
Asteroseismologie

Lehrerfortbildung Astronomie in Bonn

Klaas S. de Boer

Sternwarte, Univ. Bonn

Inhalt

- Oszillationen und Vibrationen
- Pulsierende Variable
- Die Sonne → Helioseismologie
- Vibrierende Sterne → Asteroseismologie
- Einfache Messungen

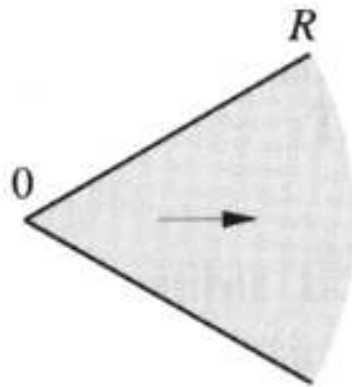
Oszillationen

Sterne sind gravitativ gebundene Gaskugeln

Gaskugeln können schwingen

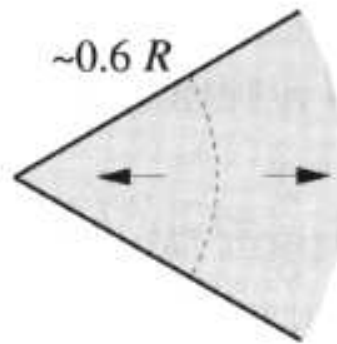
- Grundschrwingungen und Überschrwingungen

Beispiel: radiale Schrwingungen



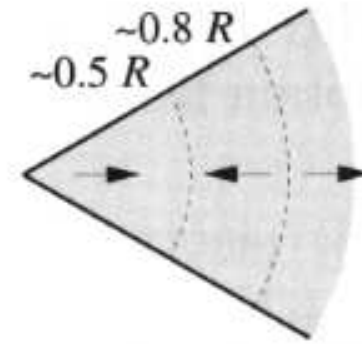
(a)

Grundschrwingung



(b)

erste harmonische



(c)

zweite harmonische

Oszillationen - Moden

Pulsationsperiode und mittlere Dichte
(Shapley 1914)
Cepheiden!

$$\langle \rho \rangle \simeq \frac{1}{G P^2}$$

Oszillationsmoden
(Cowling 1941)

- Pulsationen: $l = 0$
Radialschwingungen = Pulsationen
- p-Modus: akustische Wellen
Kompression des Gases (pressure mode)
- g-Modus: akustische Wellen
Konvektion des Gases (gravity mode)

Pulsationen

Radiale Schwingungen heissen → **Pulsationen**

Bekannte Sterntypen:

- RR Lyra Variable
- Cepheiden

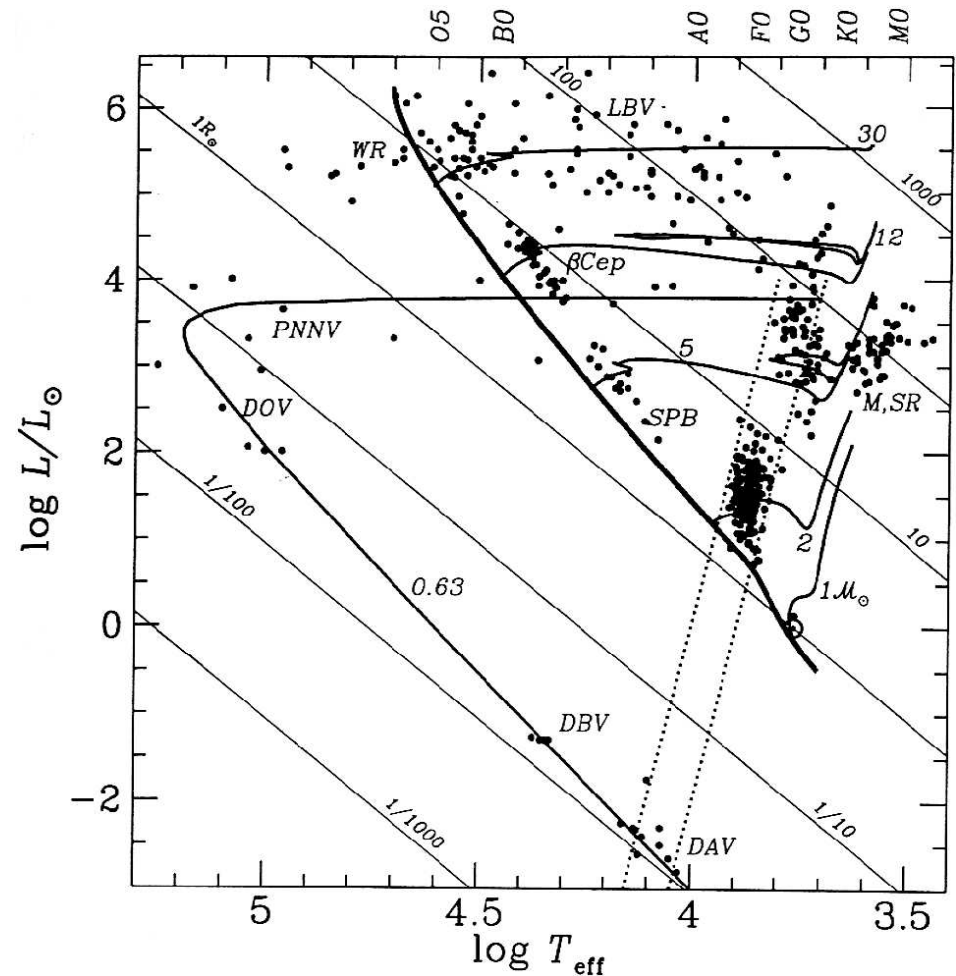
Ursache der Pulsationen:

- Opazitätsschwankungen in oberflächlichen Schichten
- Schwankende Ionisationsbilanz $\text{He}^{++}/\text{He}^{+}$ (RR Lyr, Cepheiden)
- Schwankende Ionisationsbilanz anderer Elemente (PG 1159)

Pulsationen und HRD

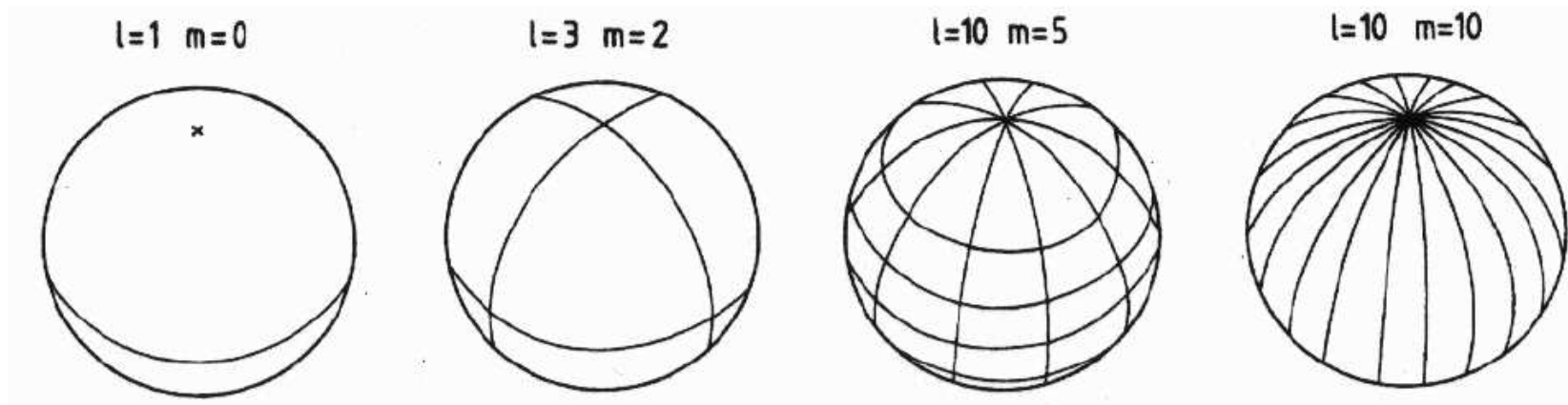
An vielen Stellen Pulsationen

- Instabilitätsstreifen:
 - Cepheiden
 - RR Lyra Variable
 - Weisse Zwerge (DAV)
- Rote Riesensterne (z.B. Mira)
- Heisse Post-AGB-Sterne (z.B. PNNV, DOV=PG1159)



(HRD nach Gautschi & Saio, 1995 ARAA 33, 75)

Vibrationen - Knoten

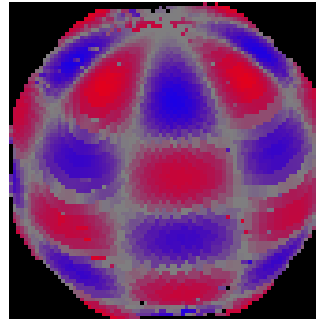


Knotenlinien der Vibrationen, Eigenmoden

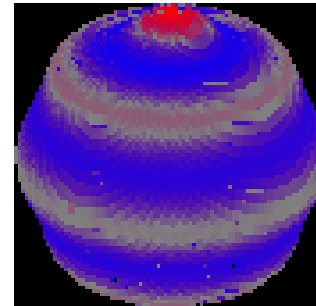
- l = Sphärizität eines Vibrationsmodus
- m = Azimutalordnung (Zahl der Knoten am Äquator), $-l < m < +l$
- Falls $m = l$, Oszillationen vorwiegend am Äquator
- Falls $m < l$, Oszillationen auch bis in höhere Breiten

Vibrationen - Modelle

Beispiele:

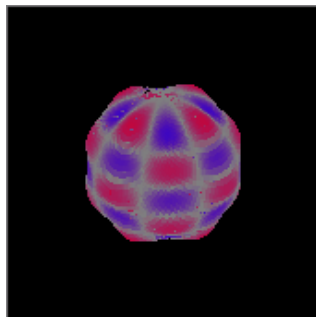


$$l = 8, m = 4$$

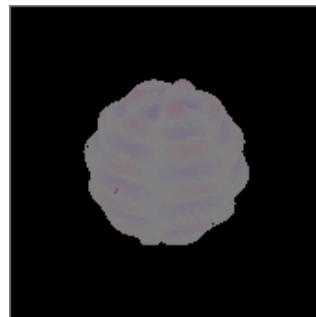


$$l = 8, m = 0$$

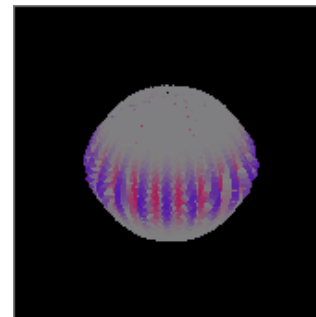
Kombination mehrerer Vibrationsmoden:



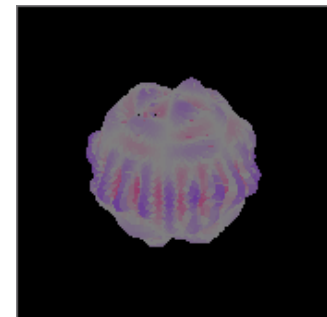
+



+

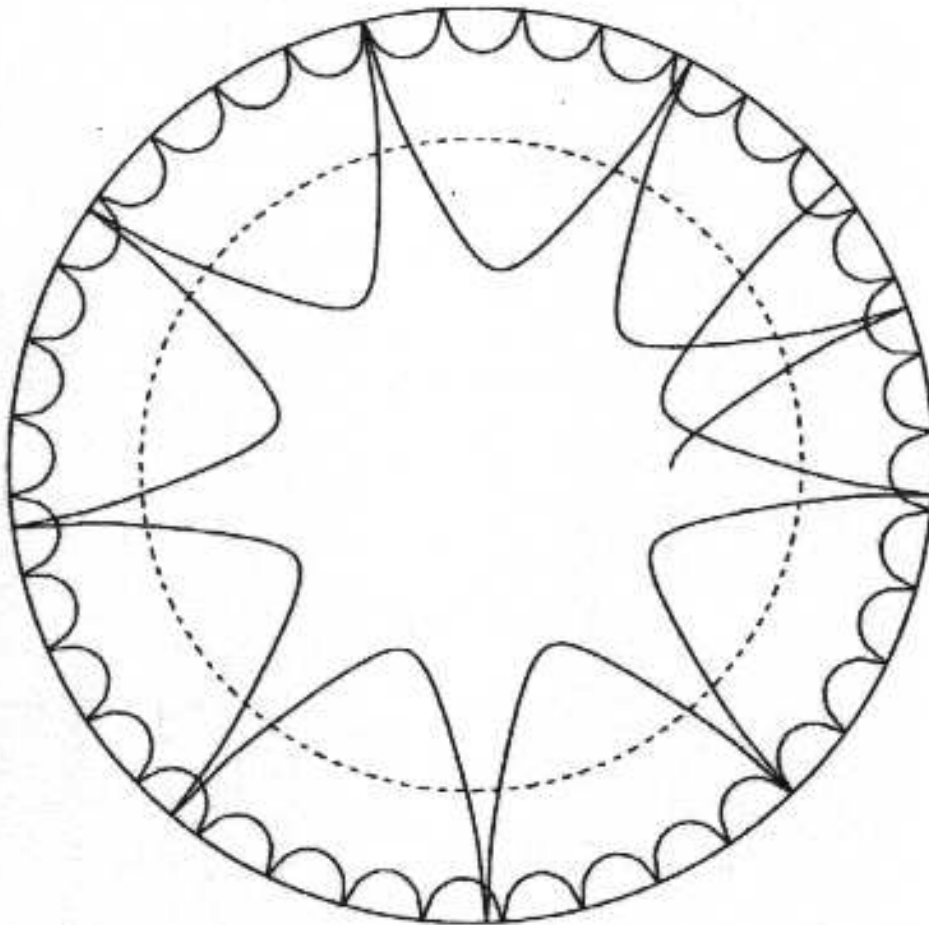


=



copyright: Christensen-Dalsgaard, TAC, Inst. Phys. & Astron., Aarhus Univ.

Vibrationen - Wellen



“Zittern” der Gaskugel

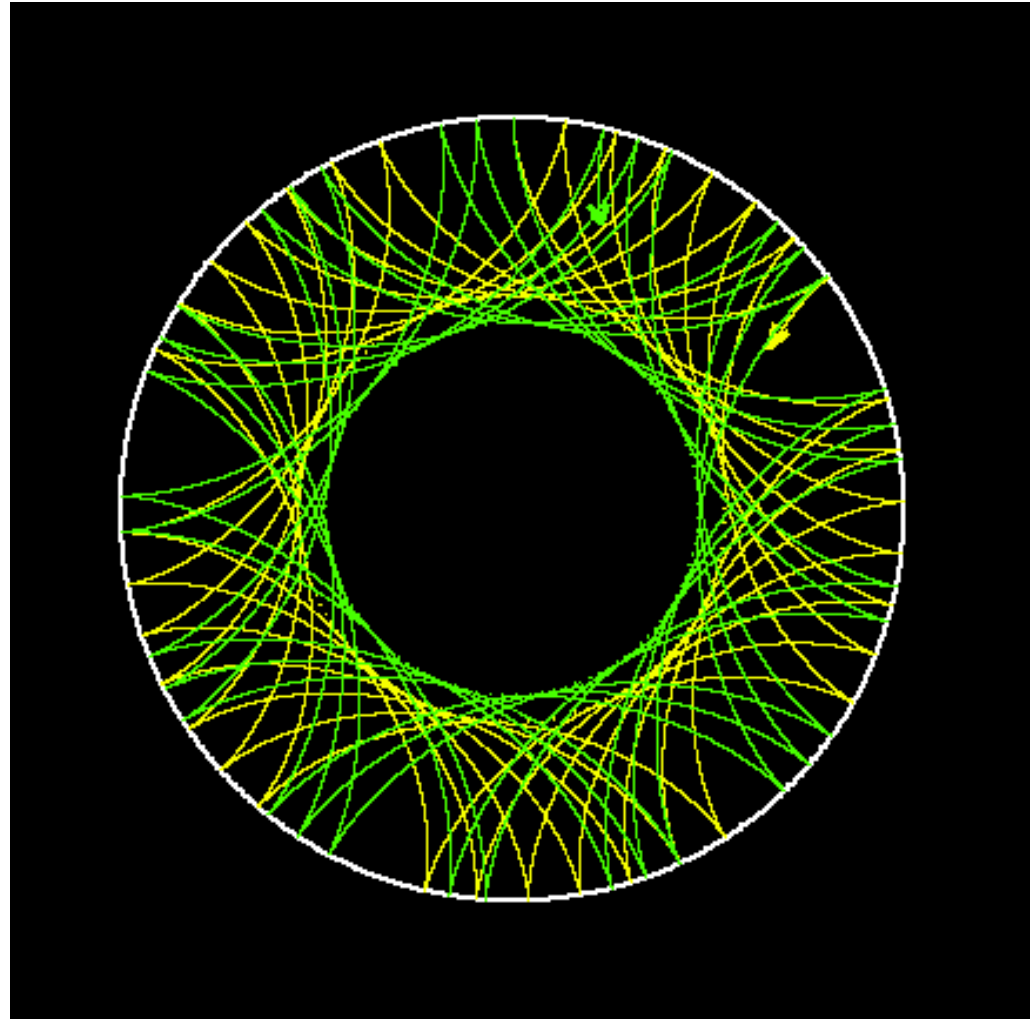
Brechung
der akustischen Wellen
wegen Dichtegradienten

Seismische Wellen müssen
“passen”

Grenze einer Konvektionszone

Vibrationen - Tiefenbereich

- Information über die Struktur der Gase in tiefen Schichten
- Information über Dichte und Temperatur
- Wechselspiel von Frequenz und erreichter Tiefe



Vibrationen - Schallgeschwindigkeit

- Schallgeschwindigkeit c_s bestimmt Weg der Wellen
- Wechselspiel von Frequenz und erreichter Tiefe
- Information über Dichte und Temperatur im Inneren

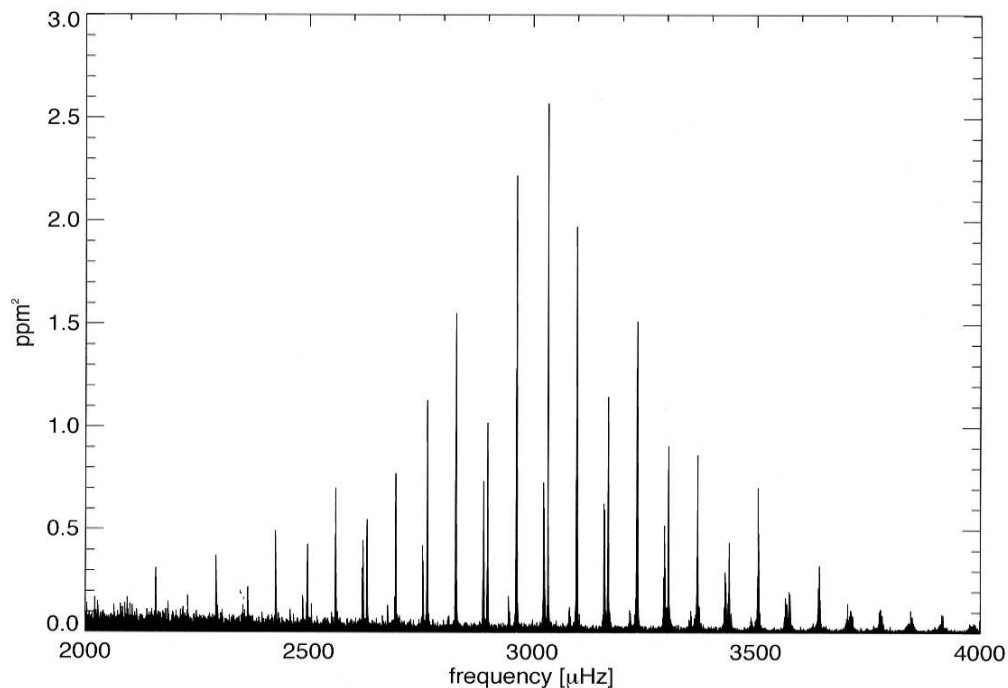
$$c_s^2 = \frac{\Gamma_1 \Re T}{\mu}$$

μ = mittleres Molekulargewicht
(chemische Zusammensetzung)

Gehalt an He !

Oszillationen der Sonne - Messungen

- Helligkeitsmessungen über längere Zeiträume
- Helligkeitsmessungen mit sehr kleinen Zeitintervallen
- Fourieranalyse



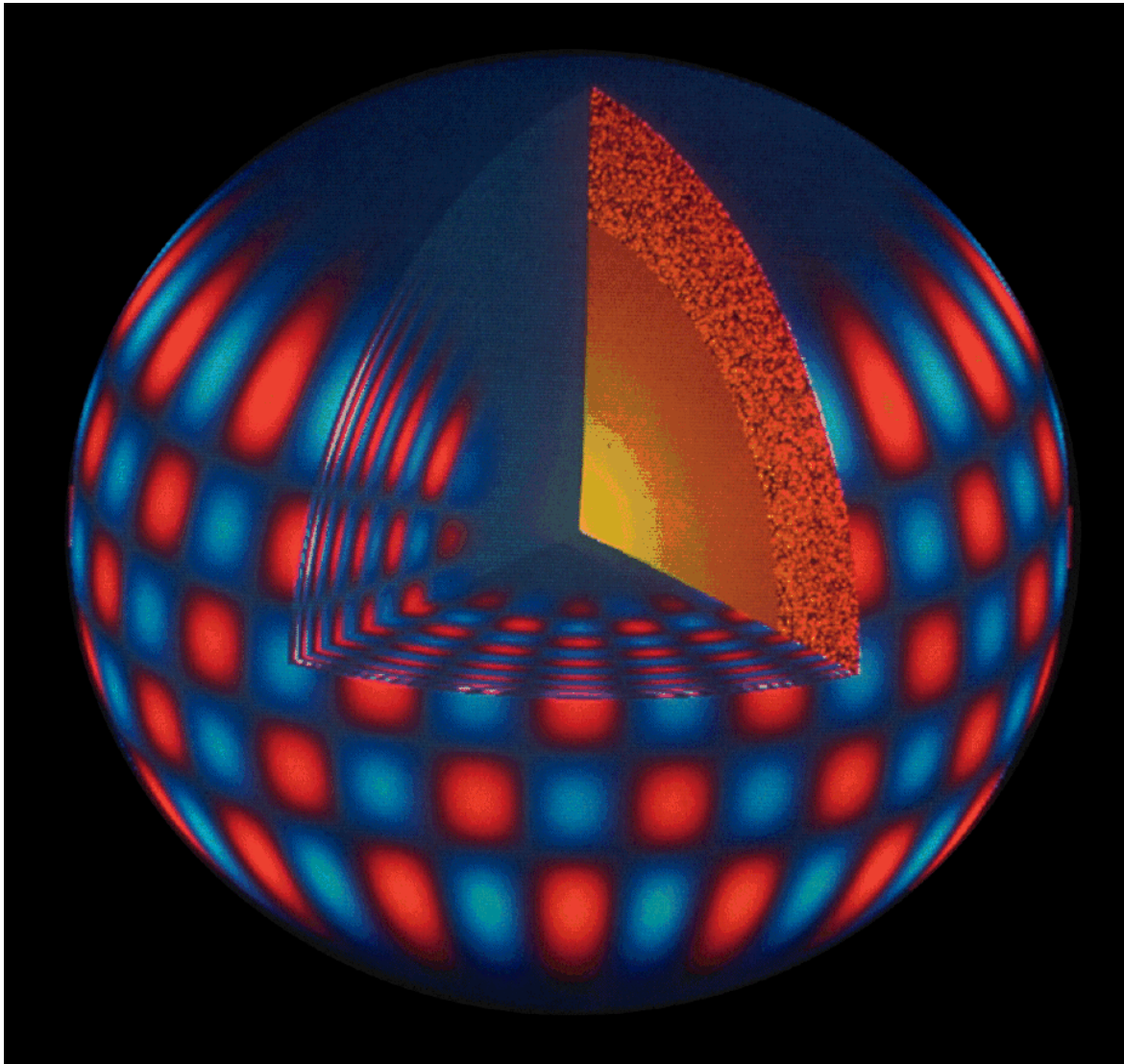
Frequenzspektrum der Helligkeitsfluktuationen der Sonne.

Sehr stark ist der Peak in der Nähe von 3000 μHz.

Dies entspricht eine Periode von 5 Minuten.

Helligkeitsschwankungen nur
$$\delta I / I \simeq 3 \cdot 10^{-6}$$

Oszillationen der Sonne - Modell



p 15 Modus

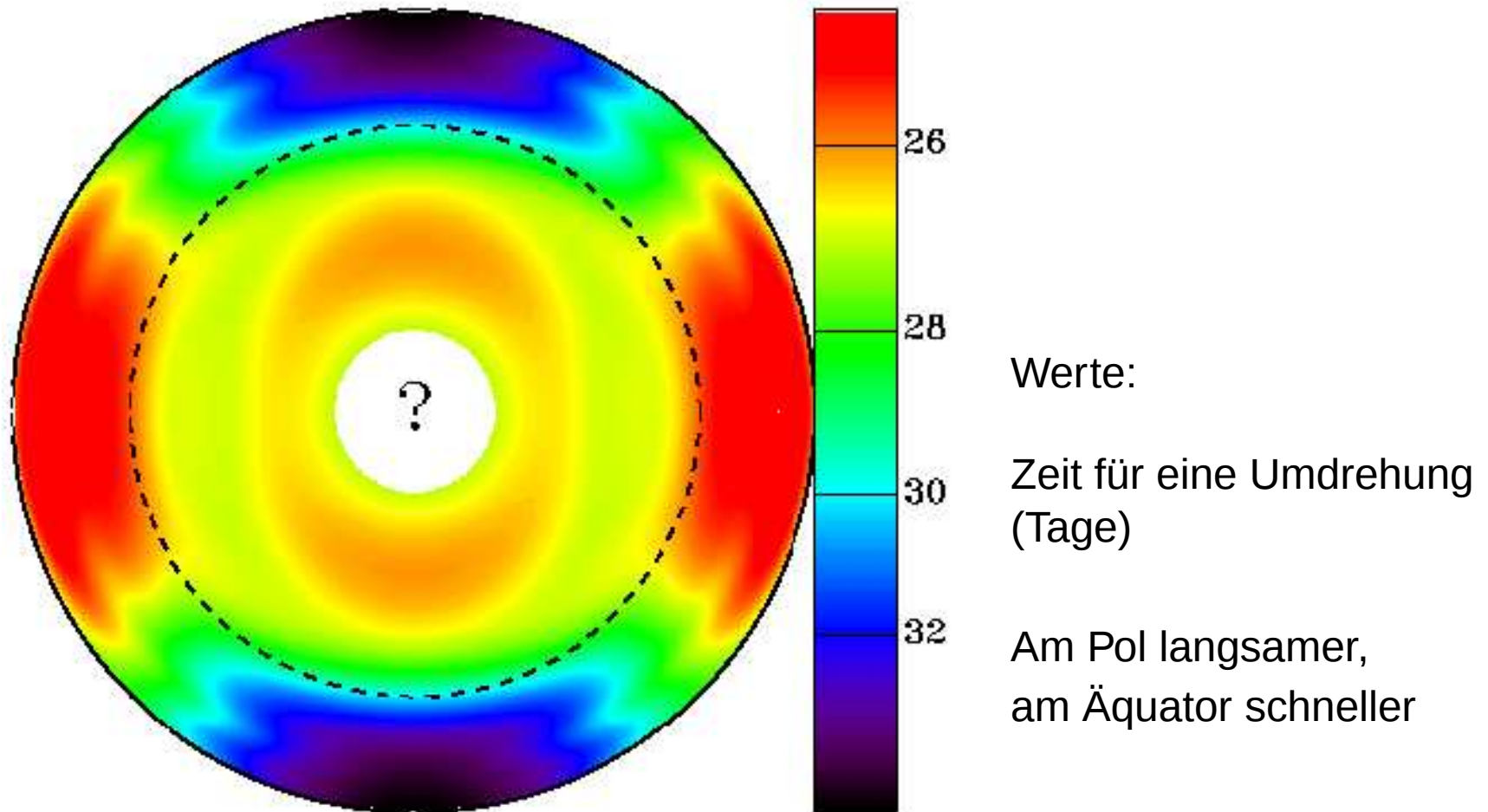
Rot und Blau:
Bewegungen + —

Wolkig:
Konvektionszone

Gelb:
Kernfusionszone

Sonne - Rotationsgeschwindigkeit

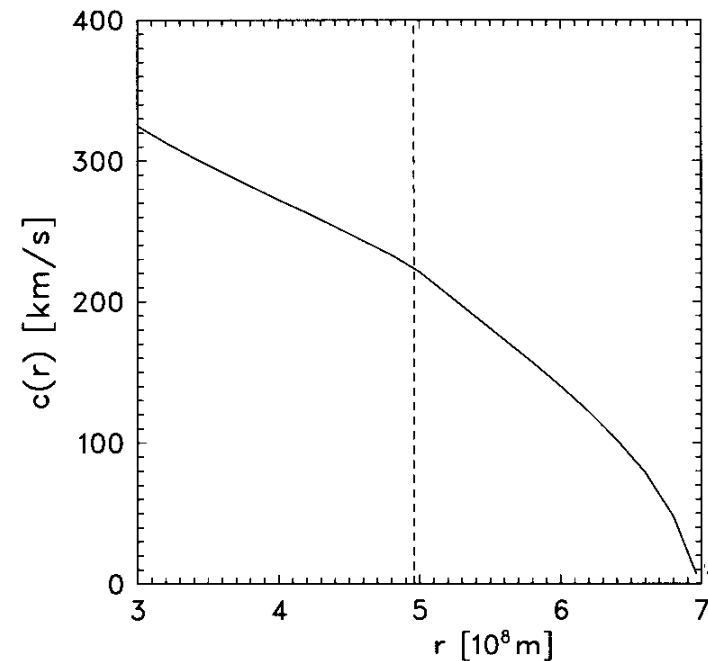
Aus Differenz $\delta\nu$ der Frequenz der l, m -Moden (wegen Rotation der Sonne)



Sonne - Tiefe der Konvektionszone

Information über die Struktur der Gase in tieferen Schichten

- Schallgeschwindigkeit $c_s(r)$ und Gasdichte
- Temperaturgradient und Konvektion
- Erste Bestätigung der Richtigkeit des Modells der Sonne
- Absinken des He in Richtung des Zentralbereichs entdeckt (gravitativ)



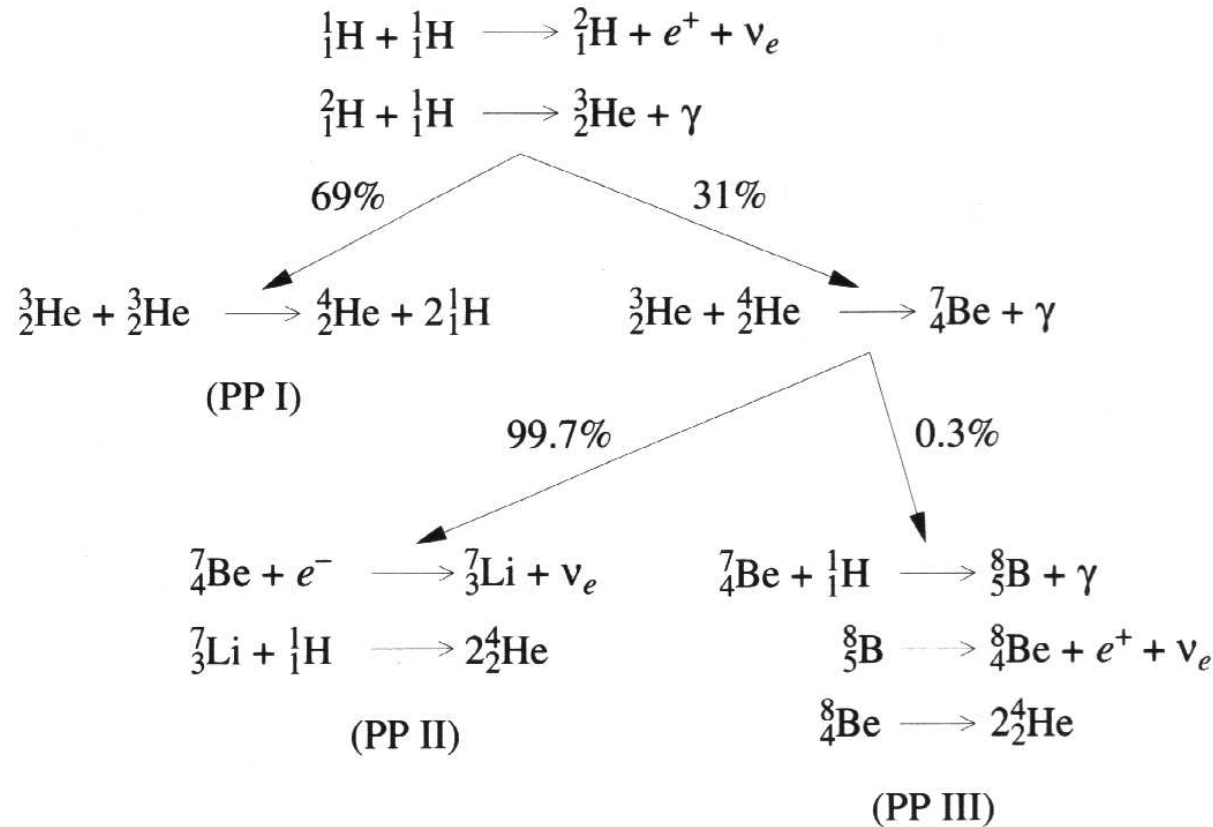
↑ keine Konv. hat Konv. ↑

Knick des Schallgeschwindigkeitsverlaufes an der Grenze der Gebiete ohne und mit Konvektion

Sonne - Neutrinos

Das Neutrinoproblem: zu wenige?

Kernreaktionen in der Sonne:

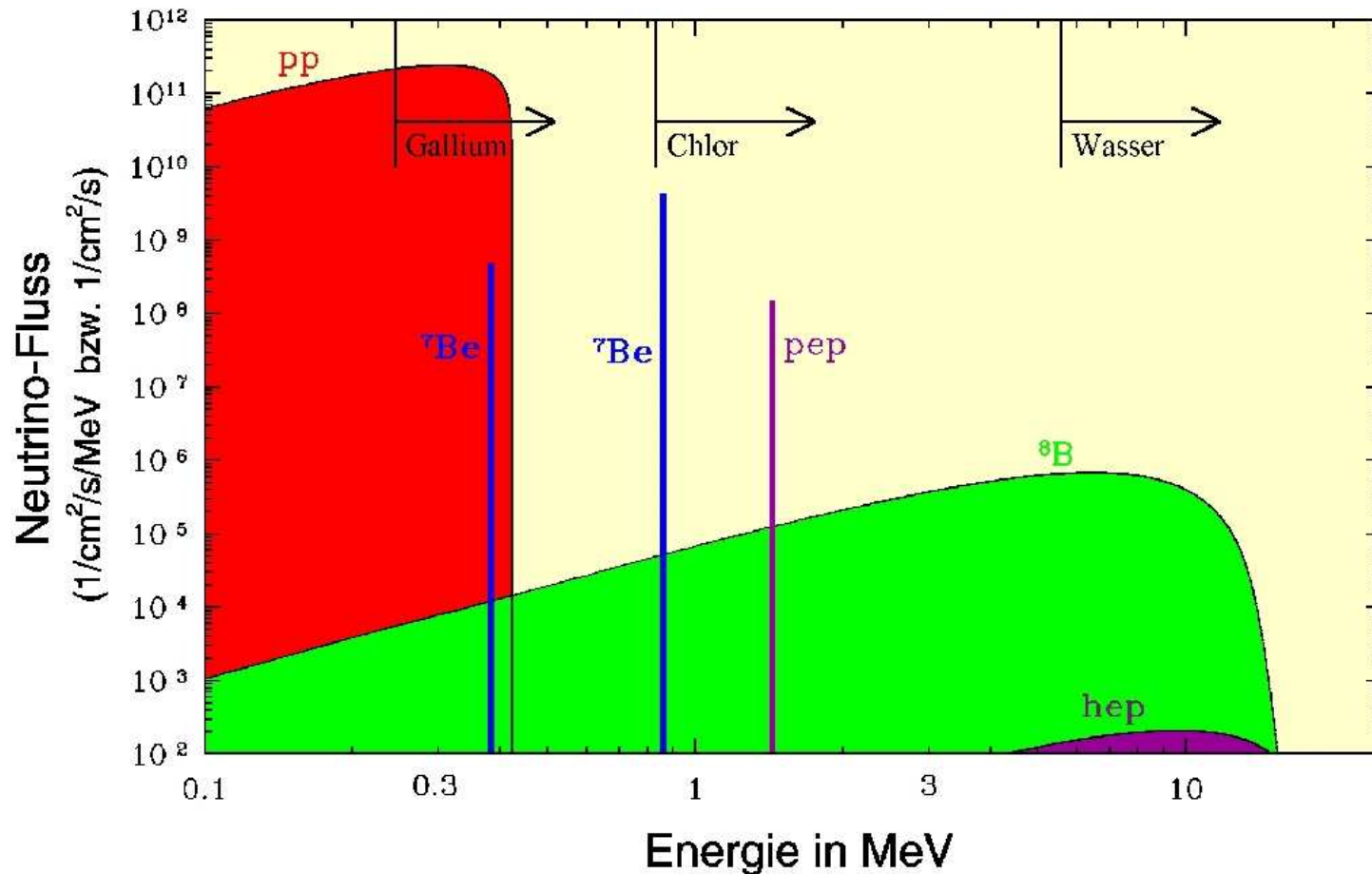


Die Sonne produziert (fast) nur **Elektron-Neutrinos** ν_e :

die PP ν_e (erste Reaktion) und die sogenannte $\text{Be}^7 \nu_e$ (unten links)

Sonne - Neutrinos

Das Neutrinoproblem: zu wenige?



Die ersten ν -Detektoren arbeiteten mit Cl oder H_2O und sahen die $\text{PP}\nu$ nicht

Sonne - Neutrinos

Zentraltemperatur und Neutrinoerzeugung

- Wellen der p-Moden mit kleinem l dringen tief in die Sonne ein
- Information über die Struktur der Gase in tiefen Schichten
- Information über Dichte und Temperatur (T, ρ)

Messungen der Oszillation der Sonne mit dem Satelliten **SOHO**:
das “Standardmodell” der Sonne (T, ρ) bestätigt. Daher:

→ Neutrinoerzeugung richtig vorhergesagt

Aber: der neue Gallex ν -Detektor sieht auch zu wenige ν_e

Entdeckung der Neutrino-Oszillationen, Wandlung von ν_e in ν_μ
(Experimente mit kosmischer Strahlung)

Das Neutrino-Problem gelöst !

Das Modell der Sonne war und ist richtig !

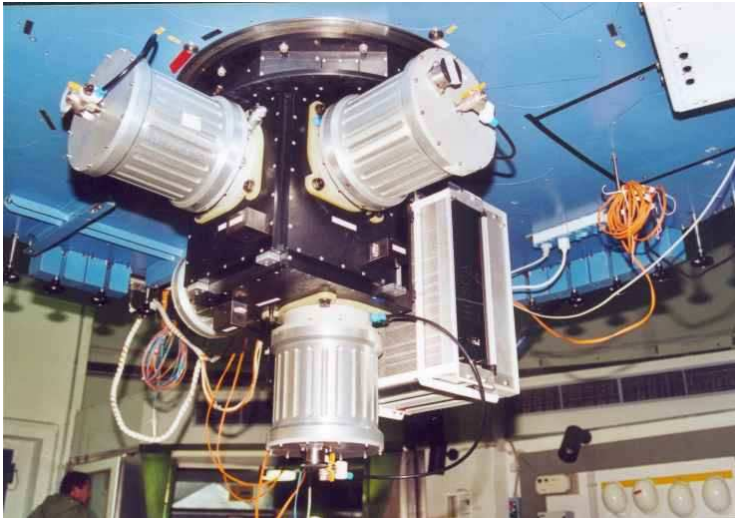
Oszillationen bei Sternen

Asteroseismologie

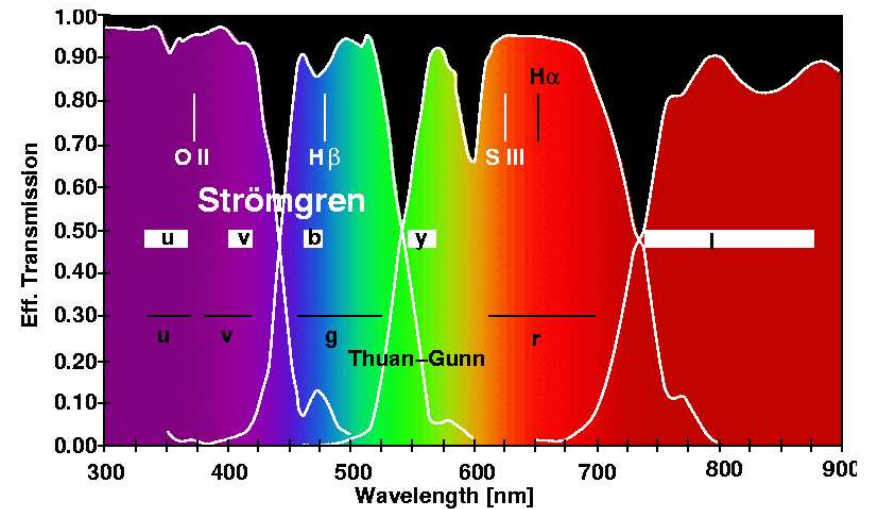
Messungen:

- Photometrie
 - lange Zeitbasis, hohe Zeitauflösung
Das “Whole Earth Telescope” (WET)
⇒ Notwendige Genauigkeit $\simeq 0.05$ mag
- Spektroskopie
 - lange Zeitbasis, hohe Zeit- und Spektralaufklärung
Große Teleskope, große Spektrographen
⇒ Notwendige Genauigkeit $\simeq 15 \text{ cm s}^{-1}$

BUSCA



BUSCA am 2.2m Teleskop des Calar-Alto-Observatoriums (Spanien)

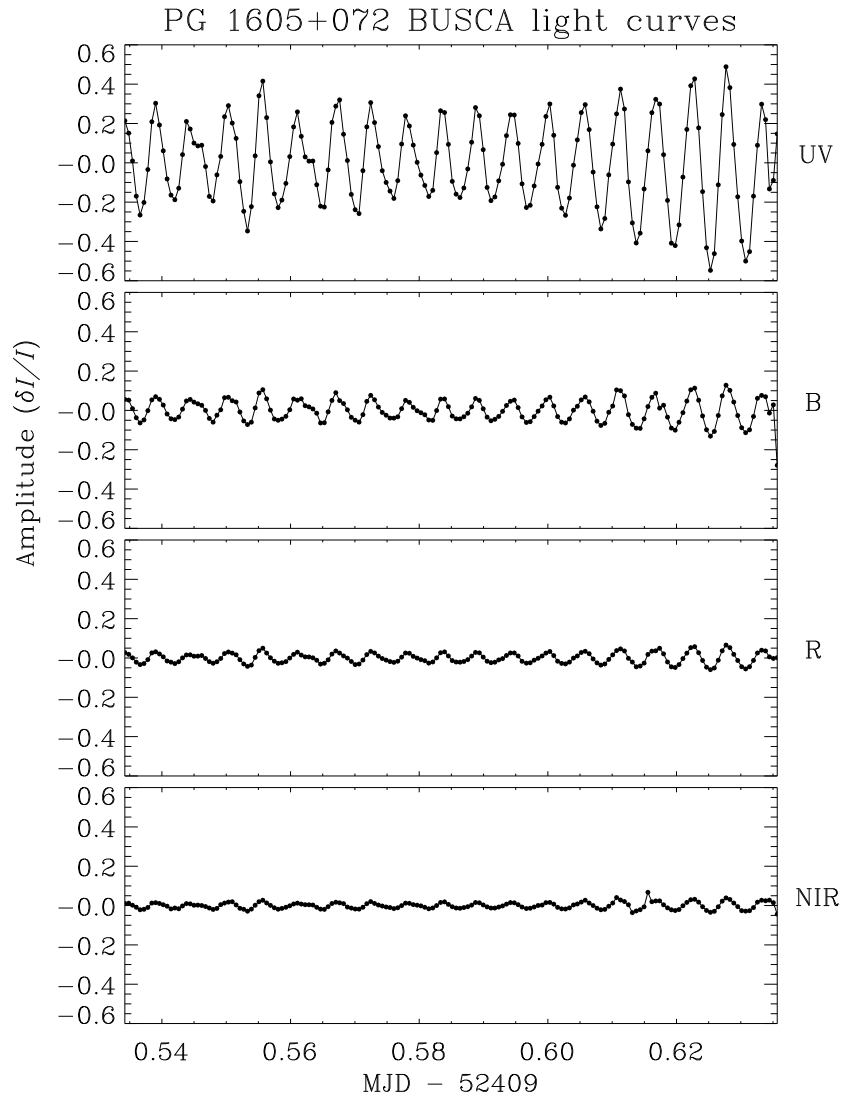


Die BUSCA Filter und das Strömgren-system

BUSCA misst *simultan* in 4 Kanälen

Effizient zur Vermessung zeitlicher Variationen

BUSCA Messungen

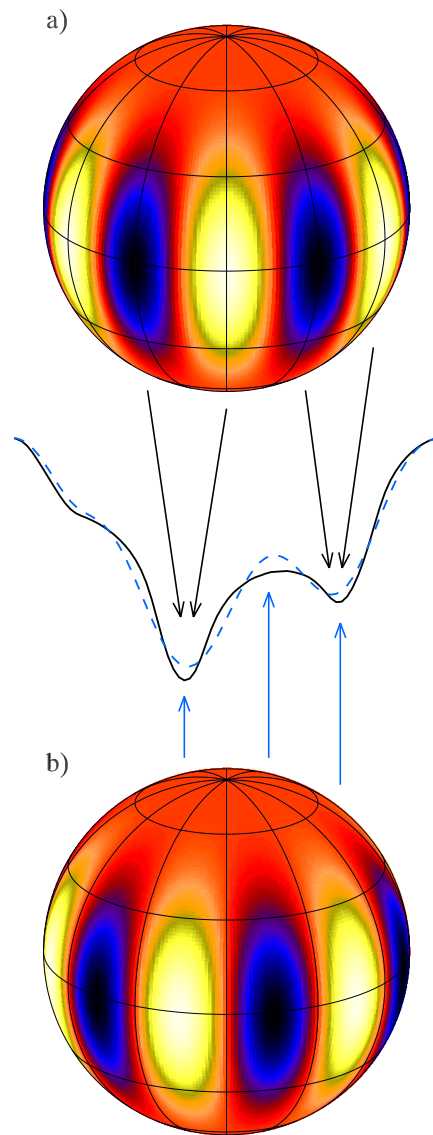


Helligkeitsvariationen des sdB Sterns PG 1605+072

- Helligkeitsschwankungen
4 - 30 mmag
- Pulsationsfrequenzen
2.0 - 2.7 mHz
- Pulsationsperioden
5 - 8 Minuten
- Oberflächengeschwindigkeiten
 $6 - 14 \text{ km s}^{-1}$

(Falter et al., 2003, *A&A* 401, 289;
O'Toole et al., 2004, *in prep*)

Oszillationen bei Sternen



Modell der Oszillationen eines Sterns
($l = 6, m = 6$)

Oben Die Vertikalkomponente der Oberflächen-
geschwindigkeit

Blau = absenkend, **Gelb** = hochsteigend

Mitte Absorptionslinienform ist komplex wegen
Beiträge durch Licht der verschiedenen
Oberflächenteile

Unten Oberflächentemperatur

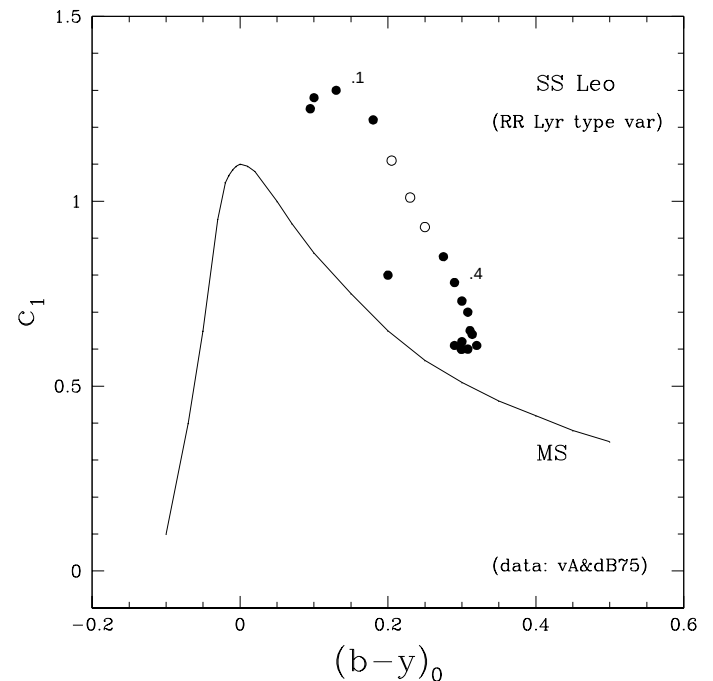
Gelb = heiss, **Blau** = kühl

(nach Kochukhov, 2004, *A&A* 423, 613)

Einfache Messungen

- Langsame Photometrie
Pulsationen
 - Farbindexbestimmung
⇒ Temperaturvariation
 - Pulsationsperiode
⇒ Haupt- und Überschwingungen
- Photometrie mit kurzen Zeitintervallen
Asteroseismologie
 - Oszillationen
⇒ Periodenüberlagerung

Beispiel einer Zwei-Farben-Schleife



Der Stern SS Leo

(Daten aus:
van Albada & de Boer 1975 A&A)

Zusammenfassung

- Helioseismologie und Sonnenatmosphäre
- Helioseismologie und Tiefe der Konvektionszone
- Helioseismologie und solare Rotation
- Helioseismologie und solare Neutrinos

- Asteroseismologie (sdB Sterne und viele andere)
- Einfache Messungen an Sterne möglich

- Viel über Sterne lernen

Quellen

GONG Global Oscillation Network Group

<http://gong.nso.edu>

BISON Birmingham Solar-Oscillation Network

<http://bison.ph.bham.ac.uk>

SOHO SOlar and Heliospheric Observatory

<http://sohowww.nascom.nasa.gov>

mit:

VIRGO Variability of solar IRradiance and Gravity Oscillations

GOLF Global Oscillations at Low Frequency

MDI Michelson Doppler Interferometer

TAC Theoretical Astrophysics Centre (Aarhus)

http://astro.phys.au.dk/helio_outreach/english/engHA0.html

Sterne und Weltraum 8/2004

Sitx, M. 2004, in Rev. Mod. Astronomy 17, p. 51

Zum Neutrinoproblem:

<http://www.astro.uni-bonn.de/~deboer/nobel/physik02.html>