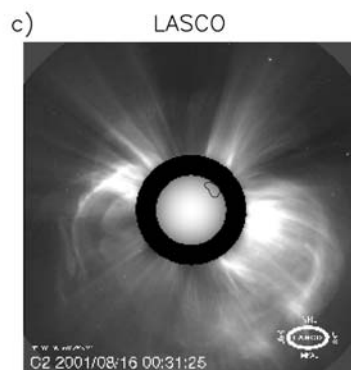
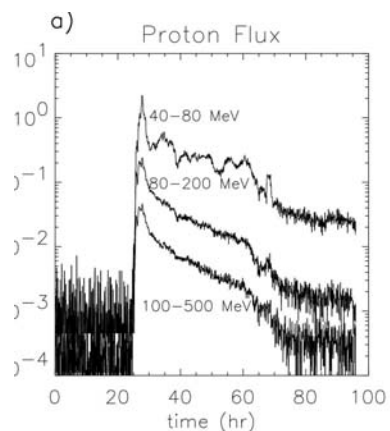
Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

Helioseismologie

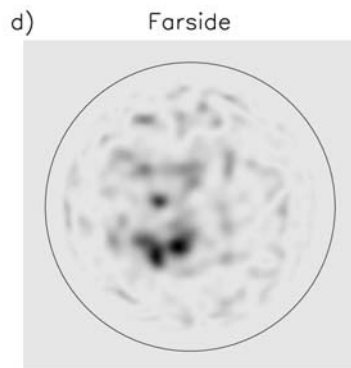
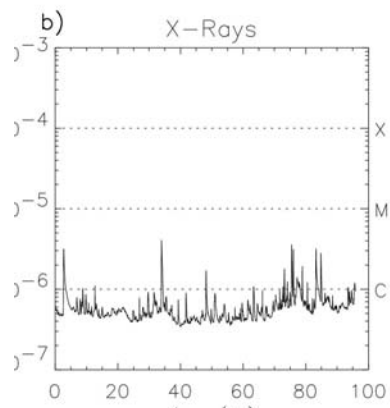
Ergebnisse

Ausblick



Auf der Rückseite:

starker Massenausbruch, hohe
Strahlungsdosis



Sinn und Zweck:

Vorhersage des Auftretens aktiver Gebiete.

Warnung für bemannte Raumfahrt, Satelliten,
Erdbevölkerung, ...



Einführung

Geschichte der
Helioseismologie

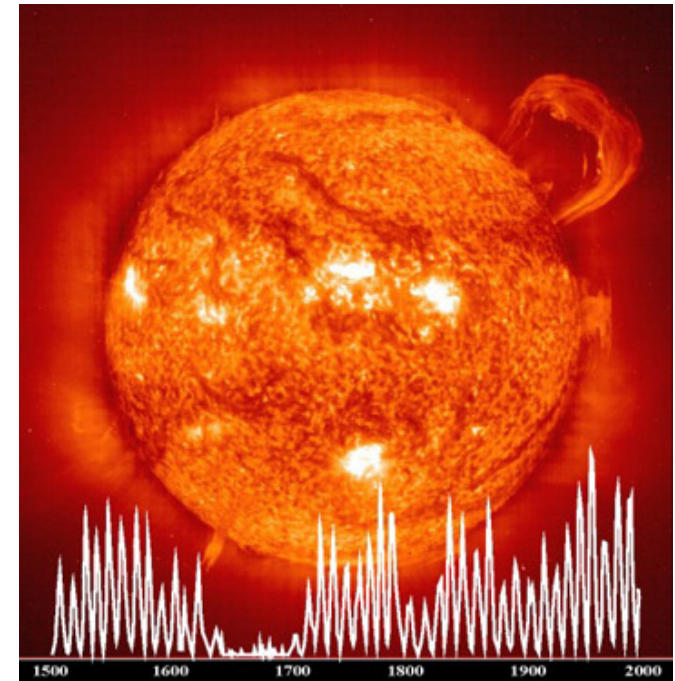
Helioseismologie

Ergebnisse

Ausblick

Ziel: Helioseismische Untersuchung der Sonne bis in die kleinsten Details

- Wie entsteht die Sonnenaktivität?
Wie funktioniert der Sonnendynamo?
- Weltraumwetter-Vorhersage
- Seismologie auf Sternen → **Asteroseismologie**
CoRoT (Start, 27.12. 2006)





Weitere Informationen

Helioseismologie:
Einblicke in das Innere
der Sonne

Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung,
Katlenburg-Lindau
<http://www.mps.mpg.de/projects/seismo/>



European Helio- and Asteroseismology Network
http://astro.phys.au.dk/HELAS/HELAS_outreach.html

