

Pulsation

Historisch:

1912 untersuchte Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) am Harvard College Observatorium Fotoplatten mit Aufnahmen der sehr hellen pulsierenden Sterne in der kleinen Magellanschen Wolke.

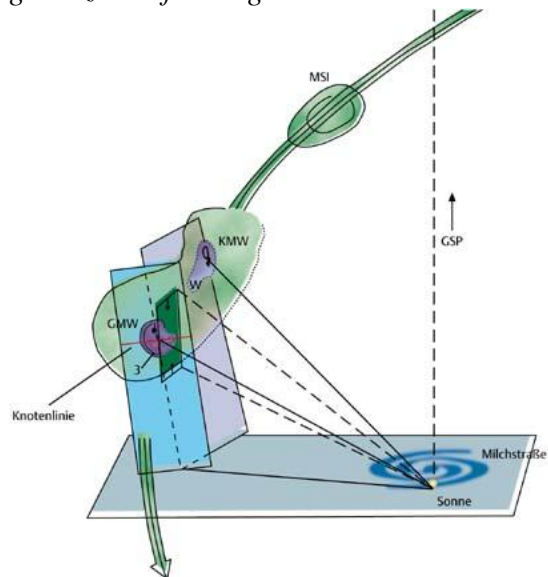
➔ *Magellansche Wolken:*

Die Magellanschen Wolken sind zwei irreguläre Zwerggalaxien in nächster Nachbarschaft zur Milchstraße und damit Teil der Lokalen Gruppe. Sie werden mit GMW und KMW (Große/Kleine Magellansche Wolke) bzw. englisch mit LMC und SMC (Large/Small Magellanic Cloud) abgekürzt. Entfernung: 143.000 bis 166.000 Lichtjahre



Kleine Magellansche Wolke

Quelle: <http://www.br-online.de/wissen-bildung/spacenight/sterngucker/foto/galaxie-magellansche-gr.jpg>

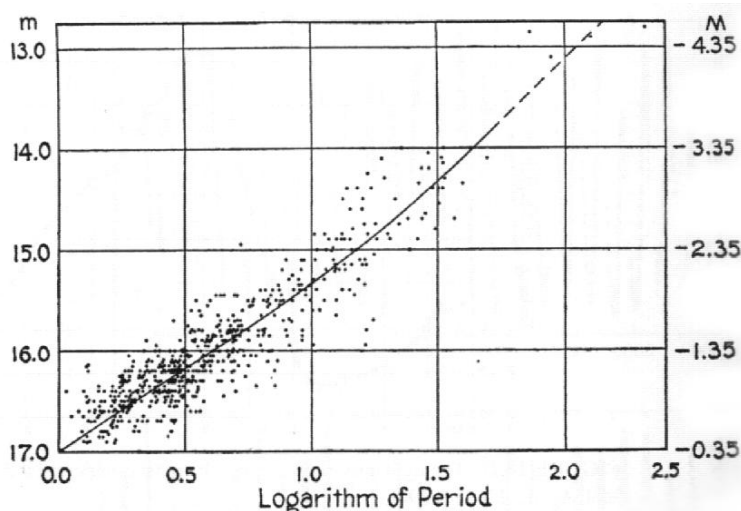


Lage der Magellanschen Wolken

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Magellansche_Wolken

Sie fand heraus, dass die Helligkeit einer Gruppe von 25 Sternen, die dem Stern δ Cephei gleichen, mit ihrer Periode in Zusammenhang steht.

Im doppelt logarithmischen Maßstab ergab sich folgender Zusammenhang:



Zusammenhang von Helligkeit und Periode

Quelle: Sternwarte, Uni Erlangen

Perioden-Helligkeits-Beziehung

Bevor man die Perioden-Helligkeits-Beziehung besser verstehen kann, betrachte erst die Physik pulsierender Sterne (Cepheiden, RR-Lyrae Sterne, Mira usw.)

→ *Cepheiden*:

- *Cepheiden sind Population I oder II Riesensterne*
- *Effektive Temperaturen von 6000°-8000° C*
- *Entweder sehr junge massenreiche Sterne oder sehr alte massenarme Sterne*
- *Zwischen 100 und 10⁴ Sonnenleuchtkräfte*
- *Perioden zwischen 1-100 Tagen*

Hydrodynamisches Gleichgewicht:

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

In Worten:

Auf die Sternhülle wirken zwei Kräfte. Zum einen die Schwerkraft, die den Stern zu kontrahieren versucht, zum anderen die durch den Strahlungsdruck bedingte nach außen wirkende Kraft.

Die Gleichungen sind sehr kompliziert und nicht analytisch lösbar.

Modell: Der Stern besteht aus Kugelschichten, die den Oszillationsprozess adiabatisch durchlaufen. Einige Schichten verrichten Arbeit, während anderen Arbeit zugeführt wird. Es kann sich wenn die Summe verschwindet eine stabile Schwingung einstellen.

Die nach außen wirkende Kraft wird durch zwei Effekte bestimmt:

- *Die Erzeugungsrate im Sterninneren*
- Die **Durchlässigkeit** der äußeren Schichten für die Strahlung.
Je undurchlässiger die äußeren Schichten, desto größer der Strahlungsdruck.

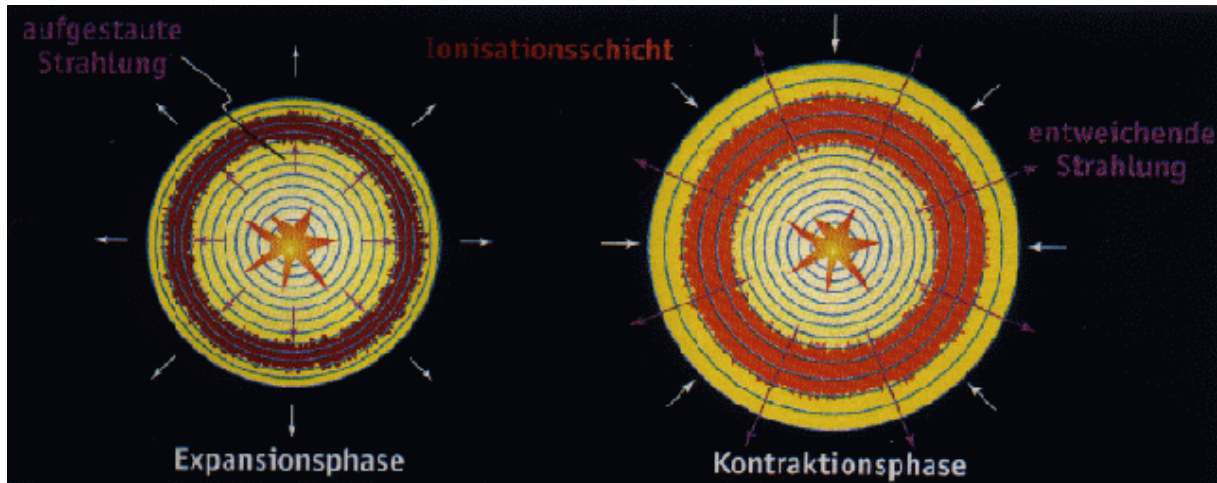
Man spricht dabei von der sog. **Opazität** κ (Maß für die Lichtundurchlässigkeit von Stoffen)

Damit lässt sich der Vorgang der Pulsation durch den Kappa-Mechanismus erklären:

- Der Stern kontrahiert, dabei steigt die Opazität in der 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

Die mathematische Umsetzung liefert die sog. **Kramers Opazitätsformel**:

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



Kappa-Mechanismus

Quelle: <http://www.astro.uni-bonn.de/~deboer/eida/cepheid-puls-mod.gif>

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

➔ *Physikalischer Hintergrund zur Helligkeit*

Für die vom Stern ausgehende Strahlungsleistung gilt $E = \frac{L}{4r^2\pi}$, wobei E die ankommende Strahlungsleistung, L die Abgestrahlte Leistung des Sterns ist.

Um Sterne bzgl. ihrer Leuchtkraft L vergleichen zu können, müssten sie alle gleichen Abstand zum Beobachter haben. Dieser ist festgelegt und beträgt 10 pc (32,6 LJ).

Die Helligkeit mit der Sterne in 10 pc Entfernung erscheinen würden, heißt **absolute Helligkeit**, sie ist ein Maß zum Leuchtkraftvergleich der Sterne.

$$M_1 - M_2 = -2,5 \lg \frac{\frac{L_1}{4\pi(10pc)^2}}{\frac{L_2}{4\pi(10pc)^2}} = -2,5 \lg \frac{L_1}{L_2}$$

Qualitative Herleitung:

Abschätzung der Periode, indem man den Radius des Sterns durch die adiabatische Schallgeschwindigkeit teilt.

$$\Pi \propto \frac{R}{C_s} \propto \frac{R}{\sqrt{\frac{P}{\rho}}} \propto \frac{R}{\sqrt{\rho R^2}} \propto \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

Weiter ist $\rho \propto R^{-3}$ und $L \propto R^2$

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

Verwende nun obige Beziehung zwischen Lichtkraft L und absoluter Helligkeit M ($L \propto 10^{-0,4 M}$) und man erhält

$$M = -3,33 \lg(\Pi) + const.$$

Für klassische Cepheiden gilt folgende experimentelle Beziehung:

$$M = -2,8 \lg(\Pi) - 1,43$$

Als klassisches Beispiel soll hier der Stern δ Cephei betrachtet werden.



scheinbare Helligkeit von δ Cephei

Quelle: http://www.meteo-maarsssen.nl/images1/ast_delta_cep2.gif

Entfernungsbestimmung mit Cepheiden

Es gilt

$$m-M = -2,5 \lg \frac{\frac{L}{4\pi r^2}}{\frac{L_r}{4\pi(10pc)^2}} = -2,5 \lg \left(\frac{10pc}{r}\right)^2 = 5 \lg \frac{r}{10pc} = 5 \lg r - 5 \text{ (Entfernungsmodul)}$$

- Dabei ist m die „scheinbare Helligkeit“ und gibt an, wie hell ein Himmelskörper vor allem ein Stern von der Erde aus „erscheint“. Einheit ist [mag], die sog. Magnitude. Je kleiner die Zahl, desto heller ist das Gestirn.
Bsp.: Sonne (-26,73 mag), Saturn (-0,47 mag)

Aus der Periode P_d wird die absolute Helligkeit bestimmt

$$M = -2,8 \lg(P_d) - 1,43$$

Die mittlere scheinbare Helligkeit m wird aus der Lichtkurve bestimmt,

z.B. δ Cephei: $\frac{3,5+4,4}{2} = 3,95$.

Aus dem sog. Entfernungsmodul $m - M = 5 \lg d - 5$ lässt sich der Abstand d in pc bestimmen:

$$d = 10^{1 + \frac{m-M}{5 \text{ mag}}} \text{pc}$$
$$d = 10^{1 + \frac{m - [-2,8 \lg(P_d) - 1,43]}{5 \text{ mag}}} \text{pc} = 10^{1 + \frac{m + 2,8 \lg(P_d) + 1,43}{5 \text{ mag}}} \text{pc}$$

Man berechne nun die Entfernung zu δ Cephei (**Daten:** $P_d = 5,36643$ Tage, $m = 3,95$)

$$\Rightarrow d = 10^{1 + \frac{3,95 + 2,8 \lg(5,4) + 1,43}{5 \text{ mag}}} \text{pc} = 300 \text{ pc}$$

Laut Wikipedia ist δ Cephei 273 pc entfernt.

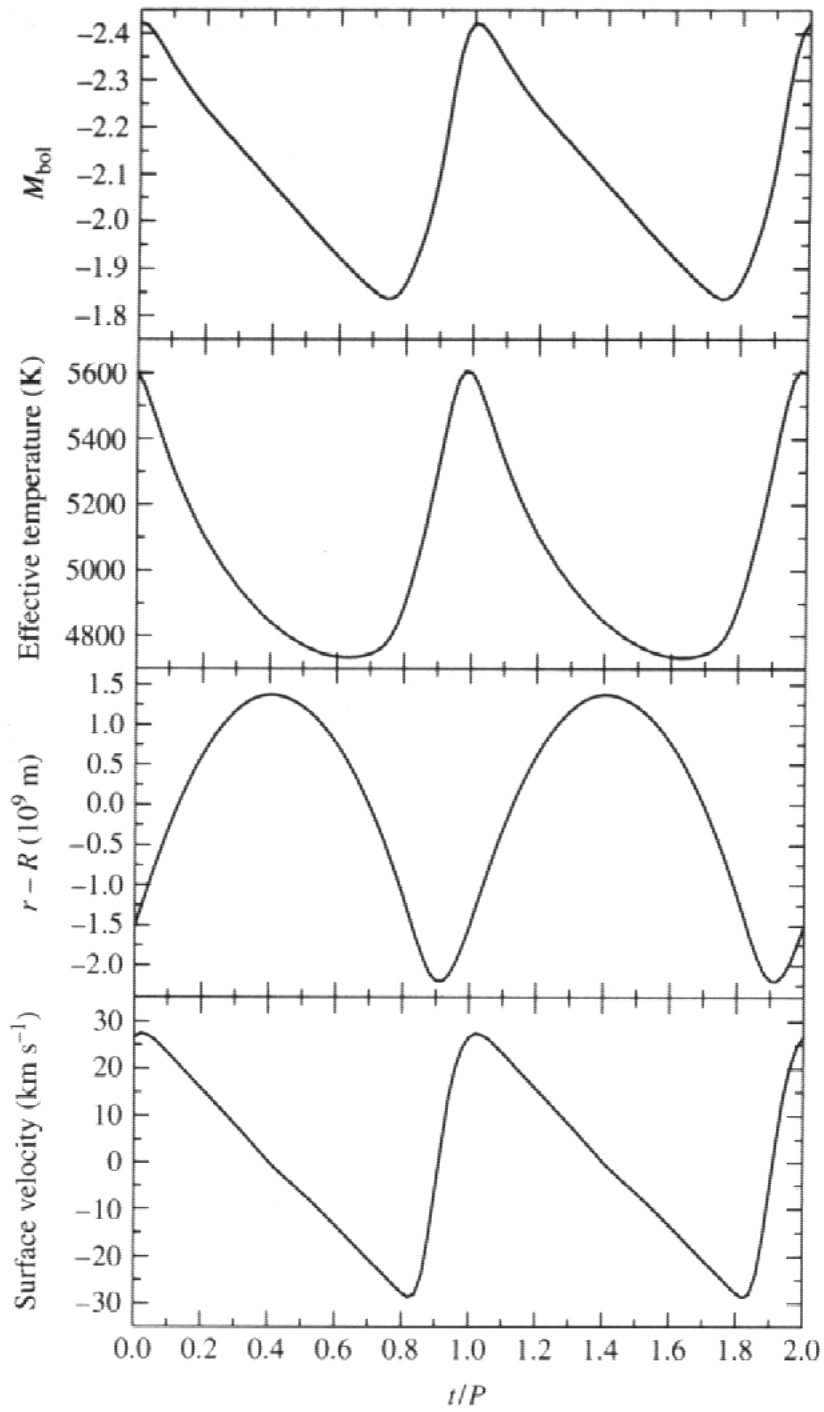
Grenzen der Entfernungsbestimmung

- Cepheiden müssen noch auflösbar sein
- Beim Hubble-Teleskop ist die theoretische Grenze für die hellsten Cepheiden 100 Mpc
- **AUSBLICK:**
Für größere Entfernungen muss man Supernovae Typ 1a verwenden, die mit Hilfe von Cepheiden kalibriert werden.

Literatur

- **Internet** (Zugriff am 31.10.2011)
 - http://www.leifiphysik.de/web_ph12/grundwissen/12entfernung/pulsation.htm
 - http://www.leifiphysik.de/web_ph12/grundwissen/12entfernung/cepheiden.htm
 - http://outreach.atnf.csiro.au/education/senior/astrophysics/variable_cepheids.html
 - **Die Quellen der Bilder sind im Fließtext angegeben.**
- **Bücher**
 - Carroll & Ostlie: An Introduction to Modern astrophysics, Pearson 2007
 - Unsöld & Baschek: Der Neue Kosmos, Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1999

Anhang: Zustandsgrößen von δ Cephei



Quelle: Carroll & Ostlie: An Introduction to Modern astrophysics