

# LE CEFEIDI

Domanda su Quora:

In termini semplici, come fa una stella variabile Cefeide a permetterci di determinare le distanze da galassie lontane?

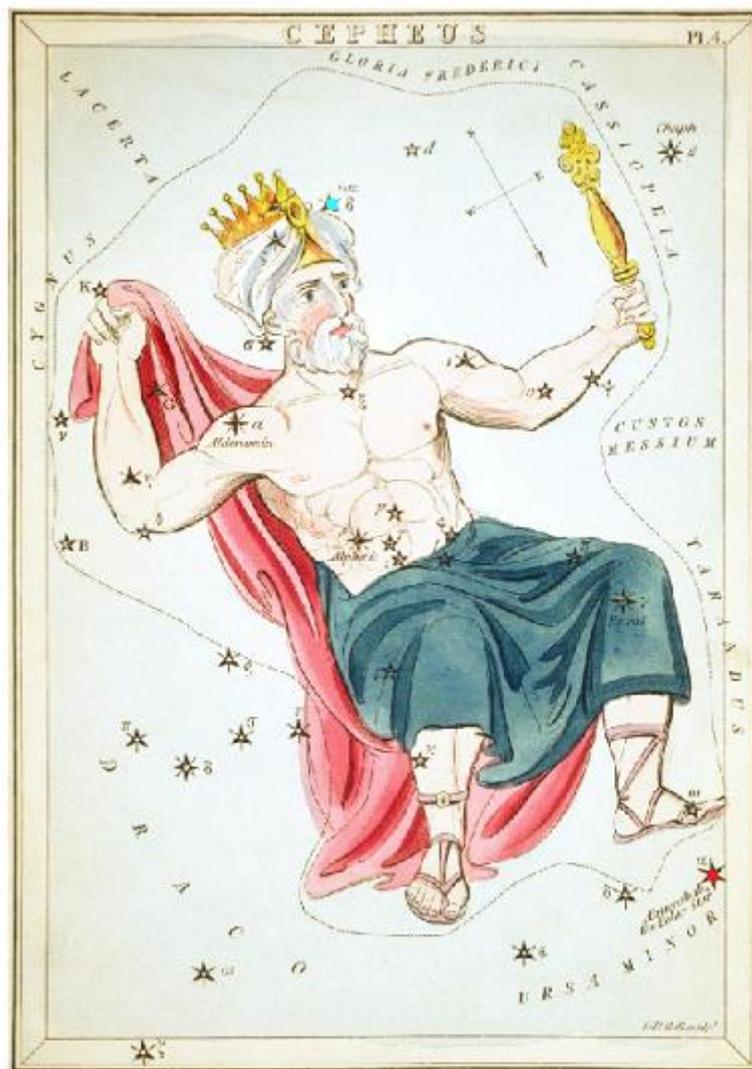


Fig.1

Cepheus (dalla collezione Urania's Mirror, Londra, 1825)  
In azzurro Delta Cephei (vicino alla corona), in rosso la Polare, vicino al piede sinistro.  
(public domain)

Il termine “**stella variabile**” significa che la Luminosità della stella Cefeide varia da un massimo a un minimo.

Il termine **Cefeide** significa che la stella è una variabile regolare cioè la sua Luminosità varia con un periodo costante  $P$  (da giorni a mesi; certe cefeidi nane hanno anche periodi inferiori a un giorno). Il nome proviene dalla stella di quarta grandezza Delta Cephei, a 800 parsec dal sistema solare, studiata da **J. Goodricke** nel 1784 (1)

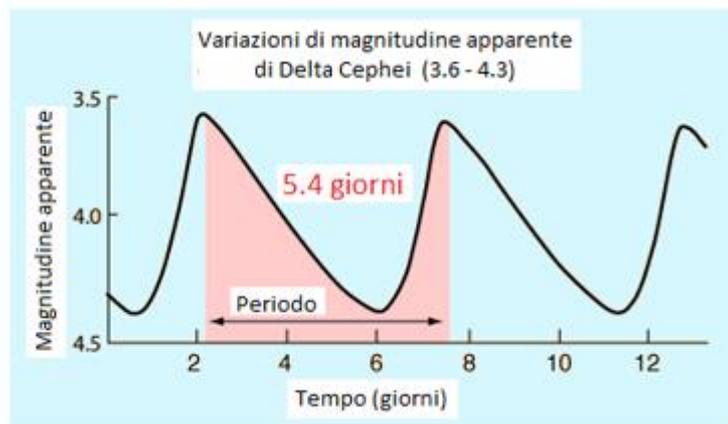


Fig.2  
“Curva di luce” di Delta Cephei (semplificata)

**La determinazione della distanza risiede nella relazione tra Periodo e Luminosità di una stella Cefeide, che permette di risalire dall’osservazione del periodo della Cefeide alla sua Luminosità intrinseca o alla magnitudine assoluta.** La relazione fu scoperta intorno nei primi anni del XX secolo da **Miss Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) (2)**, che lavorava come “computer umano” all’Osservatorio di Harvard e studiava la luminosità delle stelle nelle Nubi di Magellano. In un articolo del 1908 essa notò che le variabili più brillanti tra le 1777 di cui l’Osservatorio presentava il catalogo sembravano avere un periodo più lungo; la relazione Periodo-Luminosità fu pubblicata nella storica circolare 173 dell’Osservatorio, del 3 marzo 1912, firmata come d’uso dal Direttore **E.C. Pickering**, che non mancò di attribuire il lavoro alla Leavitt nella prima riga del testo (disponibile in rete). La conclusione della Leavitt era basata sull’osservazione che le cefeidi della *Piccola Nube di Magellano* potevano essere considerate praticamente tutte alla stessa distanza e quindi le *differenze* di magnitudine apparente tra le varie Cefeidi (per esempio al picco del ciclo) erano indipendenti dalla distanza.

*La relazione scoperta dalla Leavitt, però, non era ancora applicata alla determinazione delle distanze.*

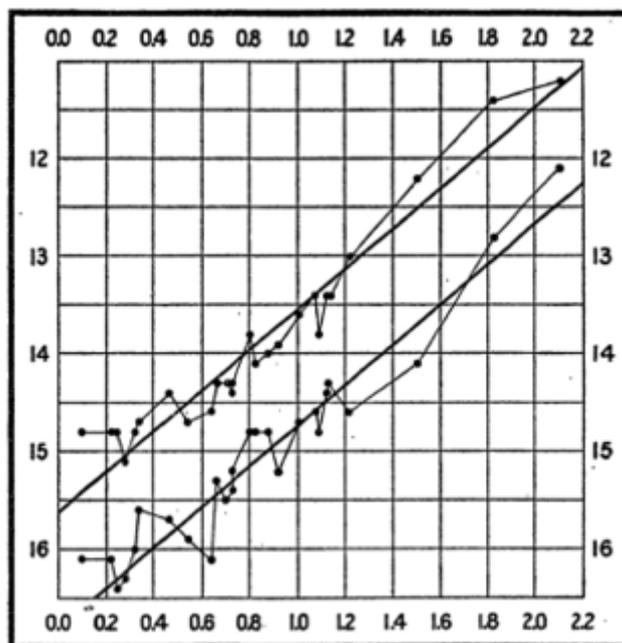


Fig. 2.

Fig.3

Estratta dalla Circolare 173 dell'osservatorio di Harvard (1912) menzionata nel testo. In ascisse il logaritmo del periodo in giorni, in ordinate la magnitudine apparente (massima e minima) di venticinque cefeidi della Piccola Nube di Magellano.

**Applicazione alla misura delle distanze.** Per compiere il passo successivo occorre calibrare la relazione, o in base a una cefeide la cui distanza fosse indipendentemente nota (o calcolabile con metodi relativamente sicuri, quale il metodo della parallasse, applicabile a quel tempo a stelle che fossero a distanze inferiori a 100 parsec), oppure conoscendo con esattezza la distanza della Piccola Nube di Magellano. Il passo, ovvio ma essenziale, fu fatto entro pochi anni dal 1910. Il primo a tentarlo fu **Ejnar Hertzsprung**, che misurò la distanza di diciassette cefeidi vicine utilizzando una sua propria relazione "Temperatura-luminosità" (il futuro "*diagramma di Hertzsprung-Russel*" in embrione), ma produsse una distanza della Piccola Nube di Magellano di 3000 anni luce (la distanza reale è circa 200 000 anni luce: errore pressoché inspiegabile, forse proprio una svista). In ogni caso nel suo articolo del 1914 (pure disponibile in rete) egli non ha dubbi nell'attribuire la scoperta della relazione Periodo-Luminosità a Miss Leavitt (3). *Ben presto l'errore fu corretto e si poté risalire alla Luminosità o alla Magnitudine assoluta delle Cefeidi in base al loro periodo.*

*Una volta nota, grazie alla calibrazione, la luminosità o la magnitudine assoluta, e conoscendo il flusso ricevuto o la magnitudine apparente, diventa semplice calcolare la distanza.*

In sostanza il risultato proviene dalla formula:

$$(\text{Flusso ricevuto}) = \frac{\text{Luminosità}}{(4\pi d^2)} - \text{eventuali termini correttivi di minore importanza.}$$

**La relazione scoperta da Miss Leavitt (4) ha un valore storico non indifferente:** essa fu il primo passo per misurare le distanze intergalattiche, risolvendo il cosiddetto “grande dibattito”, se la nostra Galassia fosse l'intero universo (opinione di **Harlow Shapley**), o se non fosse altro che una tra le tante galassie di un universo assai più grande (opinione di **Heber Curtis**).

Negli anni successivi, alcuni problemi insorti nell'uso della relazione Periodo-Luminosità spinsero a concludere che c'erano almeno **due differenti classi di Cefeidi**, con diversa relazione Periodo-Luminosità e appartenenti a due diverse “popolazioni stellari” (**W. Baade**, anni 1940). I problemi furono però appianati in quanto l'appartenenza di una cefeide all'una o all'altra classe può essere stabilita in più di un modo.

In quanto al problema astrofisico, più che astronomico, della **dinamica della pulsazione (5)**, si crede che esso sia definitivamente risolto. Il modello accettato è basato su un'ipotesi iniziale di **A. S. Eddington** (1917) e su studi conclusivi di **S. A. Zhevakin** (1953).

**Le cefeidi sono quindi importanti standard di luminosità (candele standard). La scoperta di una cefeide in una Galassia lontana permette di determinare la distanza della galassia.** Tuttavia, non mancano i problemi: per vari motivi, **l'errore** della determinazione della distanza in base alle cefeidi è valutato tra 7 e 14%. Inoltre, il metodo ha i suoi **limiti**, in quanto richiede che le cefeidi siano discernibili, e cioè che la galassia lontana sia dopo tutto relativamente vicina: la cefeide più lontana nota oggi (2018) è nella galassia NGC 3370 nella costellazione del Leone, a 29 Mpc dalla nostra Galassia.

**Le Cefeidi sono però un “gradino” essenziale nella calibrazione della “scala delle distanze cosmiche” (6)**, successione di metodi per la misura delle distanze cosmiche, che si applicano a successivi intervalli di distanze, e vanno dalle misure geometriche valide nel sistema solare, fino alla misura del *redshift* o spostamento verso il rosso valido su scala cosmologica. Per questo si veda l'articolo <https://en.wikipedia.org/wiki/Co...>, in cui sono citati una quantità di metodi di misura, di diversa applicabilità e affidabilità. La versione italiana <https://it.wikipedia.org/wiki/Sc...> è assai più povera, citando solo i più importanti 5 +1 metodi di misura delle distanze (3)

## NOTE.

(1) **John Goodricke** (Gröningen, 17 settembre 1764 – York, 20 aprile 1786) fu un astronomo dilettante inglese, ragazzo prodigio.

Figlio di genitori inglesi, sordo (in seguito a malattia contratta giovanissimo - non l'unico in questa storia), morì all'età di 21 anni a causa di una polmonite contratta nelle lunghe osservazioni notturne.

Scoprì la variazione di alcune stelle variabili (fra cui nel 1784 la prima variabile intrinseca, Delta Cephei, divenuta poi il prototipo delle protagoniste di questo saggio). Nel 1782 (diciottenne) aveva proposto, fra l'incredulità e finanche la derisione degli astronomi professionisti, tra cui William Herschel, l'ipotesi che le variazioni periodiche di luminosità della stella Algol (Beta Persei) fossero dovute ad eclissi reciproche di due stelle, l'una più luminosa e l'altra quasi oscura, che orbitavano attorno al comune centro di gravità. Ebbe comunque per questa scoperta la Copley Medal (1783), assegnatagli dalla Royal Society, che poi lo ammise come membro il 16 aprile 1786 – troppo tardi: lui non lo seppe neppure.

(2) **Henrietta Swan Leavitt** (Lancaster, 4 luglio 1868 – Cambridge, 12 dicembre 1921) fu un'astronoma statunitense, di famiglia puritana giunta fra le prime nella Nuova Inghilterra (non però sul *Mayflower*). Dopo gli studi al Radcliffe College di Cambridge, Miss Leavitt iniziò a lavorare nel 1893 presso l'Osservatorio di Harvard come "computer umano", cioè con le mansioni di calcolatore manuale - computer - come venivano chiamati alla fine del XIX secolo tali specialisti. Fece due viaggi in Europa e ebbe un breve impiego al Beloit College, Wisconsin. In tale periodo una malattia la rese progressivamente sorda.

Tornata a Harvard continuò il suo lavoro di "computer", misurando e catalogando la luminosità delle stelle provenienti dalle lastre fotografiche dell'Osservatorio. A quel tempo non si permetteva alle donne di fare osservazioni dirette con telescopi. La paga era magra, ma almeno inizialmente Miss Leavitt non ne approfittò, essendo relativamente agiata. Più tardi fu pagata 0.30 \$ all'ora, 10.50 \$ alla settimana.

La sua più importante scoperta, della relazione Periodo-Luminosità delle Cefeidi, fu fatta negli anni 1908-1912 e pubblicata nel 1912. Anche se non ebbe promozioni o riconoscimenti ufficiali, era nota ovunque come la scopritrice della relazione, la cui importanza può solo essere sottovalutata. Finalmente, nel 1921, il nuovo direttore dell'Osservatorio di Harvard, Harlow Shapley, la nominò capo della divisione di fotometria stellare. Ma era tardi: il 12 dicembre 1921 Henrietta Leavitt era già morta di cancro.

Nel suo necrologio il suo collega Solon I. Bayley scrisse: *"aveva la felice facoltà di apprezzare tutto ciò che era degno e amabile negli altri, ed aveva una natura così piena di sole che, per lei, tutta la vita diventava bella e piena di significato."*

Il matematico svedese Gösta Mittag-Leffler, dell'Accademia Svedese delle Scienze, tentò di farla nominare per il Premio Nobel 1924, proprio per la sua formulazione della relazione periodo-luminosità delle cefeidi. Scoprì allora che Miss Leavitt era già mancata ai vivi e il Premio non le fu assegnato (essendo assegnato solo a scienziati viventi).

La sua maggiore sfortuna postuma è che una scrittrice di drammi, certa Lauren Gunderson, scrisse un dramma su di lei intitolato "Silent Sky" ("Cielo silenzioso"), in cui,

oltre al solito massacro della storia (la fa entrare all'osservatorio insieme a Annie Cannon, altra famosa astronoma sorda, nata però nel 1863), le regala una storia d'amore apocrifa e del tutto fuori luogo con tale Peter Shaw, impiegato allo stesso Osservatorio. Miss Leavitt non si sposò, ed era tutta dedicata alla famiglia e alla sua chiesa.

**(3) Ejnar Hertzsprung:** "Über die räumliche Verteilung der Veränderlichen vom  $\delta$  Cephei-Typus." *Astronomischen Nachrichten*, 196 p. 201–210 (1914). [Onlineartikel](#).

**(4) Esercizi per chi li vuol fare.**

Nel caso in cui un appassionato voglia applicare la relazione Periodo-Luminosità, essa è, per le cefeidi classiche (le più brillanti e di periodo più lungo):

$$M = -2.87 \text{ Log}_{10} (P) - 1.40$$

(dove M è la magnitudine assoluta nella banda V e P è il periodo in giorni)

da applicarsi alla formula per la distanza:

$$d = 10^{(1/5)(m-M+5)}$$

dove d è la distanza in parsec, m la magnitudine visuale apparente, M quella assoluta appena ricavata ([Henrietta Swan Leavitt - Wikipedia](#)).

Si noti che la magnitudine assoluta del Sole (magnitudine apparente che il sole avrebbe se si trovasse a 10 pc) vale **4.83**. Ogni grado della scala corrisponde ad un incremento (o decremento) pari a  $100^{1/5} = 10^{2/5} = 2.512$ ; in sostanza, una stella che presenta magnitudine +1 è circa 2,512 volte più luminosa di una che presenti +2 come magnitudine. ([Magnitudine assoluta - Wikipedia](#))

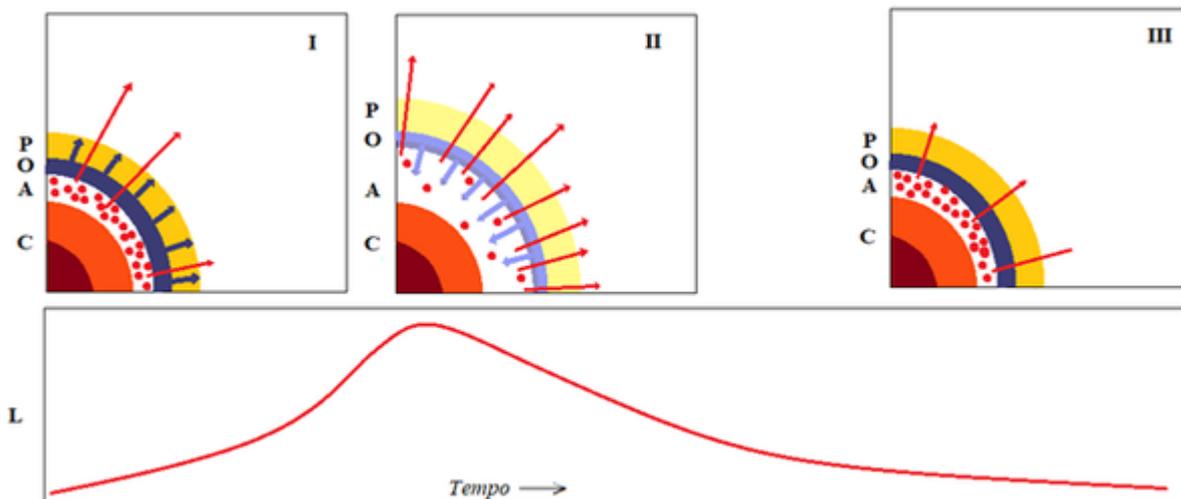
Lo stesso articolo afferma che il rapporto  $L(\text{stella})/L(\text{sole}) = 10^{(0.4(M(\text{sole})-M(\text{stella}))}$ , da cui la tavola:

Periodo <u>Cefeide</u>	M(Cef)	L(Cef) /L(sole)
1 d	-1.4	310
5 d	-3.40	1958
10 d	-4.27	4365
50 d	-6.27	27542

(Questi valori vanno presi “cum granu salis”, perché dipendono dalla banda in cui viene ricevuto il flusso proveniente dalla stella e da altri fattori secondari).

### (3) Il meccanismo di pulsazione delle Cefeidi.

Le Cefeidi sono nella cosiddetta fascia di instabilità del diagramma di Hertzsprung-Russel: ma, per quanto questa fascia possa essere attraversata più d’una volta da una stessa stella, non si pensa che l’instabilità sia in grado di manifestarsi in una periodicità regolare a lungo termine. Il nome “instabilità” significa soltanto che in una stella sita nella “zona di instabilità” una perturbazione si amplifica ed estende invece di smorzarsi. Eddington pensò che un’instabilità così amplificata si sarebbe comunque esaurita in una pulsazione e al massimo avrebbe potuto fornire il meccanismo di innesco di una periodicità regolare a lungo termine. Per quest’ultima, Eddington (1917) propose il principio del meccanismo oggi accettato, anche se ancora nella sua edizione del 1926 del classico “*The internal constitution of stars*” gli mancava un importante elemento, che fu chiarito solo venticinque anni più tardi. Egli dapprima analizzò varie soluzioni al problema della variabilità delle Cefeidi, scartando per prima la possibilità (già da tempo esclusa) che si trattasse di una “binaria a eclisse” come Algol ( $\beta$  Persei). Infine propose il suo meccanismo detto “*della valvola di Eddington*” o “ $\kappa$ -mechanism, *meccanismo  $\kappa$* ” dove  $\kappa$  è il simbolo tradizionalmente utilizzato dagli astrofisici per indicare l’opacità del materiale stellare.



Questa era la proposta di Eddington (vedi figura )

**Fase I:** Il nucleo C è la fornace a fusione nucleare che produce fotoni gamma di alta energia (alcuni MeV). Questi vengono degradati negli strati superiori della stella. Tuttavia, la fascia O è opaca alla radiazione (*la valvola è chiusa*) e intrappola i fotoni (puntini rossi). Solo pochi fotoni (simbolizzati da tre frecce rosse) riescono a uscire nella fotosfera (P), per cui la luminosità L della stella ci appare bassa. Però, la fascia O, come indicano le frecce color indaco, spinta dalla pressione termica (fotoni) della stella si espande progressivamente. Si raggiunge un termine dell’espansione nella Fase II.

Fase II: Espandendosi, la fascia opaca si raffredda e diventa meno opaca (il colore indaco si schiarisce – *la valvola si apre*). La radiazione può ora sfuggire nella fotosfera e di qui nello spazio. Essa è simbolizzata con otto frecce rosse, che indicano l'aumentata luminosità L. Inoltre, il colore più chiaro dello strato esterno P indica che la temperatura della superficie stellare è aumentata. Si noti che il raggio della stella è aumentato del 25% circa. Ma intanto, la fascia opaca, diventata quasi trasparente, si raffredda e ricade verso la posizione di partenza della fase I. Intanto si riscalda e entra in fase III.

Fase III. La fascia opaca, riscaldandosi, è ridiventata opaca, i fotoni non sfuggono più, la Luminosità è tornata al minimo, e il raggio stellare è decresciuto di circa 25%. La pressione termica prodotta dalla fornace nucleare è pronta a spingere di nuovo la fascia opaca verso l'esterno, una nuova pulsazione ha inizio.

Ciò che mancava a Eddington era una chiara origine dell'opacità variabile. Egli propose che i responsabili fossero gli elementi pesanti in piccola parte fabbricati nella fornace a fusione, che in questa fase della vita stellare è dedicata a fondere l'idrogeno in elio.

La soluzione fu proposta da S.A. Zhevakin nel 1953. Occorreva tener conto dell'abbondanza di He<sup>+</sup> negli strati interni delle Cefeidi e dei fenomeni di ionizzazione e ricombinazione che avvengono a causa dell'aumento (diminuzione) di temperatura e pressione. L'intensa radiazione generata dalla stella ionizza una piccola frazione dell'He<sup>+</sup> a He<sup>++</sup>, che è molto più opaco alla radiazione.

Perché così sia non l'ho trovato spiegato con chiarezza nella letteratura divulgativa, includendo Wikipedia. Ho pertanto ricostruito una spiegazione per me più soddisfacente, come segue.

I meccanismi che causano l'opacità sono essenzialmente quattro:

1. Transizioni "bound-bound" di un elettrone legato in un atomo o ione, da un'orbita di energia inferiore a un'orbita di energia più elevata assorbendo un fotone;
2. Transizioni bound-free, o fotoionizzazione, in cui un fotone spende energia per liberare un elettrone legato in un atomo, cioè ionizzare (o ionizzare ulteriormente) l'atomo;
3. Transizioni free-free: questo meccanismo è più facile da spiegarsi per l'emissione di un fotone (si parla allora di radiazione di frenamento o bremsstrahlung) che non per l'assorbimento. In ogni caso la presenza di un nucleo/ione accelera (invece di frenare) un elettrone libero tramite l'assorbimento (invece dell'emissione) di un fotone. *Il nucleo/ione è necessario per la conservazione di energia e momento.*
4. "Scattering" Thomson di elettroni, che urtandosi possono emettere o assorbire fotoni.

He<sup>++</sup> può assorbire fotoni tramite transizioni di tipo (3) e propiziare l'assorbimento di fotoni col processo (4) grazie all'aumentata densità di elettroni liberi. Facendo i calcoli

dovuti (sia chiaro che i calcoli del trasferimento di radiazione in una stella non sono il soggetto meno intricato dell'astrofisica) si trova che questi meccanismi rendono lo He<sup>++</sup> più opaco dello He<sup>+</sup> o He non ionizzato, per quanto in questi ultimi i meccanismi (1) e (2) siano attivi.

Zhevakin, per mezzo di calcoli fatti quando ancora non c'erano grandi computers, concluse che la zona da me chiamata O, "zona di ionizzazione critica di He<sup>+</sup>", richiede almeno un'abbondanza di He, in numero di atomi, del 15%, e una temperatura tra 35000 e 55000 Kelvin.

Resta quindi da dire che la figura pone lo strato O a 0.75 R dove R è il raggio della stella. Questo è stato fatto per facilitare il disegno. In realtà lo strato di "ionizzazione critica dell'Elio", con una temperatura media di circa 45000 gradi è assai più vicino alla superficie della stella, più di 0.9 R.

#### **(4) Le Cefeidi e la scala delle distanze cosmiche.**

Dice l'articolo Scala delle distanze cosmiche - Wikipedia:

*Alla base della scala ci sono le osservazioni radar di Venere, che permettono di determinare la distanza tra la Terra e Venere e, mediante alcuni calcoli geometrici, la grandezza dell'orbita della Terra.*

*I passi successivi sono:*

- *la parallasse stellare;*
- *le variabili Cefeidi;*
- *i confronti rispetto alla sequenza principale;*
- *le supernovae di tipo Ia e la relazione di Tully-Fisher;*
- *lo spostamento verso il rosso (red-shift).*

*Ognuno di questi intervalli standard si basa su quello precedente.*