

Pulsierende Sterne

Scheinseminar Astroteilchenphysik
Dominik Kießling

6. Mai 2010

Veränderliche Sterne

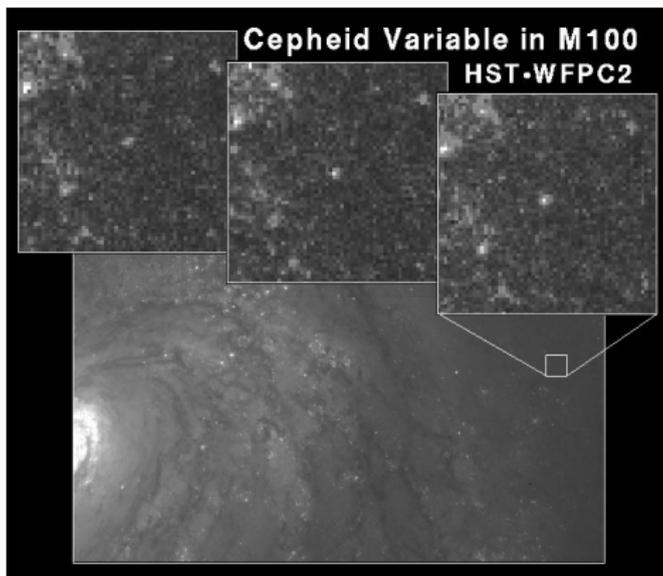


Abbildung: Cepheide in der Spiralgalaxie M100 aufgenommen mit dem Hubble-Teleskop. Quelle: Hubble, Nasa

Typen von veränderlichen Sternen

Alle Sterne sind veränderlich, allerdings nur auf riesigen Zeitskalen.
Veränderliche Sterne in kurzen Zeiträumen:

Eruptive veränderliche Sterne

Novae, Supernovae, ...

Doppelsterne

bedeckungsveränderliche Doppelsterne

Pulsierende Sterne

Cepheiden, RR-Lyrae Sterne, Mira, ...

Pulsierende Sterne

Einige variable Sterne verändern ihre Zustandsgrößen periodisch!

- Helligkeit
- Farbe, daraus abgeleitet Temperatur
- Oberflächengeschwindigkeit und Radius

Erklärung:

Die Sterne pulsieren in Eigenschwingungen!

Beispiel Delta-Cephei

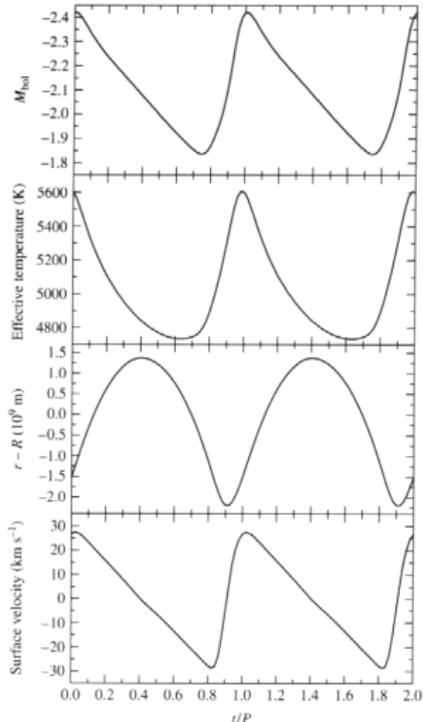


Abbildung: Zustandsgrößen von δ Cephei. Quelle: Carroll & Ostlie: An Introduction to Modern astrophysics

Radiale Pulsationsmoden

Radiale Pulsation entspricht stehenden Schallwellen in einer einseitig offenen Röhre:

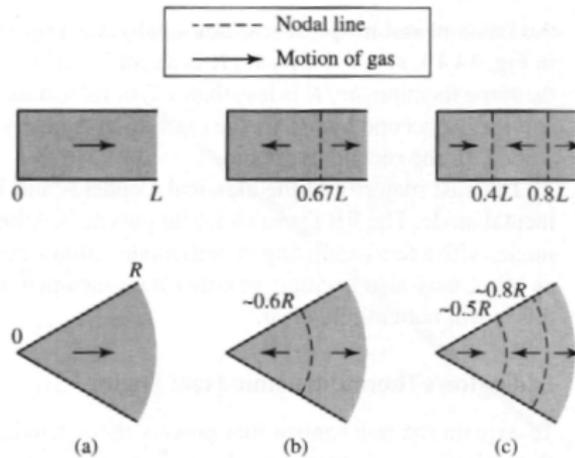


Abbildung: Verschiedene Radialmoden im Vergleich mit Schallwellen in einer Röhre. Quelle: Carroll & Ostlie: An Introduction to Modern astrophysics

Modellierung der radialen Pulsation

Hydrodynamisches Gleichgewicht:

$$\rho \frac{d^2 r}{dt^2} = -G \frac{M \rho}{r^2} - \frac{dP}{dr}$$

- Die Gleichungen werden sehr kompliziert und sind nicht analytisch lösbar.
- einfacheres Modell: der Stern besteht aus Kugelschichten, die den Oszillationsprozess adiabatisch durchlaufen.
- einige Schichten verrichten Arbeit, anderen muss Arbeit zugeführt werden.
- es kann sich eine stabile Schwingung einstellen, wenn die Summe 0 ergibt.

Modellierung der radialen Pulsation

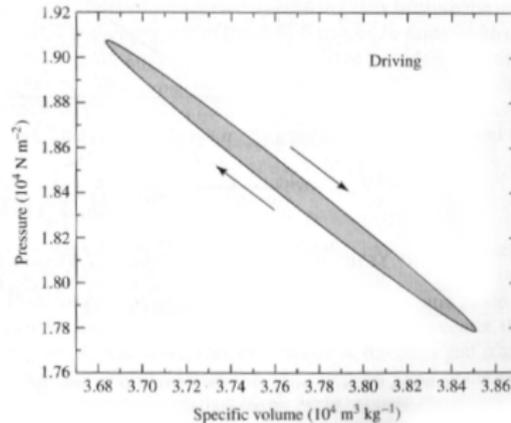


Abbildung: pV-Diagramm. Quelle: Carroll & Ostlie: An Introduction to Modern astrophysics

Damit der Prozess durchlaufen wird, muss Wärme zugeführt werden.

→ Wie wird der Prozess angetrieben?

Kappa-Mechanismus

Opazität κ

Die Opazität κ ist ein Maß für die Lichtundurchlässigkeit von Stoffen.

Funktionsweise des Kappa-Mechanismus:

- Der Stern kontrahiert, dabei steigt die Opazität in einer Schicht
- Strahlung staut sich unter dieser Schicht, der Druck steigt
- Der Stern dehnt sich aus, die Opazität sinkt
- Die angestaute Strahlung entweicht
- Der Strahlungsdruck nimmt ab, der Stern wird wieder komprimiert

Kappa-Mechanismus

Kramer's Opazitätsformel:

$$\kappa \propto \frac{\rho}{T^{3,5}}$$

Bei einer Kompression ändern sich Dichte ρ und Temperatur T .

- Damit der Mechanismus funktioniert, muss die Änderung der Dichte dominieren
- trifft auf die Wasserstoff- und Helium-Ionisationszone zu.

Gamma-Mechanismus

Die Ionisationszonen erwärmen sich bei der Kompression weniger als andere Schichten im Stern, da die zusätzliche Energie in weitere Ionisation umgesetzt werden kann.

- Es fließt Wärme aus anderen Schichten in die Ionisationszone.
- Die Tendenz zur Schwingung wird verstärkt (Gamma-Mechanismus)

Ionisationszonen

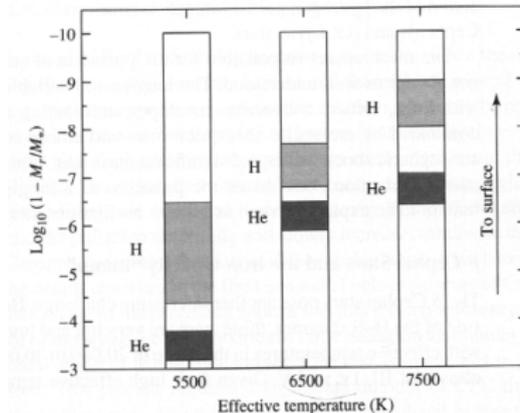


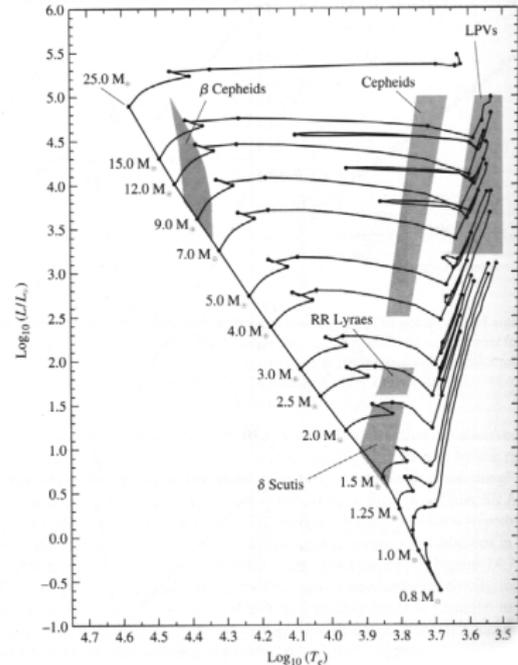
Abbildung: Ionisationszonen in Sternen unterschiedlicher Temperatur.
Quelle: Carroll & Ostlie: An Introduction to Modern astrophysics

- Temperaturgrenzen von $5500^\circ - 7500^\circ \text{ C}$ für den Kappa-Mechanismus

Radial pulsierende Sterne im HRD

- Wegen den Temperaturgrenzen Pulsation nur in einem (fast) senkrechtem Streifen im HRD!
- In anderen Bereichen sind weniger gut verstandene Mechanismen für die Pulsation verantwortlich

Quelle: Carroll & Ostlie: An Introduction to Modern astrophysics



Cepheiden

Eigenschaften von Cepheiden

- Cepheiden sind Population I oder II Riesensterne
- effektive Temperaturen von $6000^{\circ} - 8000^{\circ} \text{C}$
- Entweder sehr junge massereiche Sterne oder sehr alte massearme Sterne
- zwischen 100 und 100000 Sonnenleuchtkräfte
- Perioden zwischen 1-100 Tagen

RR-Lyrae Sterne

Eigenschaften von RR-Lyrae

- RR-Lyrae sind alte Population II Sterne im horizontalen Ast
- effektive Temperaturen von $6000^{\circ} - 7500^{\circ} \text{ C}$
- absolute Helligkeit 0,4-0,8 mag (90 Sonnenleuchtkräfte)
- wegen des hohen Alters sehr wenig Metallgehalt
- häufiges Auftreten in Kugelsternhaufen

Perioden-Helligkeitsbeziehung

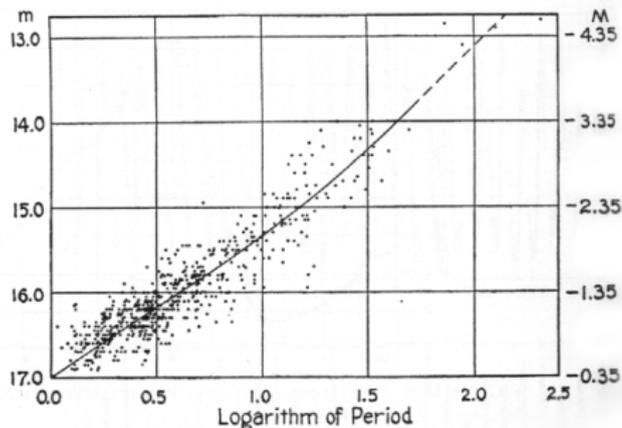


Abbildung: Perioden-Helligkeitsbeziehung bei Cepheiden in der SMC.
Quelle: Carroll & Ostlie: An Introduction to Modern astrophysics

Perioden-Helligkeitsbeziehung

Der Kappa-Mechanismus führt zwangsläufig zu einer Beziehung zwischen der Helligkeit und der Periode des Sterns.

Qualitative Herleitung: Abschätzung der Periode, indem man den Radius des Sterns durch die adiabatische Schallgeschwindigkeit teilt

$$\Pi \sim \frac{R}{c_s} \sim \frac{R}{\sqrt{P/\rho}} \sim \frac{R}{\sqrt{\rho R^2}} \sim \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

Zur weiteren Auswertung verwendet man $\rho \propto R^{-3}$ und $L \propto R^2$:

$$\Pi \sim \frac{1}{\sqrt{\rho}} \sim R^{3/2} \sim L^{3/4}$$

Perioden-Helligkeitsbeziehung

$$\Pi \sim L^{3/4}$$

Umgeschrieben mit der Beziehung zwischen Leuchtkraft L und absoluter Helligkeit M ($L \sim 10^{-0,4M}$) sowie einiger Umformungen:

$$M = -3,33 \log(\Pi) + \text{const}$$

Experimentell gefundene Beziehung bei klass. Cepheiden:

$$M = -2,81 \log(\Pi) - 1,43$$

Bei anderen Sterntypen gelten analoge Beziehungen.

Nicht-radiale Pulsation

Es ist ebenfalls möglich, dass sich ein Teil der Sternoberfläche nach innen bewegt, während ein anderer Teil nach aussen strebt. Formal lässt sich dies durch Kugelflächenfunktionen Y_{lm} beschreiben.

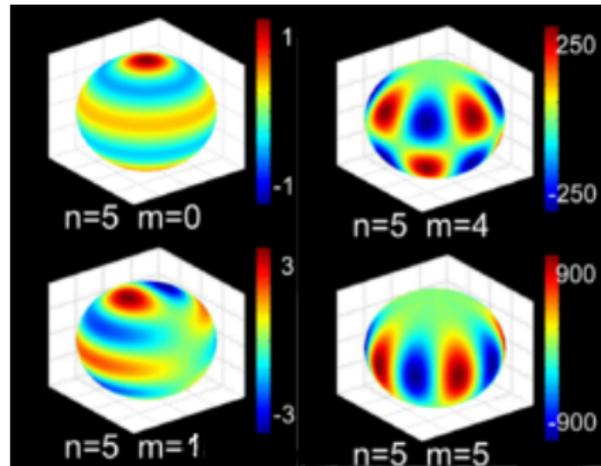


Abbildung: Kugelflächenfunktionen. Quelle: wikipedia.de

p-Moden

Ein Antriebsmechanismus für nicht-radiale Schwingungen ist der Druck (vgl. Schallwellen). Diese Moden werden p-Moden genannt (von pressure).

Die akustische Frequenz kann abgeschätzt werden, indem man die Zeit berechnet, die eine Schallwelle braucht, um eine Wellenlänge zurückzulegen:

$$S_l = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \frac{\sqrt{l(l+1)}}{r}$$

- Unabhängig von m , solange der Stern kein Magnetfeld besitzt und nicht rotiert.

g-Moden

Wenn eine Blase Material aus seiner Ruhelage ausgelenkt wird, stellt Gravitation die rücktreibende Kraft dar (vgl. Meereswellen).

Annahmen:

- der Druck in der Blase bleibt gleich mit dem Umgebungsdruck
- es wird keine Wärme ausgetauscht

Kraft:

$$f = (\rho^s - \rho^b)g$$

Schwingungen in der g-Mode finden nur statt, wenn die Kraft rücktreibend ist!

- Nur in Zonen ohne Konvektion möglich!

Helioseismologie

Helioseismologie ist die Untersuchung der nichtradialen Pulsationen der Sonne.

- Aus dem Vergleich der erwarteten und gemessenen Frequenzen lassen sich Modelle der Sonne überprüfen
- bisher wurden tausende p-Moden entdeckt (sog. 5-Minuten Oszillation)

z.B. einige gewonnene Erkenntnisse:

Konvektionszone zwischen $0,7 R$ und R
Differentielle Rotation endet bei $0,65 R$

Helioseismologie

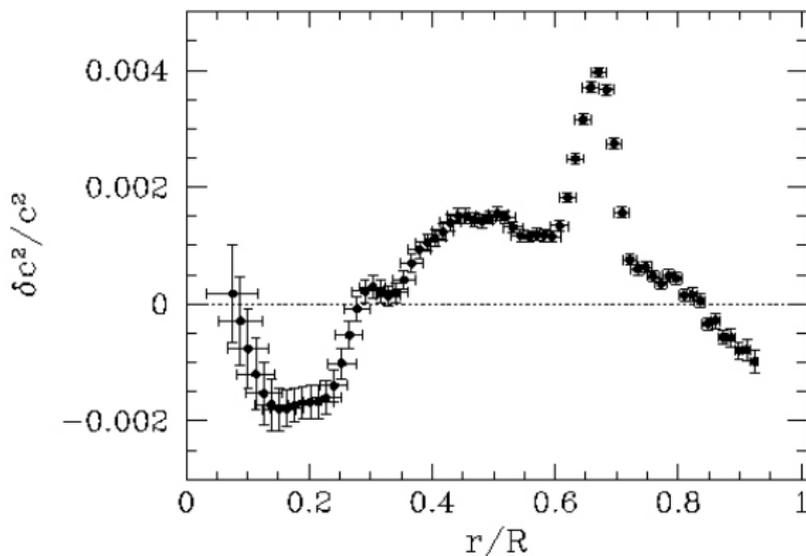


Abbildung: Unterschied zwischen erwarteter und gemessener Schallgeschwindigkeit. Quelle: SOHO, Nasa

Helioseismologie

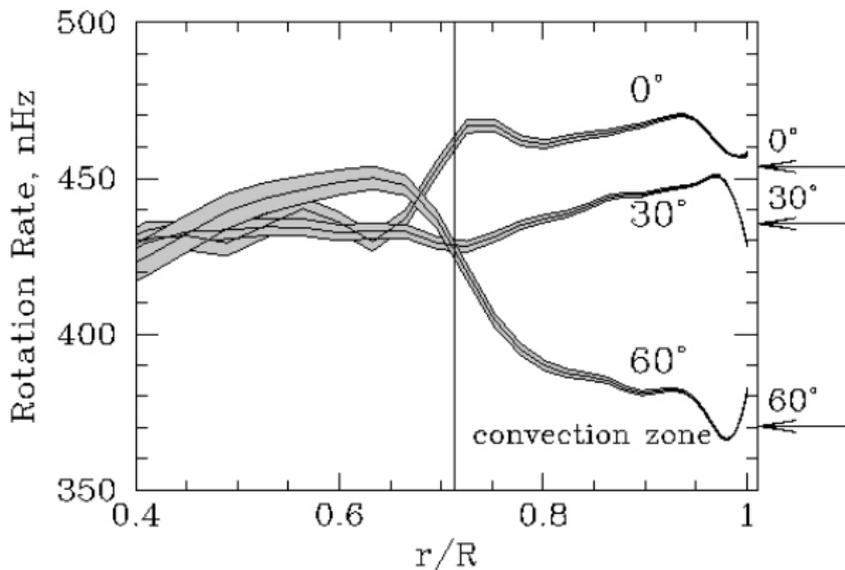


Abbildung: Rotationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Breitengrades.
Quelle: SOHO, Nasa

Asteroseismologie

Asteroseismologie wendet die Prinzipien der Helioseismologie auf andere Sterne an. Dabei konnten z.B. die g-Moden bei weissen Zwergen nachgewiesen werden.

Probleme:

- Es können nur Oszillationen in niedrigen Moden nachgewiesen werden, da diese eine größere Amplitude haben
- Eine Identifikation der Moden ist schwierig, da der Stern nichtmehr aufgelöst werden kann

Die Untersuchung der Schwingungen bietet einen Einblick in den inneren Aufbau der Sterne.

Entfernungsbestimmung per Parallaxe

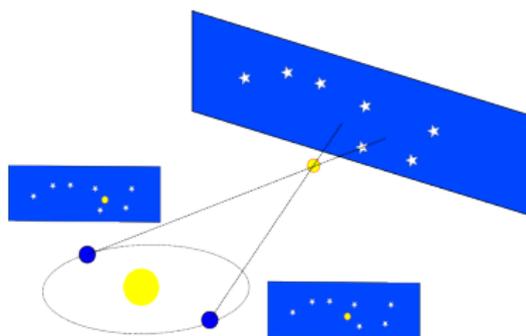


Abbildung: Entfernungsbestimmung durch die jährliche Parallaxe. Quelle: Wikipedia

- Die größte messbare Strecke wird durch die Winkelauflösung begrenzt.
- erreichbare Auflösung: ≈ 1 marcsec
- entspricht 1 kpc

Bereits die Milchstraße hat einen Durchmesser von über 20 kpc !

Standardkerzen

Eine andere Methode zur Entfernungsbestimmung sind die sog. Standardkerzen. Bei einer Standardkerze handelt es sich um ein Objekt, dessen absolute Helligkeit M bekannt ist.

Die Entfernung erhält man dann mit der scheinbaren Helligkeit m aus dem Entfernungsmodul:

$$m - M = -5 + 5 \log(d)$$

Beispiele für Standardkerzen:

- Supernovae Typ 1a
- Cepheiden und RR-Lyrae

Entfernungsbestimmung mit Cepheiden

Ablauf der Entfernungsbestimmung mit Cepheiden:

- Aus der Periode P wird die absolute Helligkeit bestimmt

$$M_{\langle V \rangle} = -2,81 \log(P_d) - 1,43$$

- die mittlere scheinbare Helligkeit m wird aus der Lichtkurve bestimmt.
- aus dem Entfernungsmodul lässt sich der Abstand d in pc bestimmen:

$$d = 10^{1 + \frac{m-M}{5 \text{ mag}}} \text{ pc}$$

Entfernungsbestimmung zum Virgo-Haufen

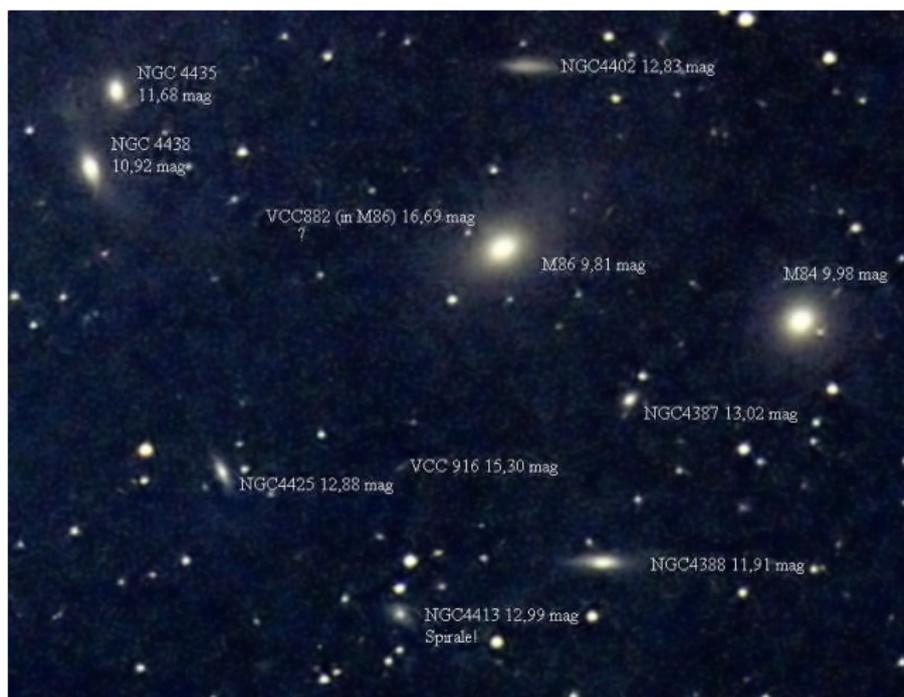


Abbildung: Ein Ausschnitt des Virgo-Haufens. Quelle: wikipedia.de

Entfernungsbestimmung zum Virgo-Haufen

Virgo-Haufen

Der Virgo-Haufen ist ein Galaxienhaufen mit über 1300 Galaxien. Die Milchstraße gehört zu dem Virgo-Superhaufen.

- Die Entfernungsmessung zum Virgo-Haufen war ein Schlüsselprojekt des HST, um die Hubblekonstante zu bestimmen.
- Die erste Messung mit Cepheiden in M100 führt 1994 auf 17 Mpc Entfernung.
- Weitere Messungen ergaben $15,4 \pm 0,5$ Mpc

Grenzen der Entfernungsbestimmung

- Cepheiden müssen noch auflösbar sein
- Beim Hubble-Teleskop ist die theoretische Grenze für die hellsten Cepheiden 100 Mpc.
- In der Praxis: 30 Mpc

Für größere Entfernungen muss man Supernovae Typ 1a verwenden, die mit Hilfe von Cepheiden kalibriert wurden.

Quellen

- Carroll & Ostlie: An Introduction to Modern astrophysics, Pearson 2007
- Hansen, Kawaler & Trimble: Stellar Interiors: Physical Principles, Structure, and Evolution, Springer 2004
- Unsöld & Baschek: Der Neue Kosmos, Springer, Berlin Heidelberg New York 1999
- Fouqué et al.: Structure, mass and distance of the Virgo cluster