

Stelle



Primo Levi 2017

Roberto Bedogni

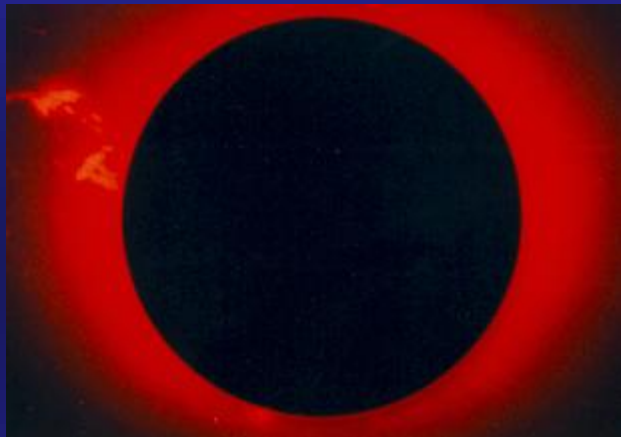
INAF Osservatorio Astronomico di Bologna

<http://www.bo.astro.it/~bedogni/primolevi>

Email :roberto.bedogni@oabo.inaf.it

Sole

Il Sole nella
riga H α



Distanza (km)	149 597 970 km ± 2
Massa (kg)	$1,989 \times 10^{30}$
Massa	332 830 M _T
Raggio equatoriale (km)	695 000
Raggio equatoriale	109 R _T
Periodo di rotazione (giorni)	25-36
Densità media (kg/m ³)	1410
Densità al centro (kg/m ³)	151300
Pressione al centro (bars)	$2,334 \cdot 10^{11}$
Pressione fotosferica (bars)	0,0001
Temperatura al centro (°K)	15,6 milioni °K
Temperatura fotosferica (°K)	5780
Temperatura coronale (°K)	Da 2 a 3 milioni °K
Velocità di fuga (km/sec)	618
Accelerazione di gravità (m/sec ²)	274
Luminosità (J/s)	$3,86 \times 10^{26}$
Magnitudine visuale	-26,8
Magnitudine assoluta bol.	4,74
Età (miliardi di anni)	4,55

Cosa sono le stelle ?



Le stelle sono sfere autogravitanti di gas ionizzato ad alta temperatura, che emettono energia.

La fonte di questa energia risiede nelle **reazioni nucleari**, che avvengono nella regione centrale, detta **nucleo**: ad esempio la fusione di idrogeno in elio, di gran lunga la più importante, ed in seguito in altri elementi più pesanti.

Le stelle sono fucine termonucleari autoregolate.

Almeno nella stragrande maggioranza dei casi, in qualche caso infatti i meccanismi non si rivelano sufficienti a mantenere la stabilità e si verifica un'esplosione.

Le stelle si evolvono ?



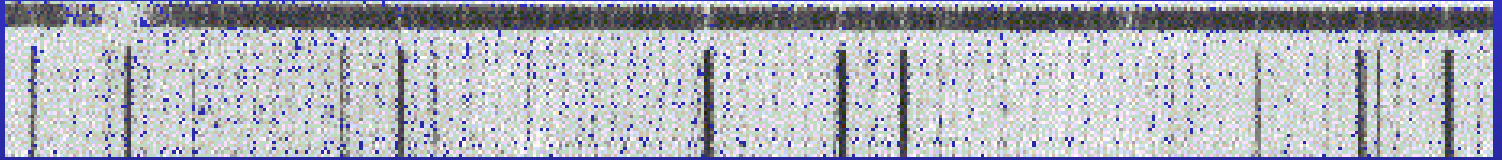
I meccanismi di produzione dell'energia garantiscono alle stelle condizioni di stabilità su tempi che vanno dai milioni ai miliardi di anni.

In particolare:

1. fu necessario attendere lo sviluppo della termodinamica nel XIX secolo per rendersi conto che calore ed energia erano la medesima cosa e che l'irraggiamento era una forma di trasporto dell'energia,
2. ma si dovette attendere lo sviluppo della fisica nucleare nel XX per comprendere che la fonte dell'energia stellare risiedeva nella fusione nucleare dell'idrogeno.

Le stelle: proprietà fisiche

Parametri fisici- la composizione chimica delle stelle



Elementi (misura diretta)

La composizione chimica di una stella si ricava dalle misure spettroscopiche ed è riferita alla fotosfera stellare

Idrogeno ed Elio

Gli spettri delle atmosfere stellari, solitamente con righe di assorbimento, mostrano che gli elementi di gran lunga più abbondanti sono Idrogeno e Elio, che da soli costituiscono una rilevante frazione (dal 96% al 99%) della massa di una stella.

Metalli

Il resto è suddiviso tra gli altri elementi, che gli astronomi denominano nel loro complesso con il termine di *metalli*, in una miscela in cui prevalgono carbonio, ossigeno, azoto, neon, argon, magnesio, zolfo, calcio, potassio, ferro, nichel, titanio, silicio, circa nelle stesse percentuali che si riscontrano sulla Terra.

Metallicità

Il valore della **metallicità** si ottiene utilizzando come misura di riferimento l'abbondanza degli elementi metallici del Sole. Tale misura non è di carattere assoluta ma relativa. Le linee di assorbimento che si osservano sono quelle dell'idrogeno e del ferro.

La **metallicità del Sole** è pari ad un **1,6% della massa**.

L'**indice di metallicità** si ottiene dal rapporto Fe/H che rappresenta il logaritmo del quoziente tra l'abbondanza di metalli nella stella e l'abbondanza solare. Questa è la sua formula:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log_{10}(\text{Fe}/\text{H})_{\text{stella}} - \log_{10}(\text{Fe}/\text{H})_{\text{Sole}}$$

dove (Fe) indica il valore dell'abbondanza di ferro ed (H) quella dell'idrogeno

Per il Sole sarà $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$.

Gli oggetti con meno metalli del Sole possiedono un indice di metallicità negativo mentre gli altri oggetti ricchi in metalli possiedono un indice positivo. La scala è logaritmica, una metallicità di "-1" equivale a una abbondanza dieci volte minore a quella del Sole e un indice di valore "+1" corrisponde ad una abbondanza dieci volte maggiore.

Parametri fisici - la luminosità delle stelle

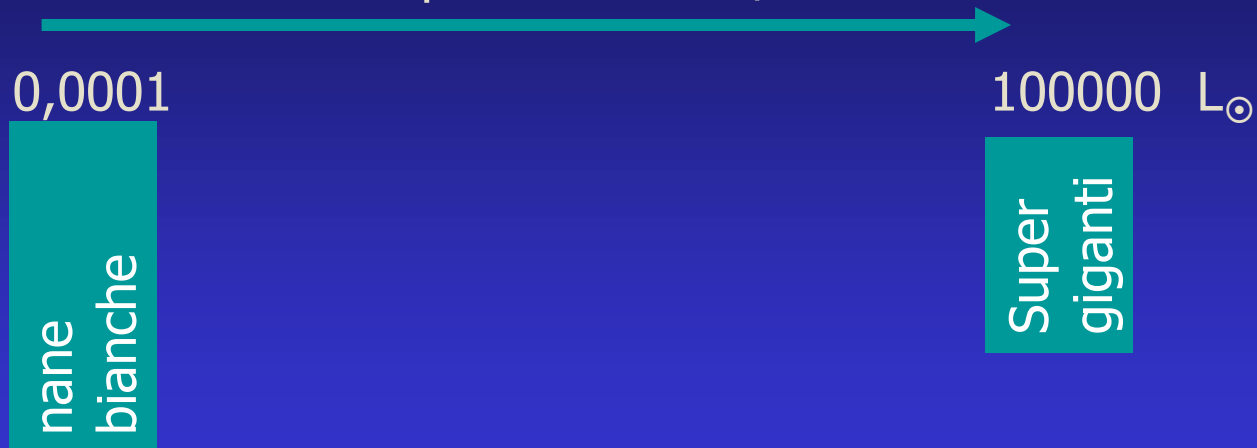
- **Luminosità (misura diretta)** = energia totale emessa dalla superficie della stella ogni secondo e si misura in Joule/sec = J/s

Nota la **luminosità del Sole**, quella delle stelle è calcolabile quando se ne conosca la magnitudine assoluta M ; operando il confronto con i rispettivi valori solari, si ottiene

$$M - M_{\odot} = -2,5 \log(L/L_{\odot})$$

con $M_{\odot} = 4,83$ (magnitudine assoluta del Sole).

NB $L_{\odot}$ è la luminosità del Sole pari a $4 \cdot 10^{26}$ J/sec



Parametri fisici – la temperatura delle stelle

- **Temperatura** (misura indiretta) = **temperatura della sua fotosfera**

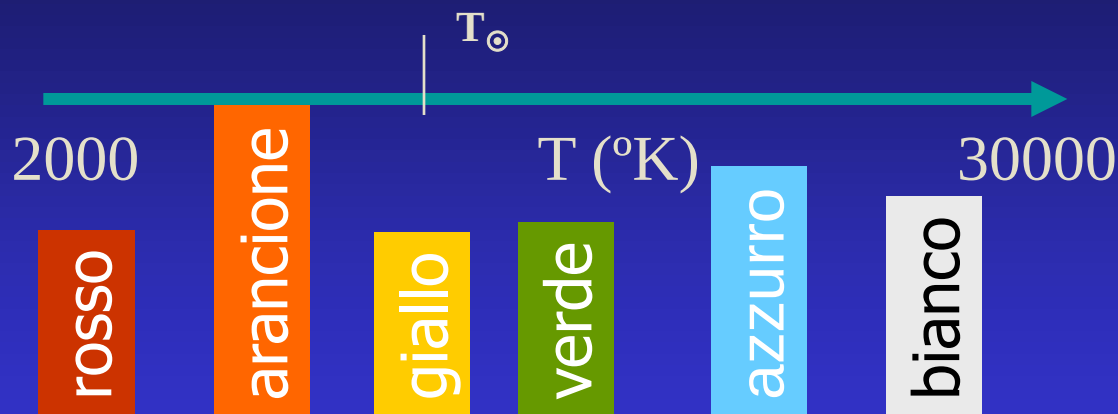
Le temperature delle stelle si distinguono in:

Temperatura effettiva (corpo nero in equilibrio termodinamico)

Temperatura di colore (in un intervallo di lunghezza d'onda-colore)

Temperatura bolometrica (su tutto lo spettro)

Temperatura di eccitazione e di ionizzazione (a seconda dei processi di formazione delle righe spettrali)



$T_{\odot}$ è la temperatura del Sole pari a 5700 $^{\circ}\text{K}$

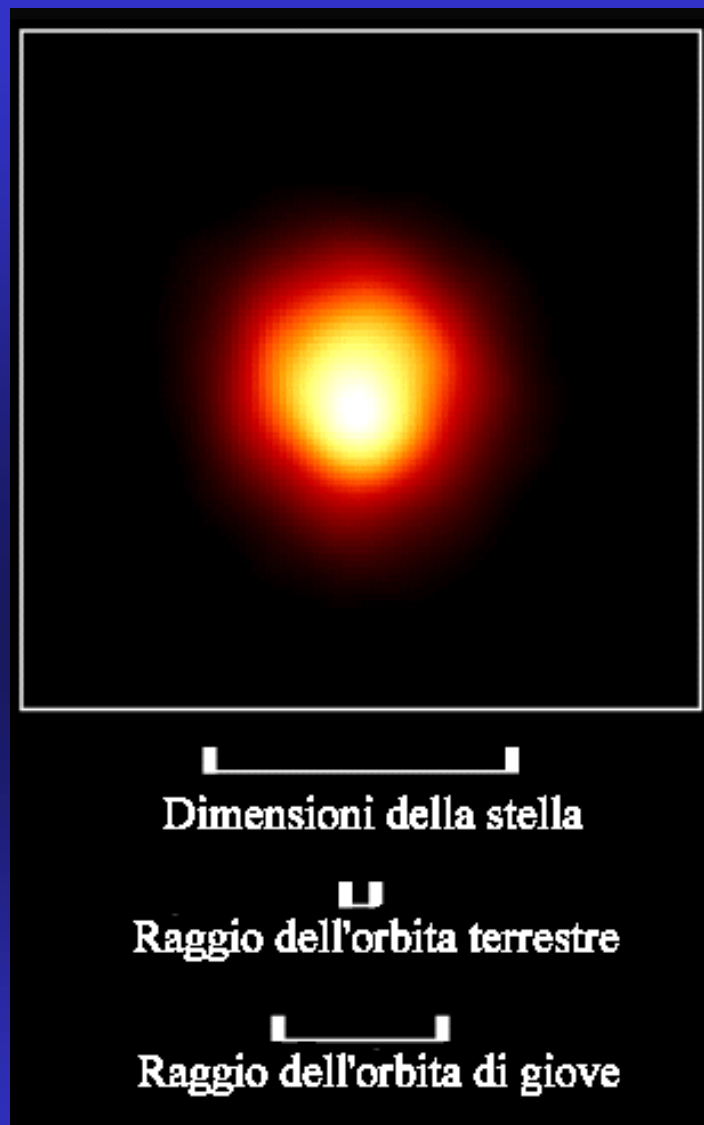
Parametri fisici – il raggio delle stelle

- **Raggio** (misura quasi sempre indiretta) = **raggio della sua fotosfera**



$R_{\odot}$ è il raggio del Sole pari a circa 700 000 Km

Raggio delle stelle-misura



- Solo in alcuni specialissimi casi e con tecniche sofisticate è possibile avere una misura diretta dei raggi stellari.
- Le osservazioni con i telescopi non permettono di osservare il disco stellare: le stelle, per quanto siano potenti i telescopi, appaiono quasi sempre puntiformi.
- Alcune eccezioni: Betelgeuse figura a lato

Betelgeuse

Raggio temperatura e luminosità

La legge di Stefan-Boltzmann (corpo nero-equilibrio termodinamico) risulta particolarmente utile per calcolare la quantità di energia emessa nell'unità di tempo da un corpo, di cui si conosca la superficie.

Tale quantità prende il nome di luminosità L .

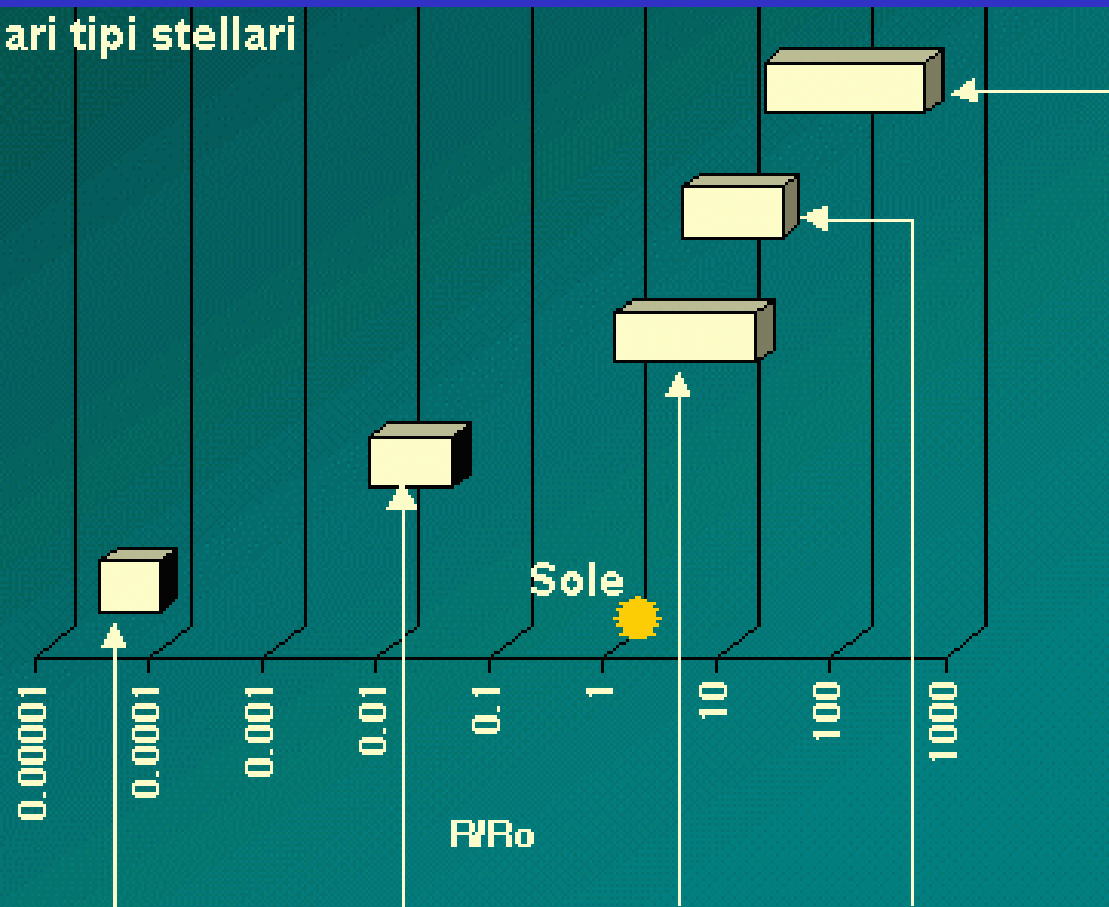
Per un corpo nero di forma sferica con raggio R , che si trovi alla temperatura T , la luminosità vale

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ J}/(\text{m}^2 \text{T}^4 \text{s})$$

Raggio delle stelle-misura

Raggi dei vari tipi stellari



	Stelle di Neutroni	Nane Bianche	Nane	Giganti	Supergiganti
R(max)	0.00007	0.03	17	25	500
R(min)	0.00003	0.007	0.12	3.9	20

Parametri fisici- la massa delle stelle

➤ Massa (misura indiretta)

La massa di una stella coincide con la massa di tutta la materia da cui essa risulta composta



$M_{\odot}$ è la massa del Sole pari a $2 \cdot 10^{30}$ Kg

1. La massa delle stelle è misurabile direttamente per i sistemi binari
2. La relazione massa-luminosità permette una stima indiretta della massa (vedi in seguito stelle binarie)

Popolazioni stellari

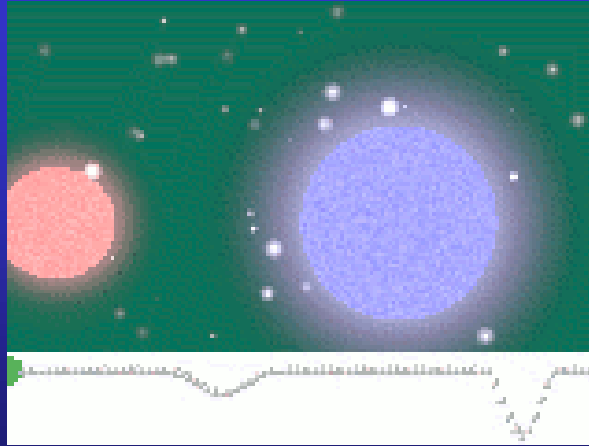
Le osservazioni portano, dunque, ad individuare popolazioni stellari diverse, caratterizzate dal diverso contenuto di metalli.

Gli astronomi chiamano stelle di **Popolazione I** le stelle appartenenti agli ammassi aperti, ricche di metalli (circa il 2% della massa stellare) –popolazione del disco galattico

Stelle di **Popolazione II** quelle appartenenti agli ammassi globulari, povere di metalli (circa lo 0,2% della massa stellare)-popolazione dell'alone galattico

Sistemi Binari

Sistemi binari



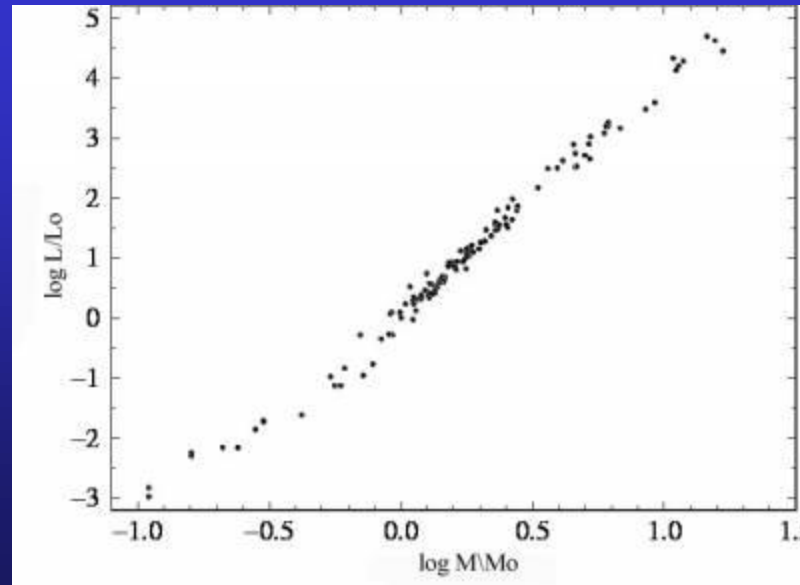
Un primo livello di aggregazione, nel quale si trova circa il 70% delle stelle, è costituito **sistemi dai binari o stelle doppie**.

Si tratta di stelle che all'occhio nudo appaiono singole, ma che con l'ingrandimento di un telescopio (**binarie visuali**) o con l'osservazione fotoelettrica (**binarie fotometriche o ad eclisse**) o spettroscopica (**binarie spettroscopiche**), appaiono formate da due componenti stellari vicine, a pochi secondi d'arco l'una dall'altra.

Un sistema binario è costituito da due stelle che percorrono ciascuna un'orbita ellittica intorno al comune baricentro, per effetto della mutua attrazione gravitazionale, secondo le leggi della meccanica Newtoniana.

Il periodo di rivoluzione è tanto maggiore quanto maggiore è la distanza tra le due componenti e viceversa, come risulta dalla terza legge di Keplero.

Relazione massa luminosità e stelle binarie



Utilizzando le stelle binarie, che fortunatamente sono numerose, e la terza legge di Keplero gli astronomi hanno determinato empiricamente una relazione che lega la massa e luminosità di una stella.

Se L ed M rappresentano rispettivamente la massa e la luminosità di una stella, espresse in unità solari, valgono le seguenti relazioni:

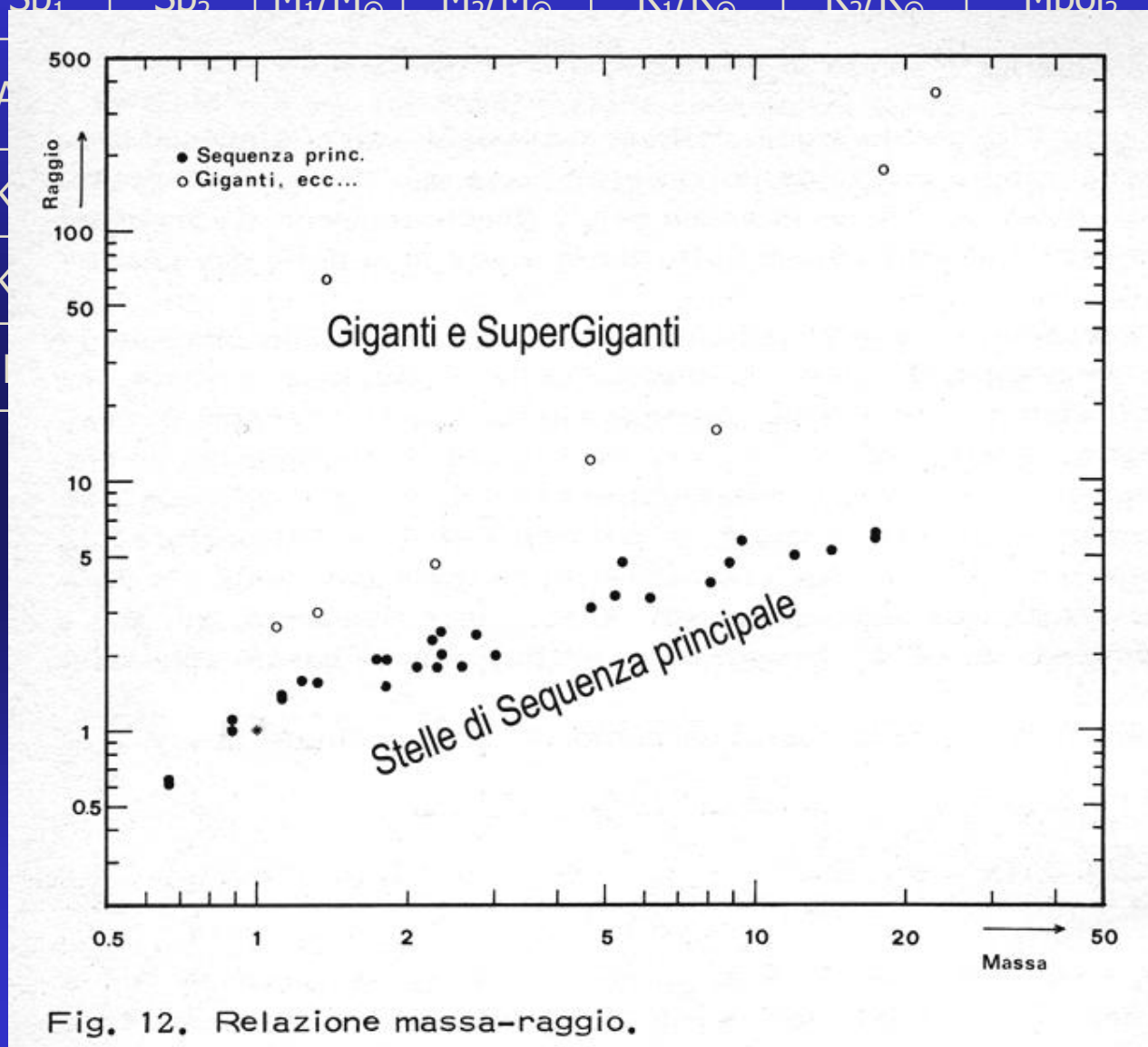
1. per le stelle di piccola massa, $M \leq 0,5$ $L = M^{2.5}$
2. per le stelle di massa intermedia, $0,5 < M \leq 3$ $L = M^3$
3. per le stelle di grande massa, $M > 3$ $L = M^4$

In media si può assumere $L = M^3$.

Le relazioni forniscono unicamente una stima della massa e sono valide per la sequenza principale

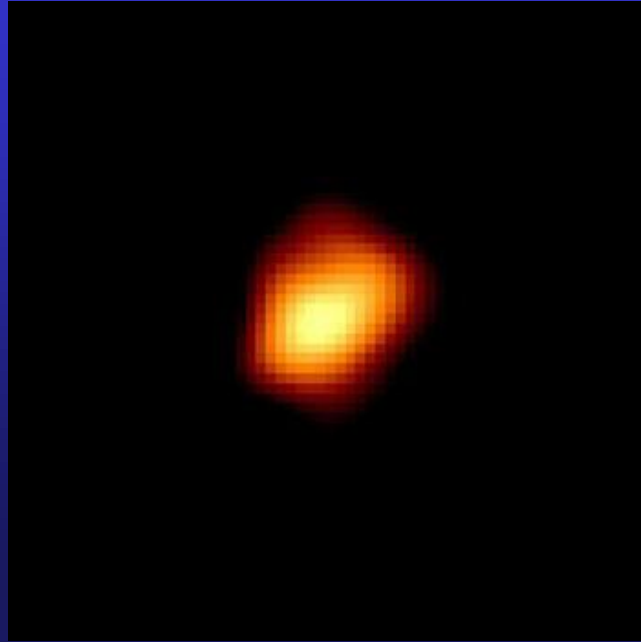
Binarie ad eclisse-Giganti e supergiganti

	Sp_1	Sp_2	$M_1/M_\odot$	$M_2/M_\odot$	$R_1/R_\odot$	$R_2/R_\odot$	$Mbol_2$	$Mbol_1$
V365 Sgr	A							-3,9
ζ Aur	K							...
31 Cyg	K							-3,8
32 Cyg	F							-3,4



Stelle variabili

Stelle variabili introduzione



La stella variabile
Mira osservata da
HST

Le stelle variabili mostrano variazioni di luminosità fino ad una decina di magnitudini stimato dalla loro **variabilità fotometrica**

con cambiamenti nello spettro e variazioni di velocità radiali

Le variazioni di luminosità presentano variazioni da qualche ora a qualche anno

Alcune hanno lunghi intervalli di quiescenza e poi riprendono a variare

La prima variabile fu osservata da Fabricius nel 1596 ed la stella α Cet da lui denominata "Mira" (meravigliosa straordinaria)

Stelle variabili

I nomi delle stelle variabili sono stati fissati da Argekländer verso la metà del XIX secolo

Il nome è costituito da una lettera maiuscola da R a Z o da una coppia di lettere maiuscole seguito dal nome (abbreviato) della costellazione.

Quando il numero delle lettere, sia singole che doppie, è finito si impiega un numero da 335 in poi (es: R Lyr, DQ Her, V 335 Aql)

Vanno ovviamente distinte dalle variabili propriamente dette le binarie ad eclisse di cui bisogna riconoscere il carattere di sistema binario o come binarie visuali o come binarie spettro-fotometriche

Le variabili mostrano delle curve di luce che possono essere sovrapposte mostrando, oppure no, il carattere di periodicità delle stesse.

Stelle variabili-Tipologia

Le variabili sono stelle la cui luminosità varia effettivamente, cioè la stella stessa diventa più o meno luminosa.

Alcune (NB solo alcune) di queste si raggruppano nei seguenti tipi:

Variabili di tipo Mira

Variabili Cefeidi

Variabili RR Lyrae

Variabili Alpha Cygni

Variabili Delta Scuti

Variabili S Doradus

Variabili eruttive

Variabili cataclismatiche

Etc...

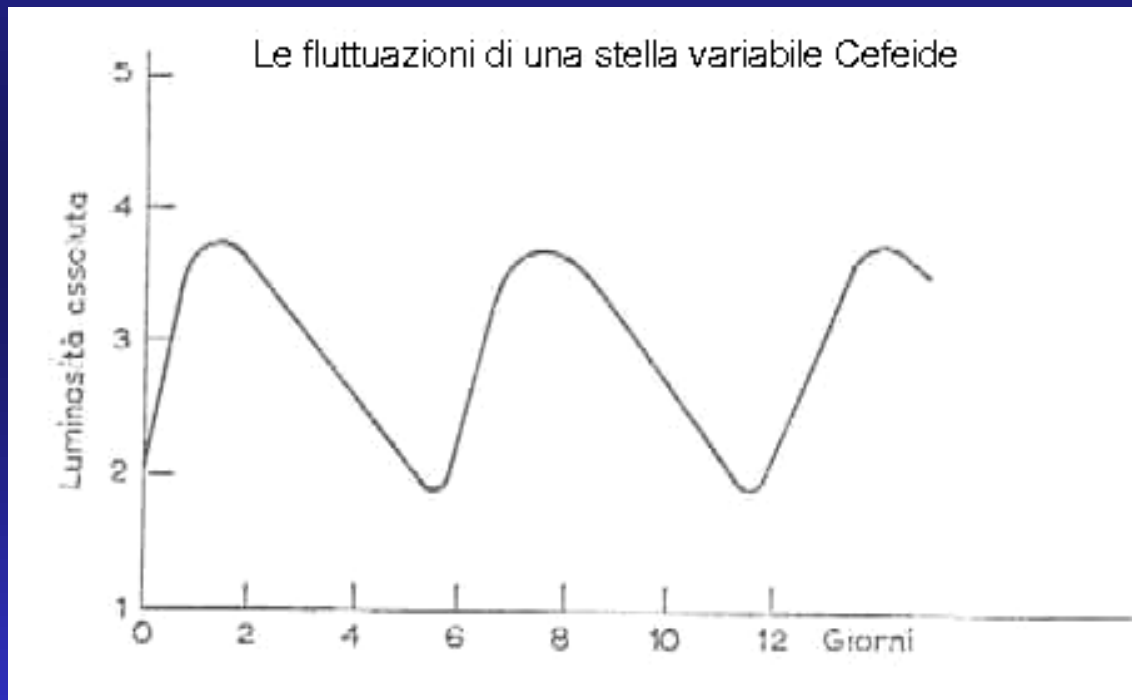
Stelle Novae

Supernovae

Cefeidi classiche-curve di luce

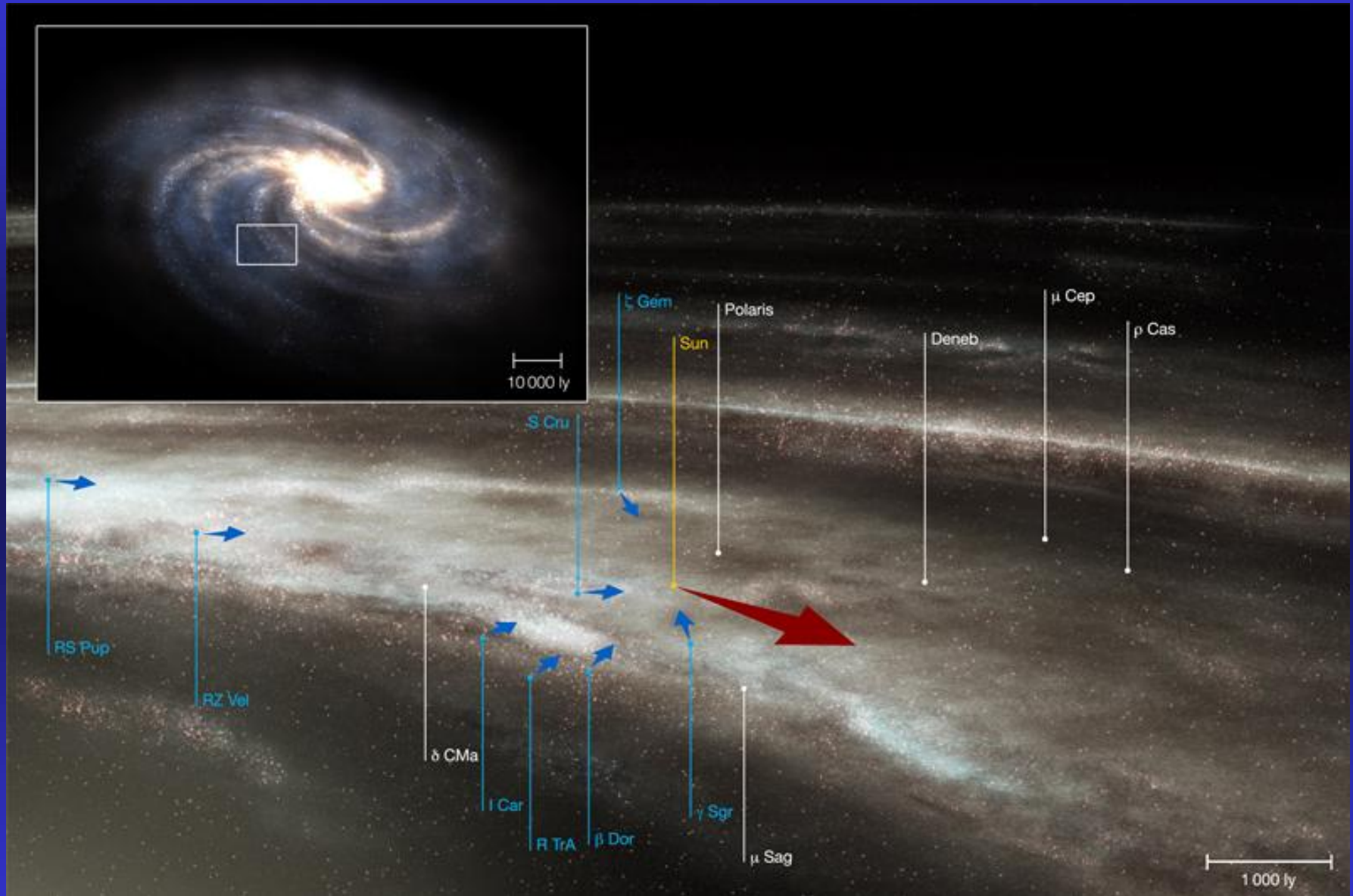
Le cefeidi sono stelle supergiganti di Popolazione I (stelle di disco) con tipi spettrali F-K

Hanno una curva di luce regolare con un rapido incremento di luminosità seguito da un lento declino

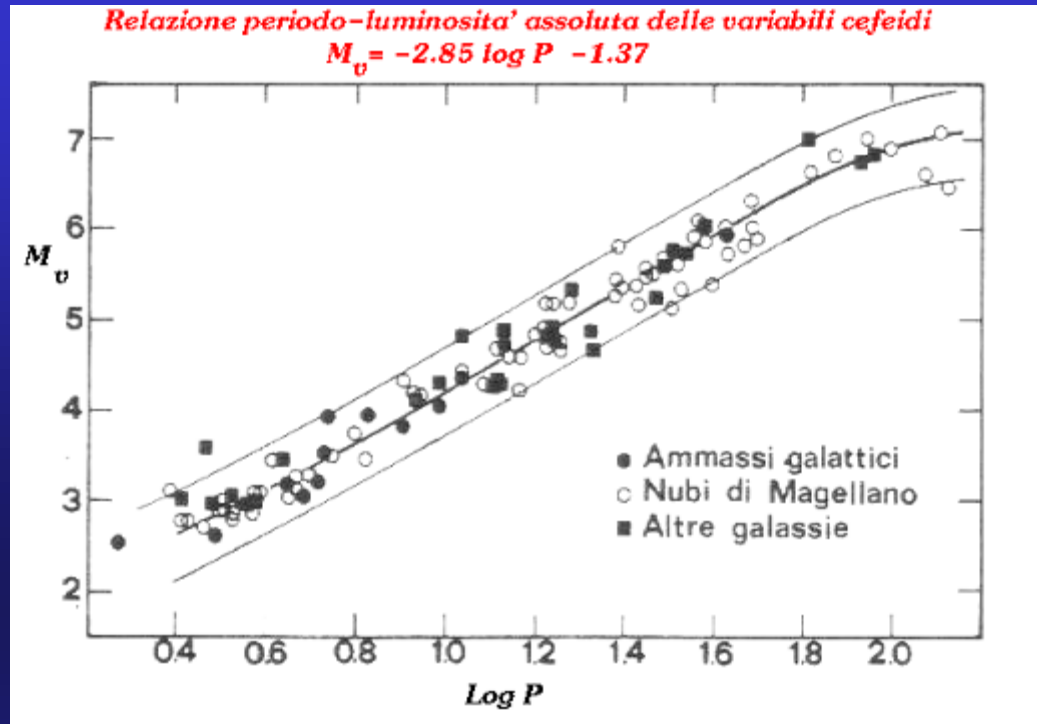


La variazione di luminosità è interpretata come una sequenza di pulsazioni radiali che interessa la materia compresa tra 0,8 ed 1 raggio stellare

Le Cefeidi nei dintorni del Sole



Relazione periodo luminosità

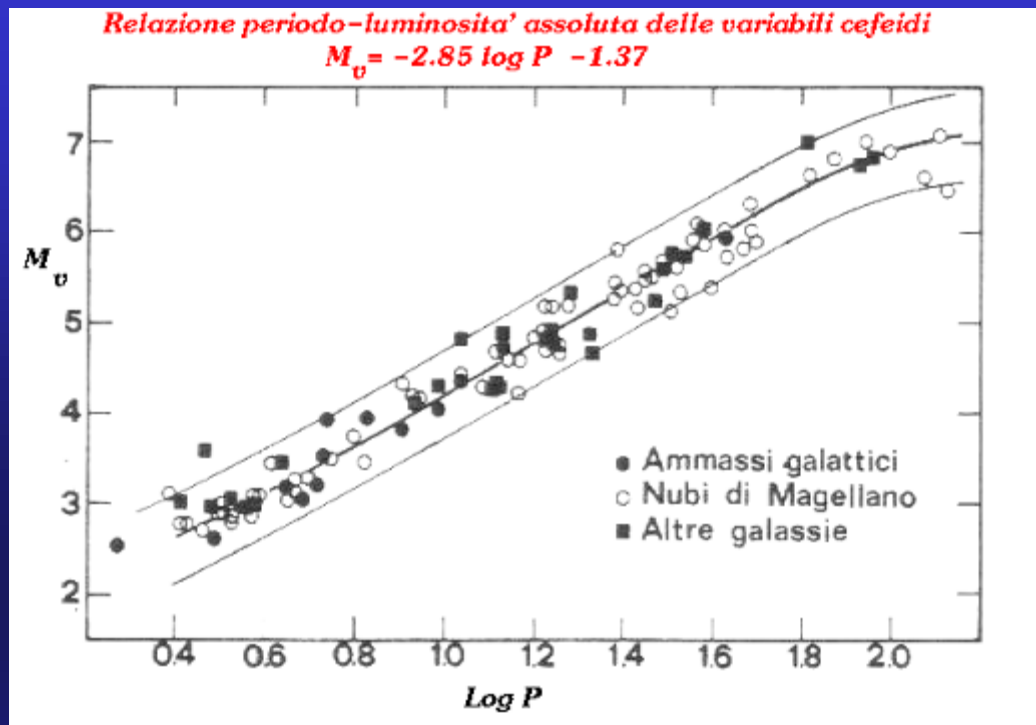


Le variabili Cefeidi sono stelle pulsanti con periodi che vanno da 2 a 40 giorni. La signora Leavitt nel 1912 trovò, dopo avere effettuato centinaia di misure delle variabili Cefeidi nelle nubi di Magellano, una relazione tra il periodo P e la magnitudine assoluta M_v .

$$M_v = -2.85 \log P - 1.37$$

Da notare che le **Cefeidi classiche** sono stelle di Pop I mentre le **Cefeidi W Virginis** in tutto identiche alle altre salvo la variazione di luminosità (1,5 magnitudini più deboli delle "classiche") sono stelle di Pop II

Cefeidi come candele standard



In altri termini le Cefeidi più brillanti variano di luminosità più di quelle meno brillanti e quindi è possibile risalire dal periodo di variabilità alla magnitudine assoluta. Dal momento che la magnitudine apparente è sempre disponibile viene ad essere noto immediatamente il modulo di distanza e quindi la distanza stessa. Per questo motivo le Cefeidi sono dette indicatori di distanza o candele standard.

Classificazione delle stelle

Classificazione spettrale di Harvard 1

La classificazione spettrale di Harvard è un completamento di quello di padre Secchi della metà del XIX secolo

Si usano le lettere

O-B-A-F-G-K-M-L-T

Che formano una sequenza corrispondente alle temperature superficiali delle stelle da 35000 °K a 3000 °K

Classificazione spettrale di Harvard 2

NB ionizzazione HI = idrogeno neutro

HII = idrogeno una volta ionizzato, ha perso il suo elettrone

O stelle blu $T=20000-35000$ °K righe di ionizzazione multipla di He II , CIII , NIII , Si V , sono visibili le righe di HeI deboli le righe di HI

B stelle blu-bianche $T=15000$ °K spariscono le righe di HeII , si rinforzano quelle di HeI , con le B3 diventa visibile la riga K del Ca II diventano più forti le righe di HI , visibili quelle di OII , SiII e MgII

A stelle bianche $T=9000$ °K massima intensità delle righe di HI si rinforzano le righe H e K del CaII , spariscono quelle dell' HeI

F stelle giallo-bianche $T=7000$ °K Si indeboliscono le righe HI , diventano sempre più forti le righe H e K del CaII , emergono le righe dei metalli FeI , FeII , CrII e TiII

G stelle gialle $T=5500$ °K si indeboliscono ulteriormente le righe HI , molto forti H e K del CaII , si rinforzano le righe dei metalli ed appaiono nelle giganti le linee CN

K stelle arancio-giallo $T=4000$ °K le righe metalliche dominano lo spettro iniziano ad essere visibili le bande molecolari TiO

Classificazione spettrale di Harvard 3

M stelle rosse $T=3000\text{ }^{\circ}\text{K}$ la banda del TiO si rinforza diventa molto forte la riga del CaI a $422,7\text{ nm}$ ed appaiono molte righe di metalli neutri

L stelle marroni (nane rosse) $T=2000\text{ }^{\circ}\text{K}$ scompaiono le righe degli ossidi TiO e VO e compaiono righe molto larghe del sodio NaI

T Nane brune $T=1000^{\circ}\text{ K}$ dominano le bande molecolari di assorbimento di CH_4 ed H_2O

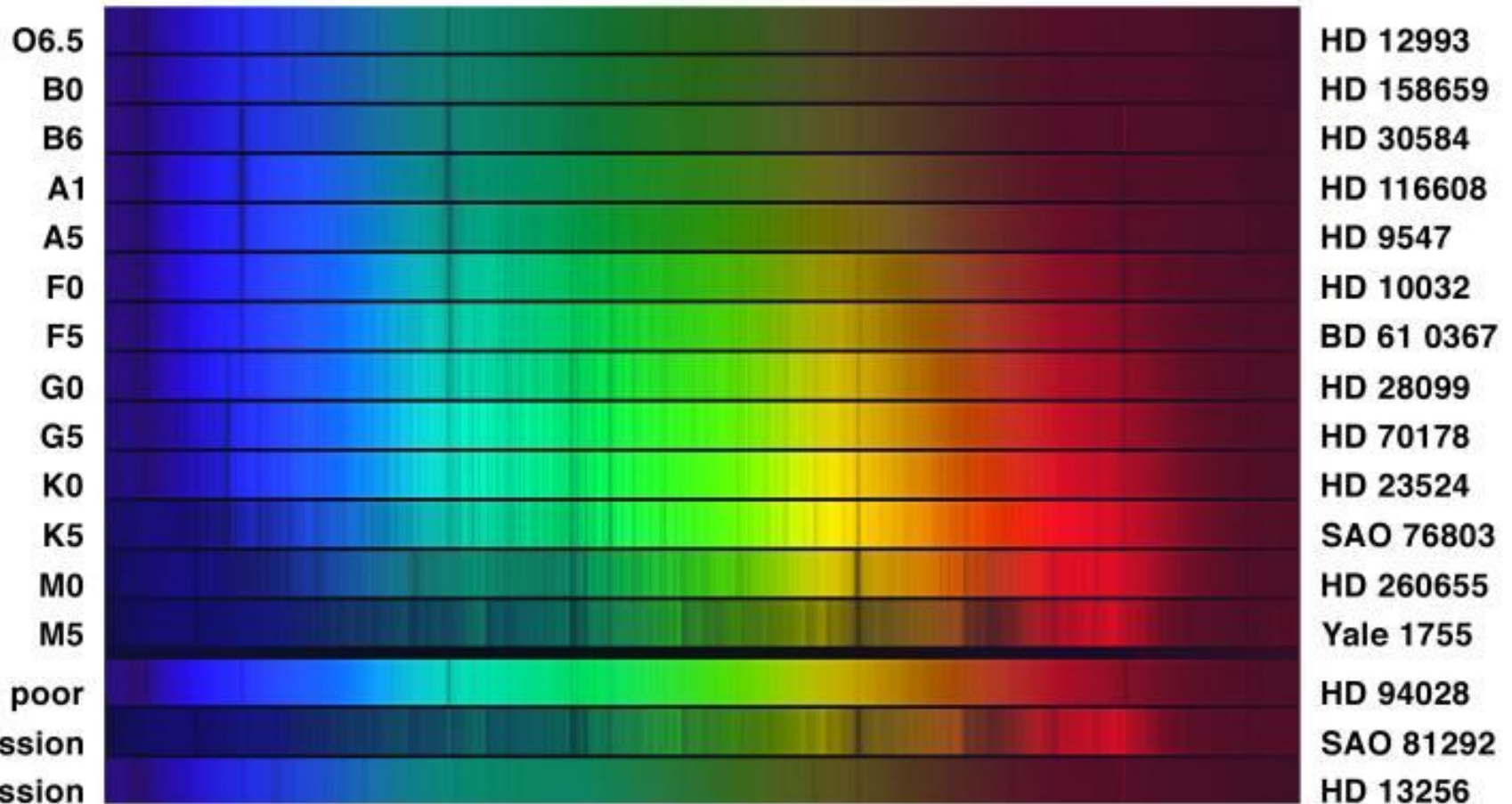
Altre classi

C Stelle al carbonio stelle rosse con $T=3000\text{ }^{\circ}\text{K}$ forti bande metalliche ed inoltre componenti del carbonio C_2 , CN e CH non ci sono le bande molecolari dell'ossido di Titanio TiO

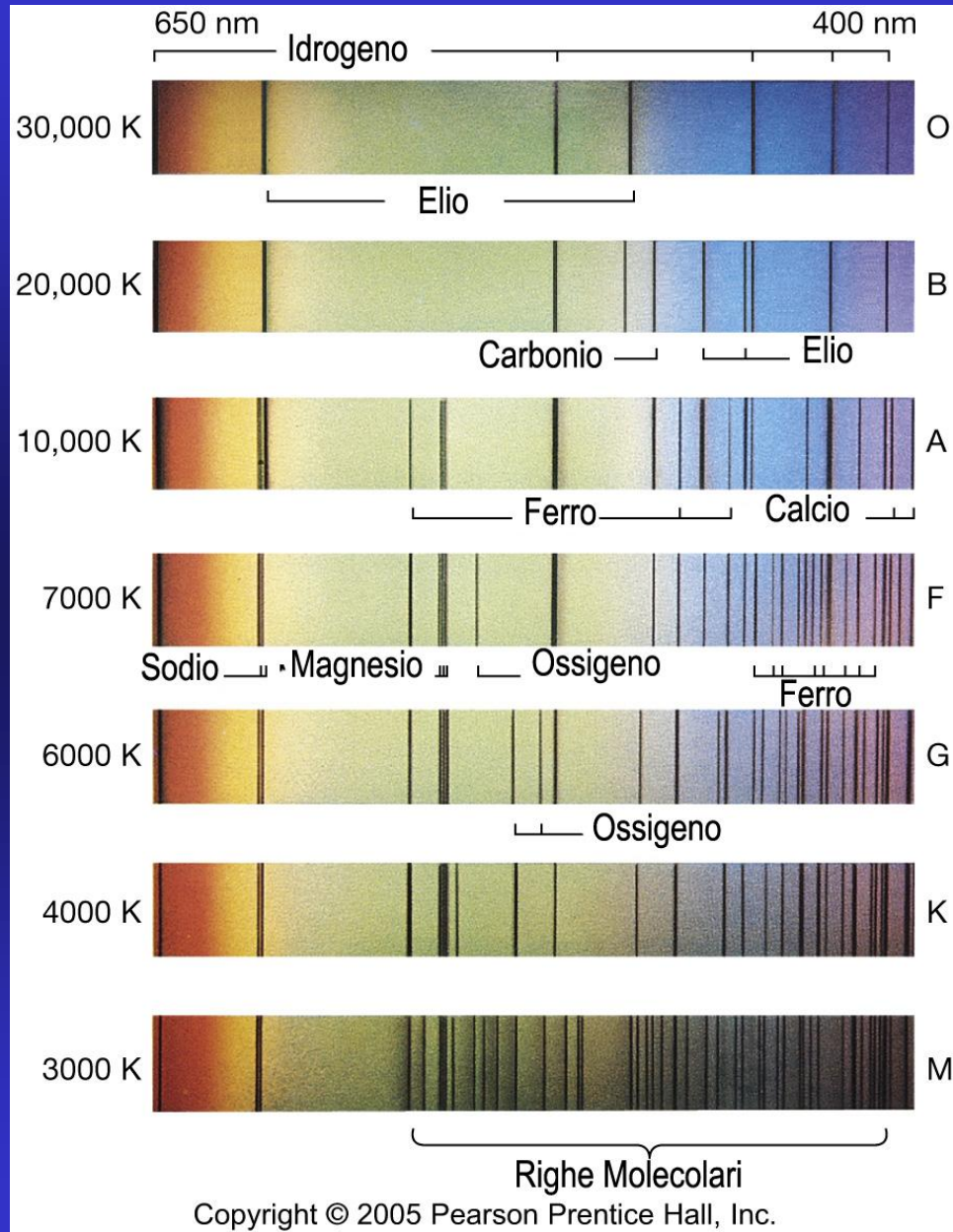
P nebulose planetarie

D nane bianche

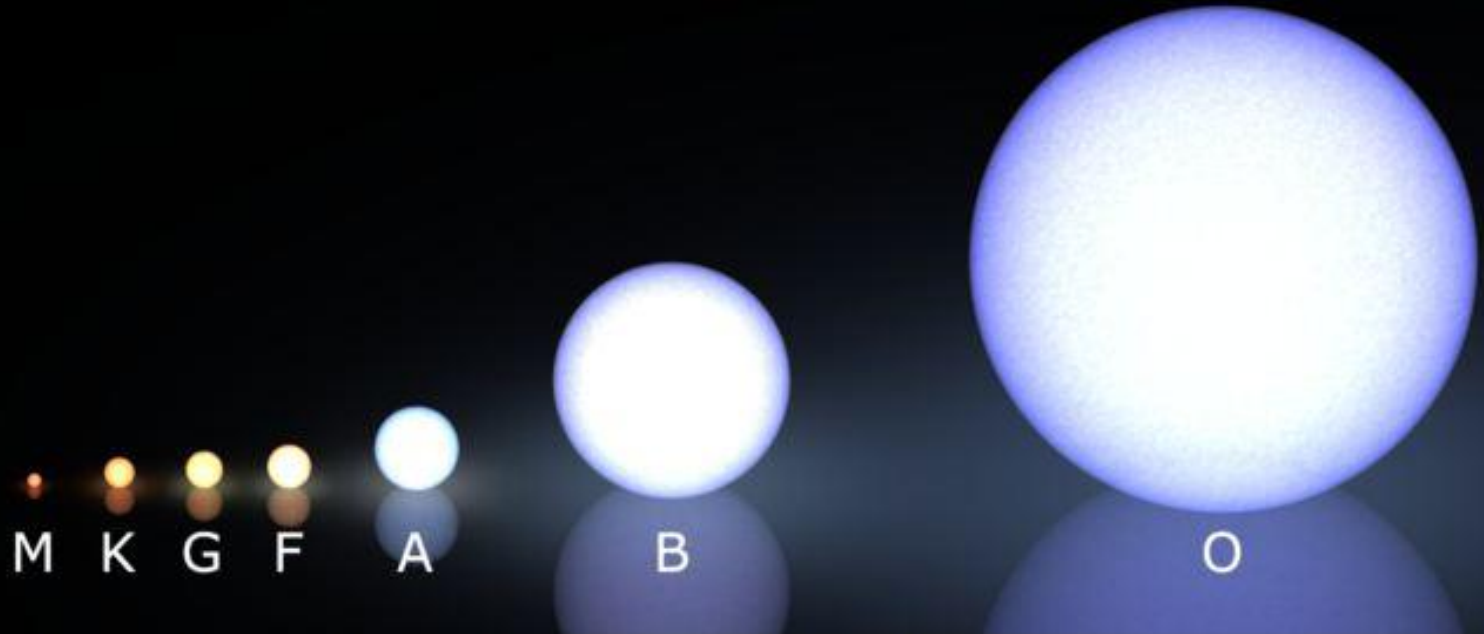
Classificazione spettrale



Classificazione spettrale di Harvard 4



Classificazione spettrale di Harvard



Tipo spettrale	Temperatura	Colore	Massa	Raggio	Luminosità
O	28000-5000 K	Azzurro	60	15	140000
B	9600-28000 K	Celeste	18	7	20000
A	7100-9600 K	Bianco	3,1	2,1	80
F	5700-7100 K	Bianco + giallo	1,7	1,3	6
G	4600-5700 K	Giallo	1,1	1,1	1,2
K	3200-4600 K	Arancione	0,8	0,9	0,4
M	1700-3200 K	Rosso	0,3	0,4	0,04

Atmosfere stellari

Problema molto, molto complicato

Atmosfera → tutto ciò che è oltre la fotosfera stellare (?)

Nell'atmosfera stellare si trovano radiazione e particelle cariche (elettroni)

Processi tra radiazione e particelle (elettroni) che dipendono dalla **opacità** $\kappa = \kappa(\nu)$:

1. Diffusione (scattering)
2. Assorbimento (con e senza urti)
3. Emissione (con e senza urti)

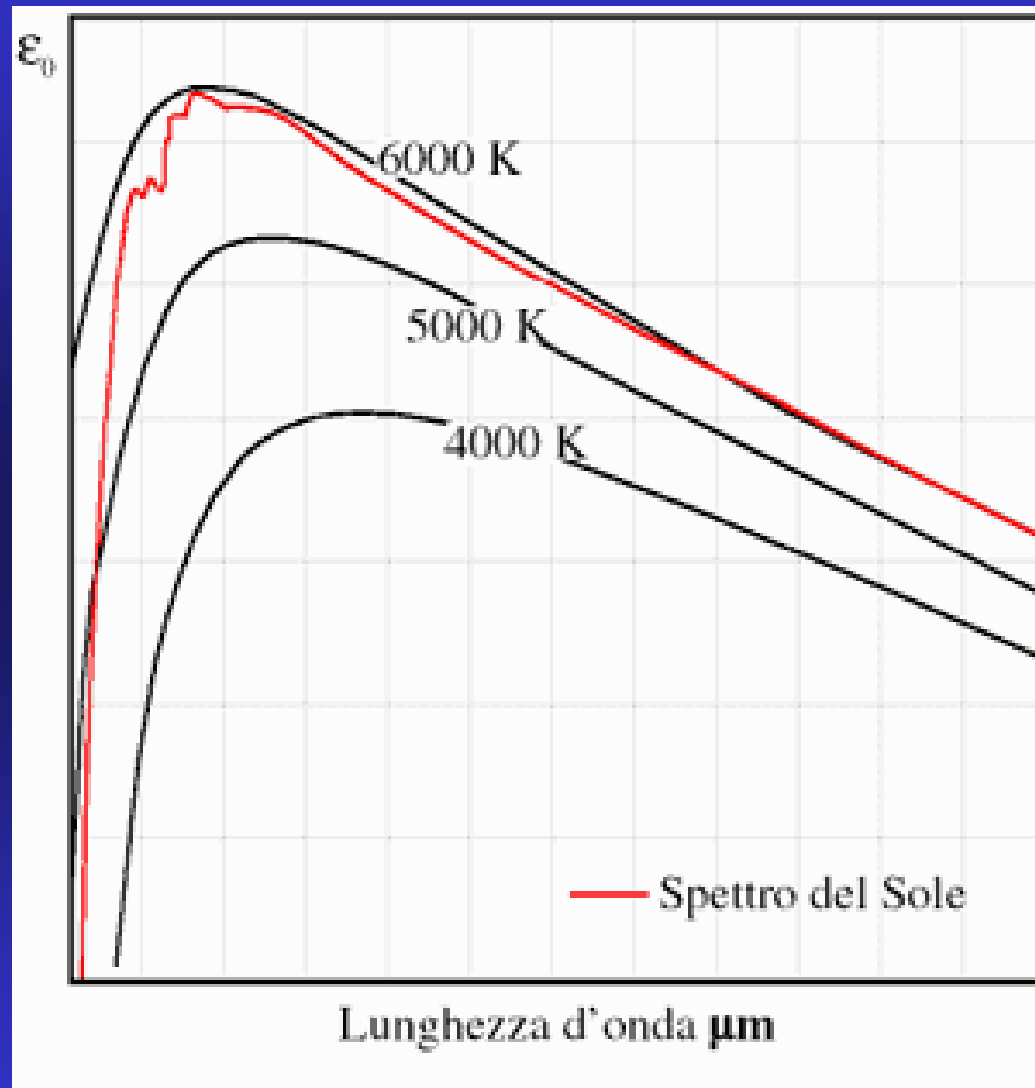
Formazione delle righe spettrali (di assorbimento) di una stella

Si descrivono con **l'equazione del trasporto radiativo** zona per zona (in altezza) e per ogni frequenza (ν) nella condizione di **Equilibrio Termodinamico Locale**

NB la condizione di Equilibrio termodinamico NON vale su tutta l'atmosfera se non si avrebbe alcun flusso di radiazione

Stabilità dell'atmosfera: in realtà l'atmosfera stellare NON è stabile ma presenta instabilità convettive per cui si hanno moti di bolle di plasma di diverse dimensioni in differenti direzioni

Spettro di corpo nero ed emissione del Sole



Classificazione spettrale MKK

Stelle di sequenza principale

Differenziano le stelle delle precedenti classi spettrali in 6 differenti classi di luminosità

Ia le più luminose supergiganti

Ib le meno luminose supergiganti

II le giganti luminose

III le giganti normali

IV le subgiganti

V stelle normali (nane) che vengono chiamate Stelle di Sequenza principale

Diagramma HR

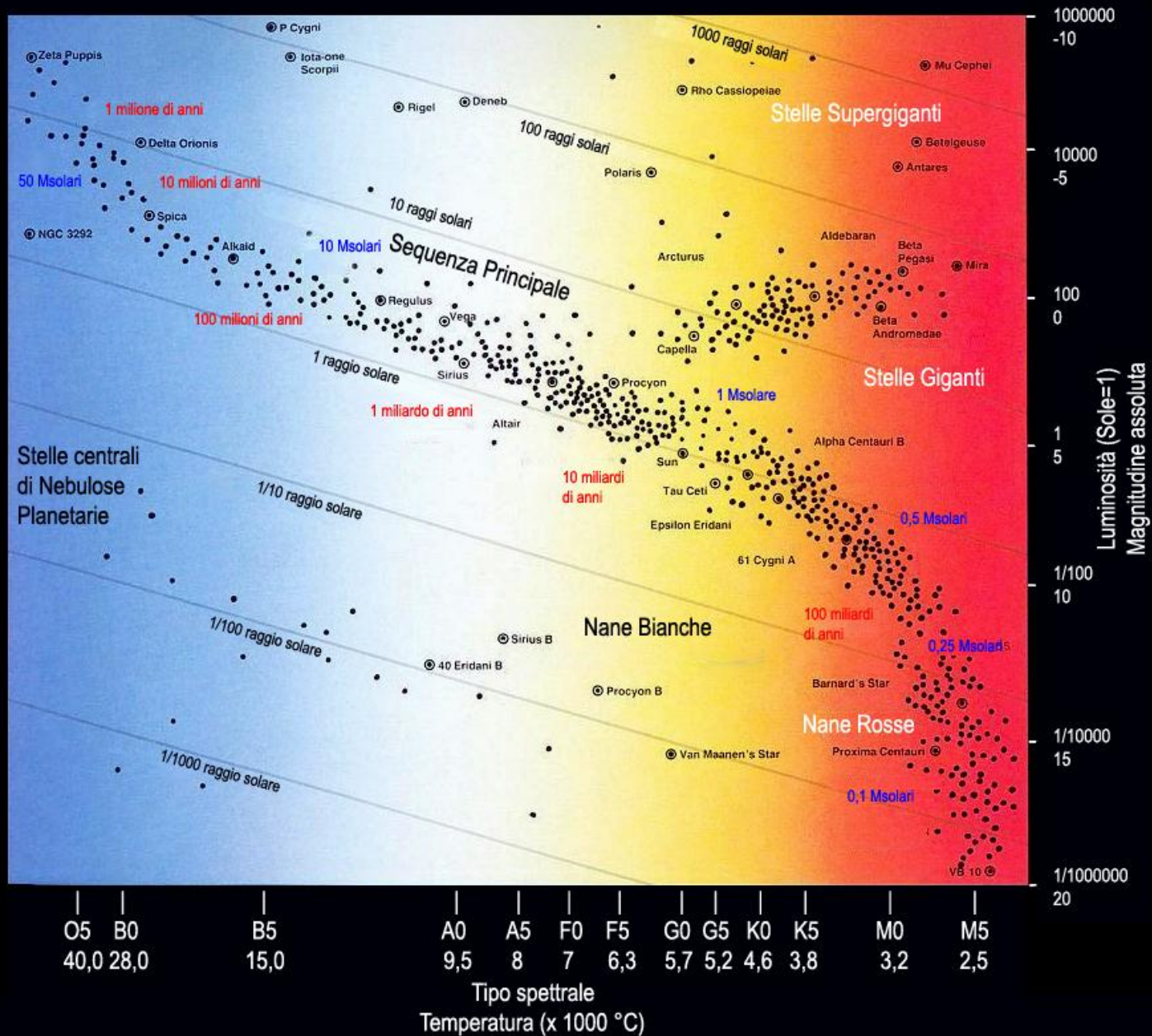
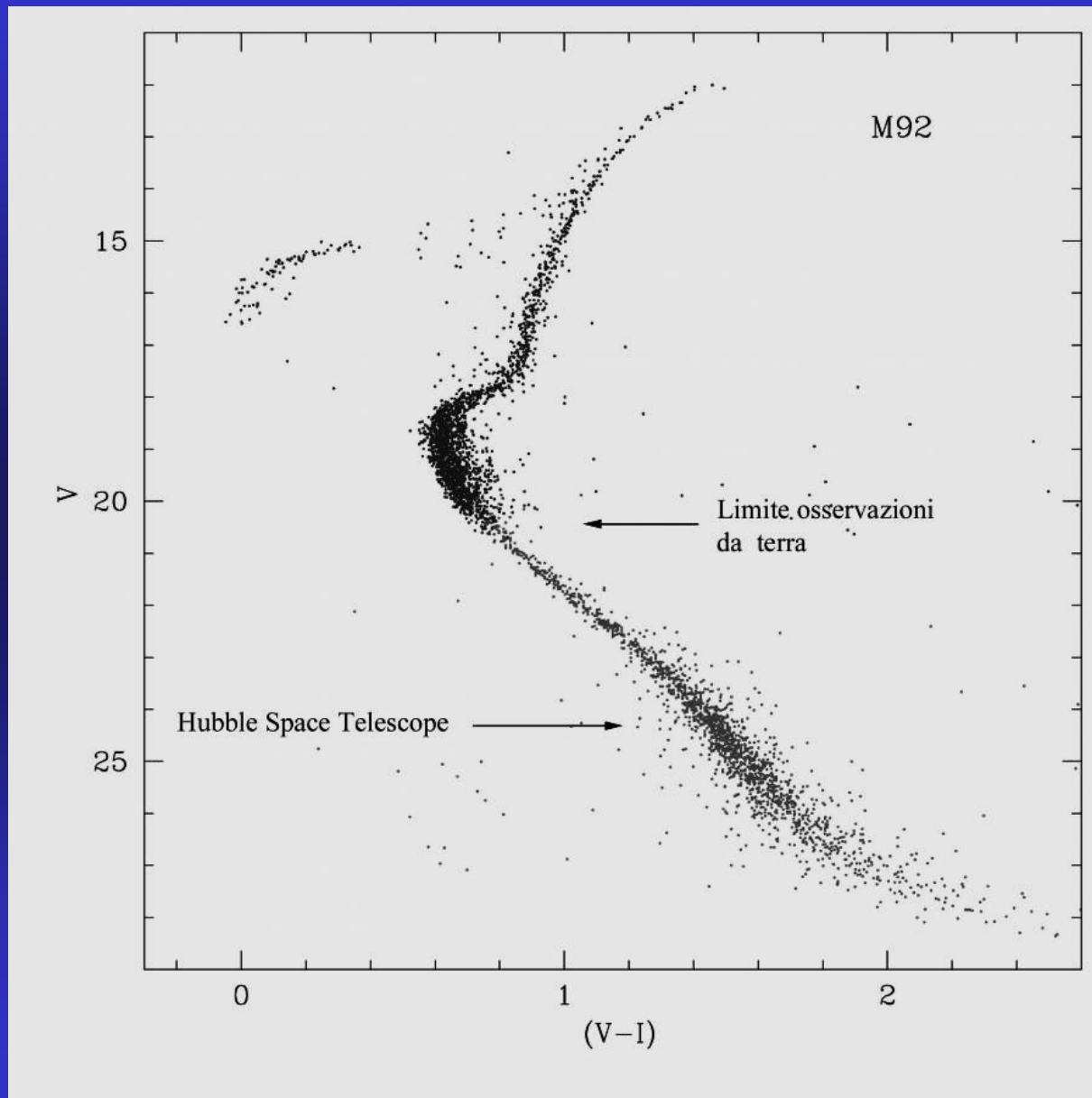
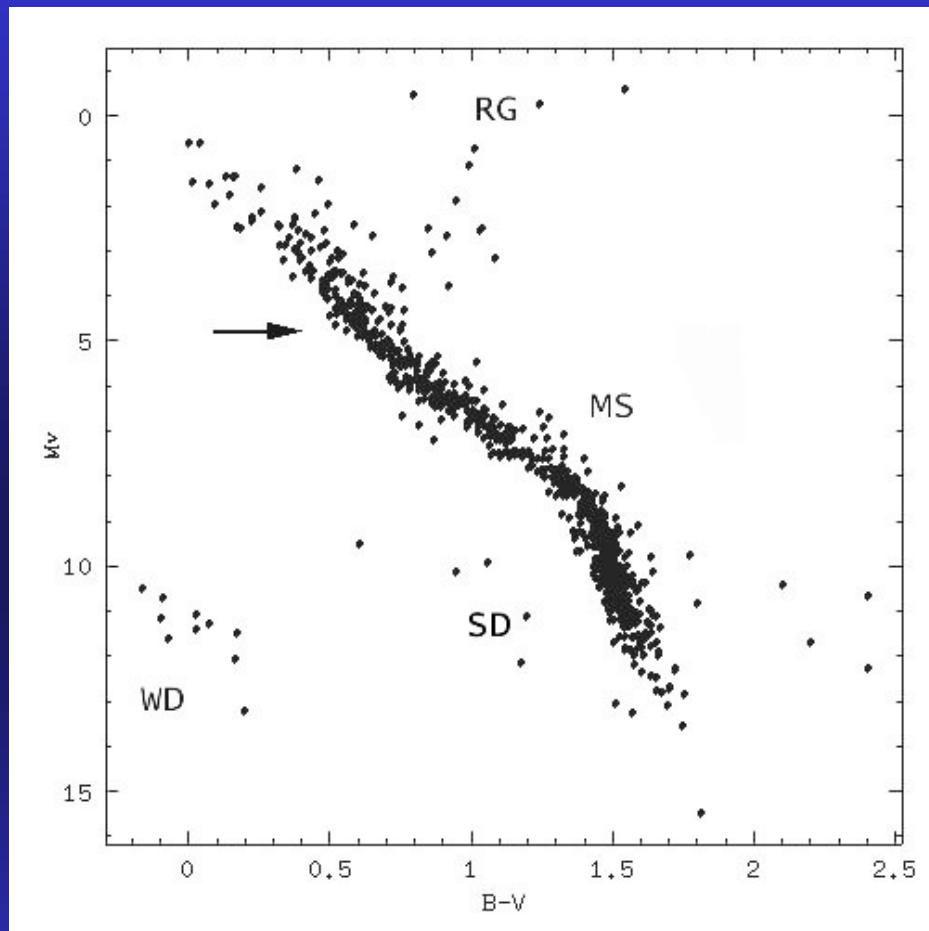


Diagramma HR di M92 (Ammasso Globulare)

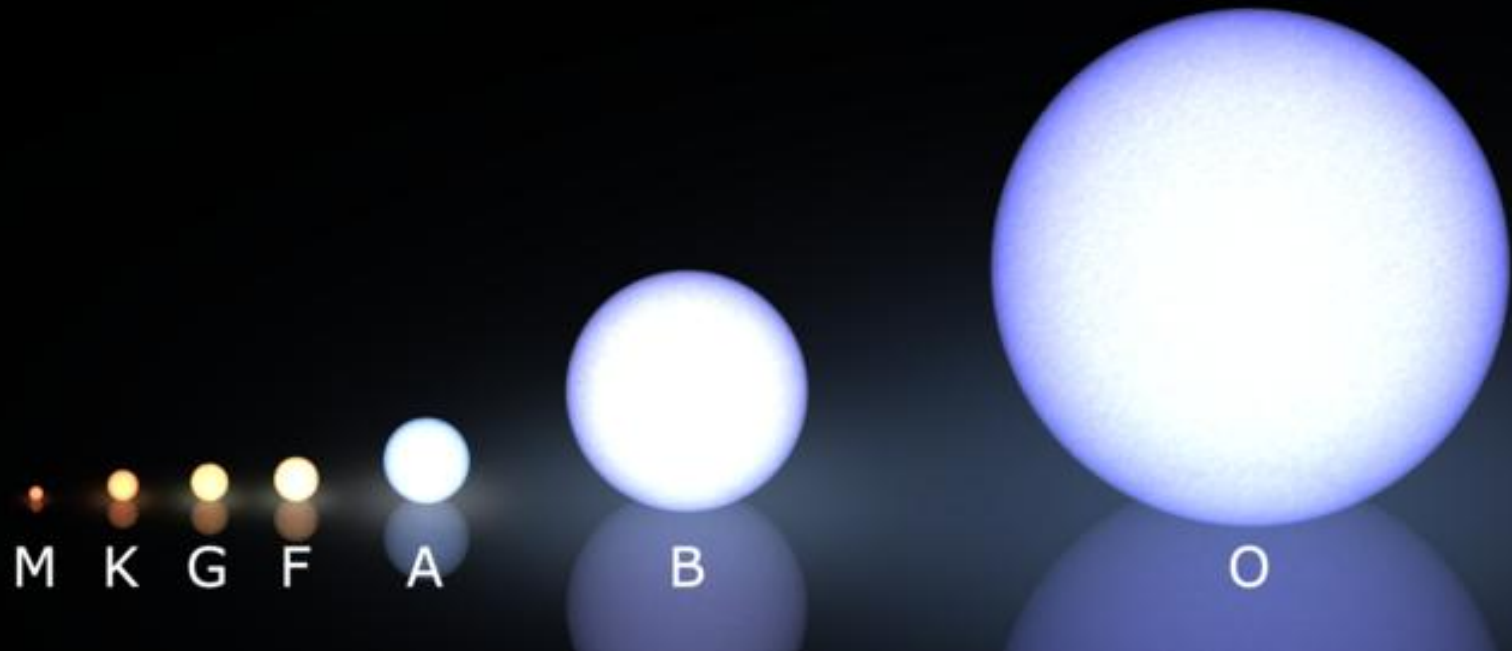


Classificazione spettrale per le stelle con $d < 20$ pc



Magnitudini visuali assolute M_V in funzione del colore $B-V$ per stelle con distanza dal Sole minore di 20 pc, con parallassi trigonometricamente dal satellite astrometrico Hipparcos. La freccia indica la magnitudine assoluta del Sole ($M_V=4,8$). Luminosità e temperatura delle sorgenti decrescono all'aumentare, rispettivamente, di M_V e $B-V$.

Classificazione spettrale e dimensioni delle stelle



Classificazione spettrale-proprietà

Classe	Temp(K)	Colore	Colore apparen te	Massa (M _☉)	Raggio (R _☉)	Luminosità (bolometrica)	Linee Idrogeno	Frazione di tutte le stelle in sequenza principale
O	≥ 33000 K	Blu	Blu	≥ 16 M	≥ 6,6 R	≥ 30000 L	Debole	~0,00003%
B	10000– 33000 K	Blu Bianco Blu	Blu bianco	2,1–16 M	1,8–6,6 R	25–30000 L	Media	0,13%
A	7500– 10000 K	Bianco	Da bianco a blu	1,4–2,1 M	1,4–1,8 R	5–25 L	Forte	0,6%
F	6000– 7500 K	Giallo Bianco	Bianco	1,04–1,4 M	1,15–1,4 R	1,5–5 L	Media	3%
G	5200– 6000 K	Giallo	Giallo bianco	0,8–1,04 M	0,96– 1,15 R	0,6–1,5 L	Debole	7,6%
K	3700– 5200 K	Aranci o	Giallo arancio	0,45–0,8 M	0,7–0,96 R	0,08–0,6 L	Molto debole	12,1%
M	≤ 3700 K	Rosso	Arancio rosso	≤ 0,45 M	≤ 0,7 R	≤ 0,08 L	Molto debole	76,45%

Stelle di sequenza principale

Tipo	Temp. Sup	Raggio (Sole=1)	Massa (Sole=1)	M ass (Visual)	Luminosità (bol) (Sole=1)	Zona abit (UA)	Tempo di vita (Ma)	Abbondanza (% su tutte le stelle)
O3	53 000K	15	120	-6,0	1 400 000	1200	2	0,00001%
O5	45 000K	12	60	-5,7	790 000	890	3	
O8	35 000K	8,5	23	-4,9	170 000	410	6	
B0	30 000K	7,4	17	-4,0	50 000	220	9	0,1%
B3	19 000K	4,8	7,6	-1,6	1900	44	30	
B5	15 000K	3,9	5,9	-1,2	830	29	50	
B8	12 000K	3,0	3,8	-0,2	180	13	150	
A0	9 500K	2,4	2,9	+0,6	54	7,3	300	0,7%
A5	8 200K	1,7	2,0	+1,9	14	3,7	1 000	
F0	7 200K	1,5	1,6	+2,7	6,5	2,5	1 900	2%
F5	6 400K	1,3	1,3	+3,5	3,2	1,8	3 200	
G0	6 000K	1,1	1,05	+4,4	1,5	1,2	8 000	3,5%
G2	5 800K	1,0	1,00	+4,8	1,0	1,0	10 000	
G5	5 700K	0,92	0,92	+5,1	0,79	0,89	12 000	
K0	5 200K	0,85	0,79	+5,9	0,42	0,65	22 000	8%
K5	4 300K	0,72	0,67	+7,4	0,15	0,39	45 000	
M0	3 800K	0,60	0,51	+8,8	0,08	0,28	68 000	80%
M5	3 200K	0,27	0,21	+12,3	0,011	0,10	200 000	
M8	2 600K	0,15	0,06	+16,0	0,001	0,03	700 000	

Stelle giganti

Tipo	Temp. Sup	Raggio (Sole=1)	Massa (Sole=1)	M ass (Visual)	Luminosità (bol) (Sole=1)	Zona abit (UA)
B0	29 000K	15	20	-5,1	1 100 000	1000
B5	15 000K	8	7	-2,2	1800	42
A0	10 000K	5	4	+0,0	110	11
F0	7 200K	5	2	+0,5	60	7,7
G0	5 800K	6	1,0	+1,0	34	5.8
G5	5 100K	10	1,1	+0,9	43	6.6
K0	4 700K	15	1,1	+0,7	60	7,7
K5	3 900K	25	1,2	-0,2	220	15
M0	3 800K	40	1,2	-0,4	330	18
M5	3 300K	80	1,2	-0,3	930	30

Stelle supergiganti

Tipo	Temp. Sup	Raggio (Sole=1)	Massa (Sole=1)	M ass (Visual)	Luminosità (bol) (Sole=1)	Zona abit (UA)
O5	40 000K	30	70	-6,6	11 000 000	3300
B0	26 000K	30	25	-6,4	2 600 000	1600
A0	9 700K	60	16	-6,3	35 000	190
F0	7 700K	80	12	-6,6	32 000	180
G0	5 500K	120	10	-6,4	30 000	170
G5	4 800K	150	12	-6,2	29 000	170
K0	4 400K	200	13	-6,0	29 000	170
K5	3 800K	400	13	-5,8	38 000	190
M0	3 600K	500	13	-5,6	41 000	200

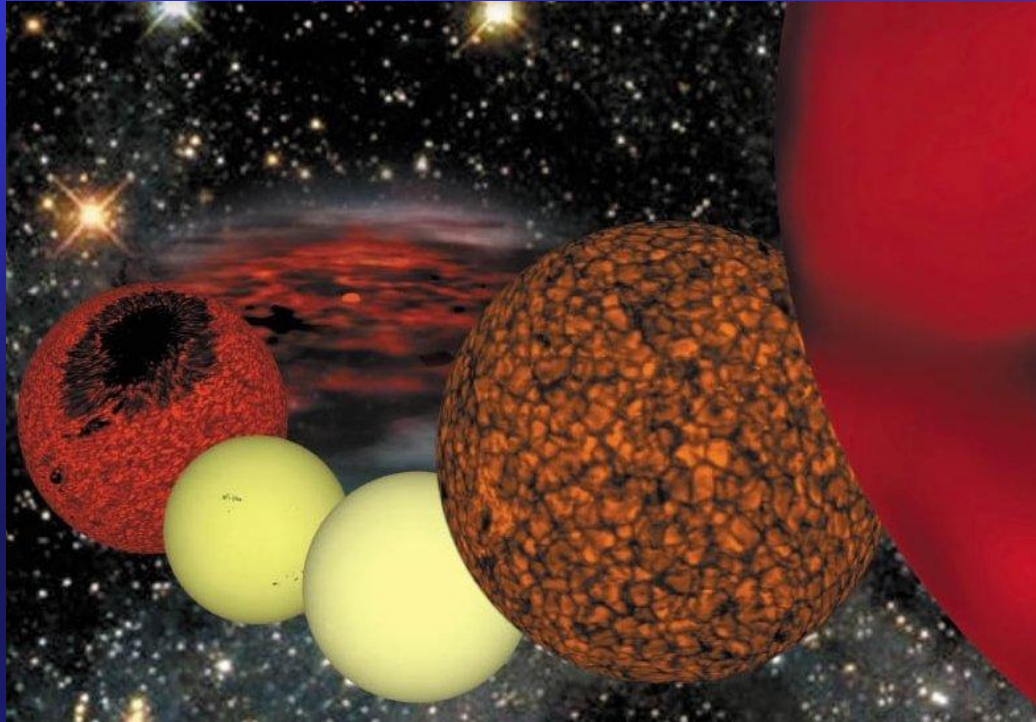
Nane Brune

Tipo	Temp. Sup	Raggio (Sole=1)	Massa (Sole=1)	M ass (Visual)	Zona abit (UA)	Zona abit (km)
M8	2 600K	0,11	+18,5	0,00045	0,021	3 100 000
M9	2 500K	0,10	+19,3	0,00032	0,018	2 700 000
L0	2 400K	0,098	+19,7	0,00030	0,017	2 500 000
L2	2 100K	0,095	+20,4	0,00015	0,012	1 800 000
L5	1 650K	0,089	+22	0,000060	0,0078	1 200 000
T0	1 400K	0,08	+23	0,000028	0,0052	780 000
T5	1 200K	0,06	+24	0,000015	0,0039	580 000
T8	750K	0,06	+26	0,0000026	0,0016	240 000

Numero di stelle nella Via Lattea

Classe di luminosità	Classe Spettrale	Massa Msole	Lumin Lsole	Numero stelle	Percentuali %		
					N0	M	L
Supergiganti	O-M	?	50,000	$\approx 10^5$	≈ 0	≈ 0	≈ 3
Giganti	F-M	≈ 1.2	40	2×10^9	0.5	0.6	≈ 41
Sequenza principale	O	≈ 25	80,000	$\approx 10^4$	0.5	0.6	≈ 42
	B	5.0	200	300×10^6	0.6	1.6	≈ 70
	A	1.7	6	3×10^9	1.2	4.6	≈ 79
	F	1.2	1.4	12×10^9	4.2	13.6	≈ 87
	G	0.9	0.6	26×10^9	11.2	≈ 27	≈ 94
	K	0.5	0.2	52×10^9	≈ 24	≈ 42	≈ 99
	M	0.25	0.005	270×10^9	≈ 91	≈ 80	≈ 100
Nane bianche	B-F	≈ 1.0	0.005	$\approx 35 \times 10^9$	≈ 100	≈ 100	≈ 100
				400×10^9			

Perché l'evoluzione stellare ?



- All'inizio della storia dell'universo le stelle non esistevano, pertanto in un qualche momento esse si sono formate.
- Le stelle emettono radiazioni, dunque consumano energia e quando l'avranno terminata, cesseranno di brillare e moriranno.
- Tra questi due stadi deve necessariamente una successione di fasi intermedie, che costituiscono l'evoluzione della stella.

Problemi di descrizione

- L'evoluzione di una stella copre un arco di tempo di miliardi di anni (il Sole ha circa 5 miliardi di anni).

Come descriverla?

- Definizione di parametri fisici caratteristici (L, T, M, età, ...)
- Suddivisione delle stelle in classi
- Analisi delle classi, confronto tra classi

Un piccolo «zoo» stellare

Antares - α Sco

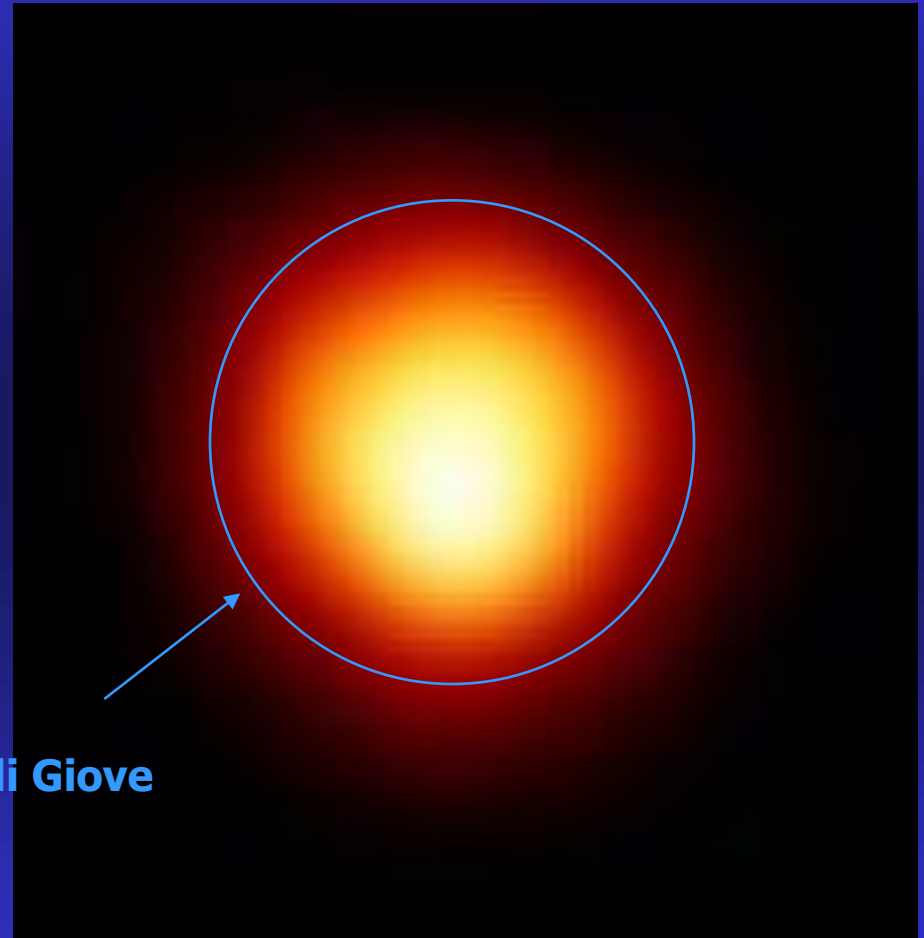
Temperatura = 2800°K
Luminosità = 9000 $L_{\odot}$
Diametro = 4 UA
Distanza = 520 al



F. Mazzucconi

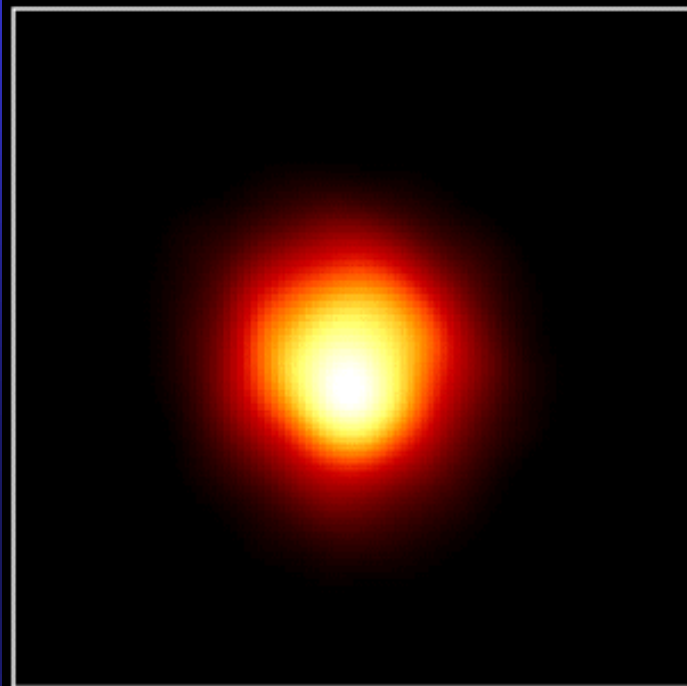
Betelgeuse - α Ori

Temperatura = 2800°K
Luminosità = 10000 – 19000 $L_{\odot}$
Diametro = 700 – 1300 $D_{\odot}$
Distanza = 450 a.l.



Orbita di Giove

Betelgeuse - α Ori



Dimensioni della stella

Raggio dell'orbita terrestre

Raggio dell'orbita di giovè



Per la prima volta il Telescopio Spaziale ha mostrato l'atmosfera di una stella

HST • FOC

PRC96-04 • ST ScI OPO • January 15, 1995 • A. Dupree (CfA), NASA

Rasalgethi - α Her

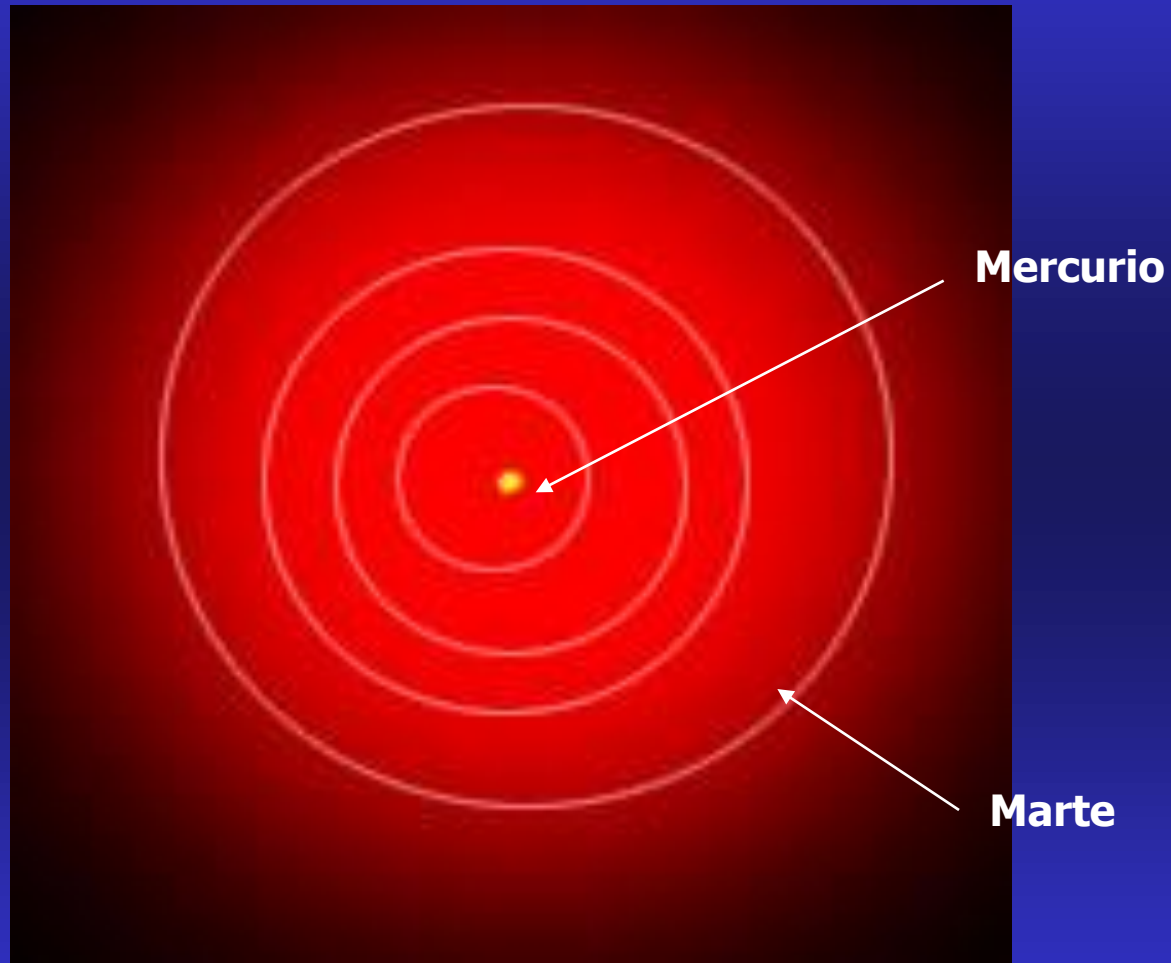
Nell'infrarosso sarebbe la
stella più brillante del cielo

Temperatura = 2500°K

Luminosità = 500 $L_{\odot}$

Raggio = 2 UA

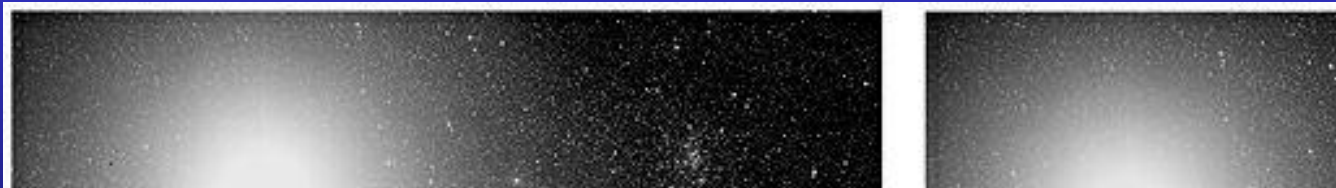
Distanza = 380 al



Archernar

Classificazione	stella bianco-azzurra di sequenza principale
Classe spettrale	B3 Vpe
Distanza dal Sole	144 anni luce
Costellazione	Eridano
Dati fisici	
Diametro medio	circa 13 900 000 km
Raggio medio	circa 10 R _☉
Massa	6-8 M _☉
Temperatura superficiale	14.500–19.300 K (media)
Luminosità	2.900-5.400 L _☉
Indice di colore (B-V)	-0,20
Età stimata	da 1 a 5 milioni di anni
Dati osservativi	
Magnitudine apparente da Terra	0,50
Magnitudine ass.	-2,77
Parallasse	22,68 ± 0,57 mas
Moto proprio	AR: 88,02 mas/anno Dec: −40,08 mas/anno
Velocità radiale	+16 km/s

Il sistema di α Centauri

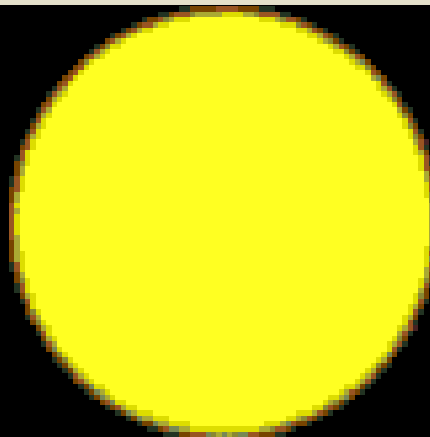


α Cen

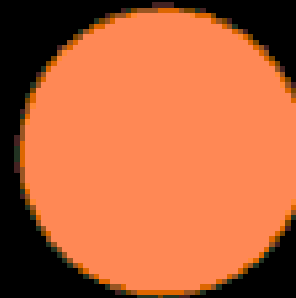
Le dimensioni rispetto al Sole



Sole



α Centauri A



α Centauri B



Proxima

The Triple Stellar System Alpha Centauri
(ESO 1-m Schmidt Telescope)

ESO PR Photo 07a/03 (15 March 2003)

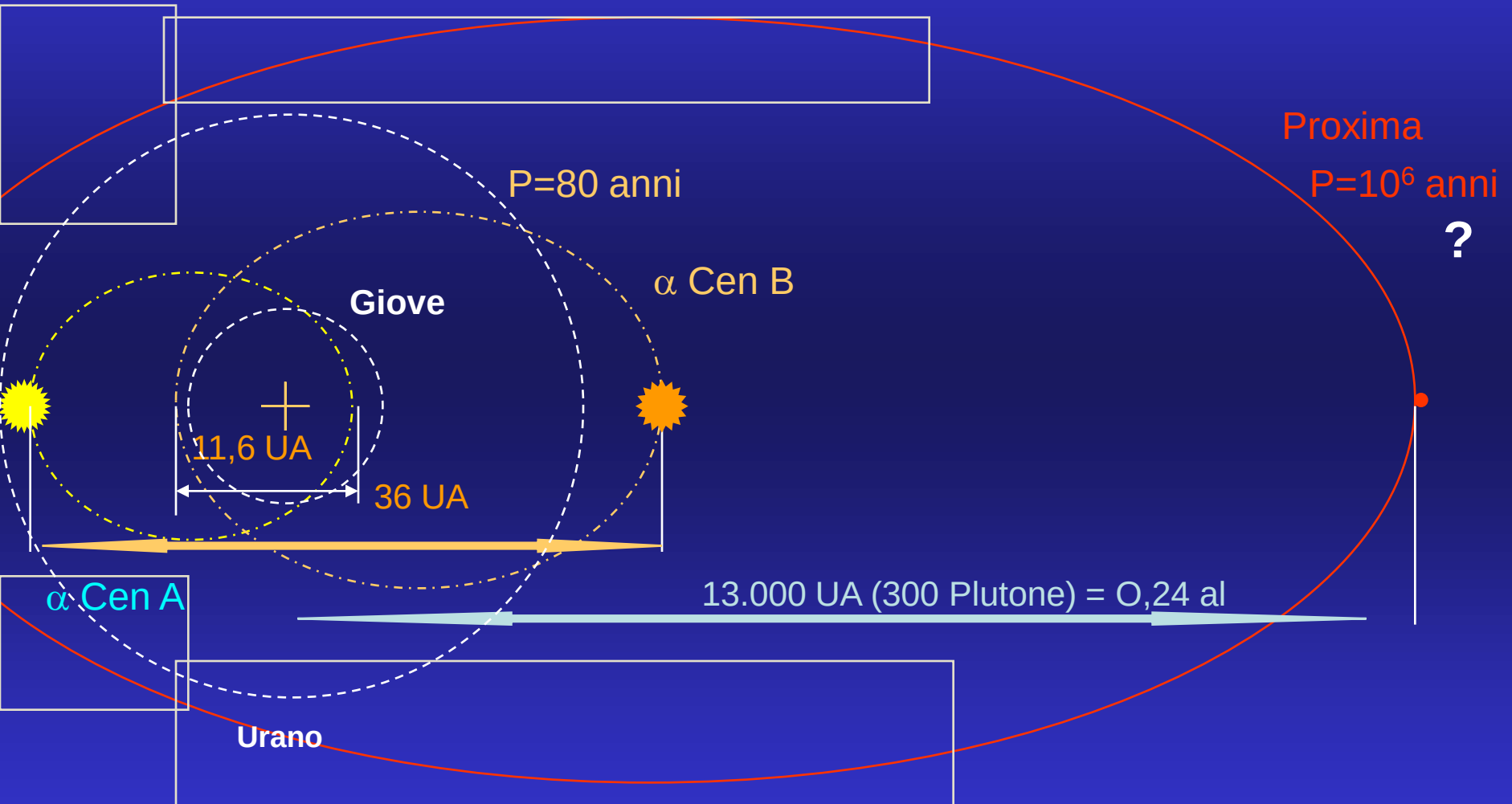
© European Southern Observatory



A α Cen – Rigil (il piede) B

- Distanza = 4,35 a.l.
 - Tipo spettrale = G2
 - Massa = 1,09 $M_{\odot}$
 - Raggio = 1,23 $R_{\odot}$
 - Luminosità = 1,54 $L_{\odot}$
 - Età = 4,85 – 6,8 miliardi di anni
 - Temperatura = 5770°K
- Tipo spettrale = K1
 - Massa = 0,91 $M_{\odot}$
 - Raggio = 0,86 $R_{\odot}$
 - Luminosità = 0,50 $L_{\odot}$
 - Temperatura = 5300°K
 - Anno di scoperta: 1752

Il sistema di α Cen



Proxima Centauri

- Distanza = 4,22 a.l.
- Tipo spettrale = M5
- Massa = $0,12 M_{\odot}$
- Raggio = $0,15 R_{\odot}$
- Luminosità = $1/18.000 L_{\odot}$
- Età = 5 – 6 miliardi di anni
- Temperatura = 3300°K
- Anno di scoperta: 1915
- E' una nana rossa, che è stata per lungo tempo la stella più debole conosciuta
- Vista dalle altre due stelle è una stellina appena visibile a occhio nudo, $m_v = 4,8$
- Messa alla distanza del Sole, il disco della stella sarebbe appena visibile

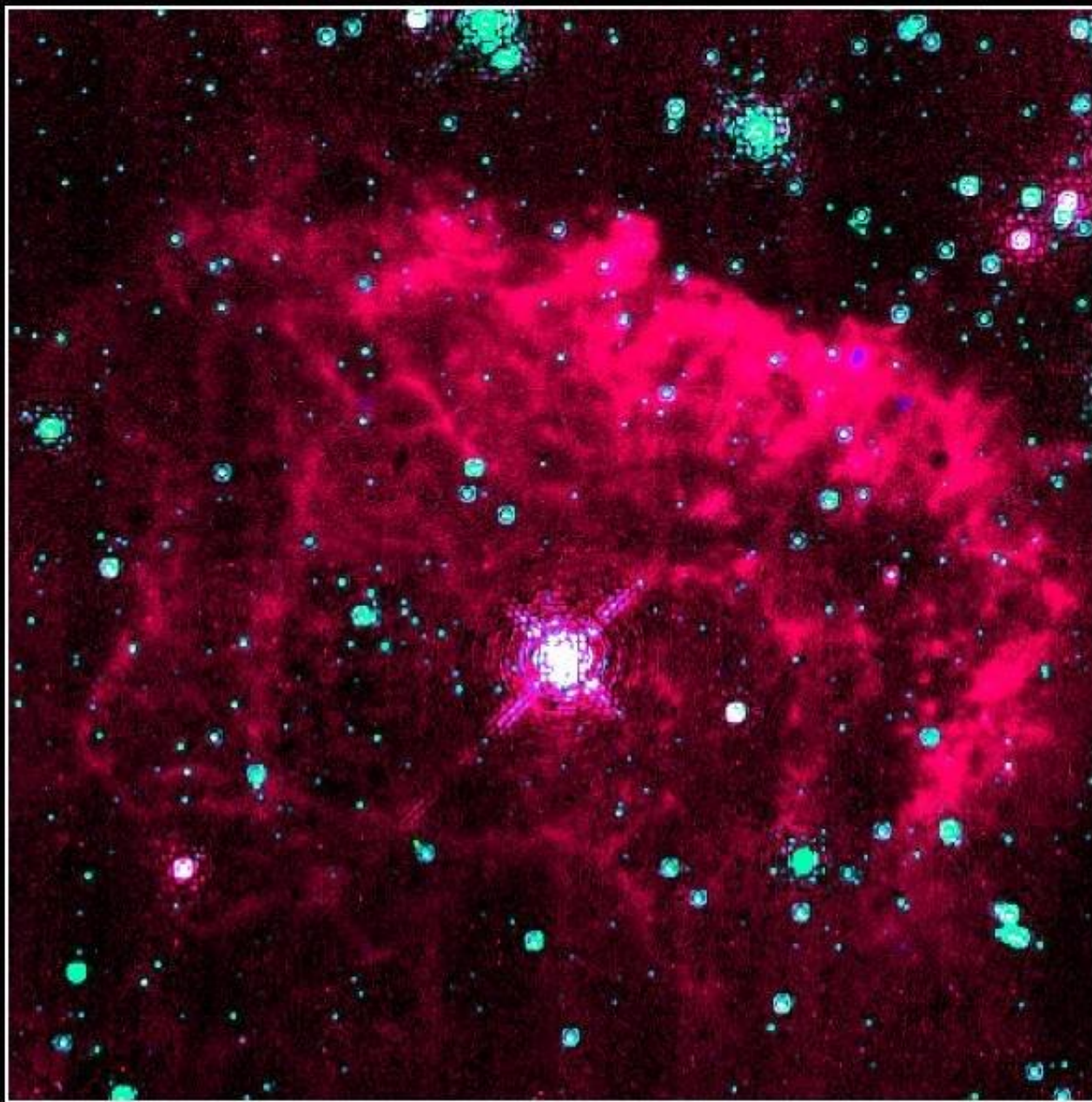
Caratteristiche di Proxima

- E' una **flare-star**, cioè una stella con un'intensa attività superficiale
- Nell'arco di pochi minuti può aumentare la sua luminosità di molte volte
- Durante le esplosioni emette la stessa quantità di raggi X che emette il Sole, il che rende del tutto improbabile la presenza di vita su eventuali pianeti

Pistol Nebula e stella

$M \sim 100\text{-}200 M_{\odot}$
 $L > 10^7 L_{\odot}$
 $d \sim 25000 \text{ a.l.}$

SN tra 2 Myr

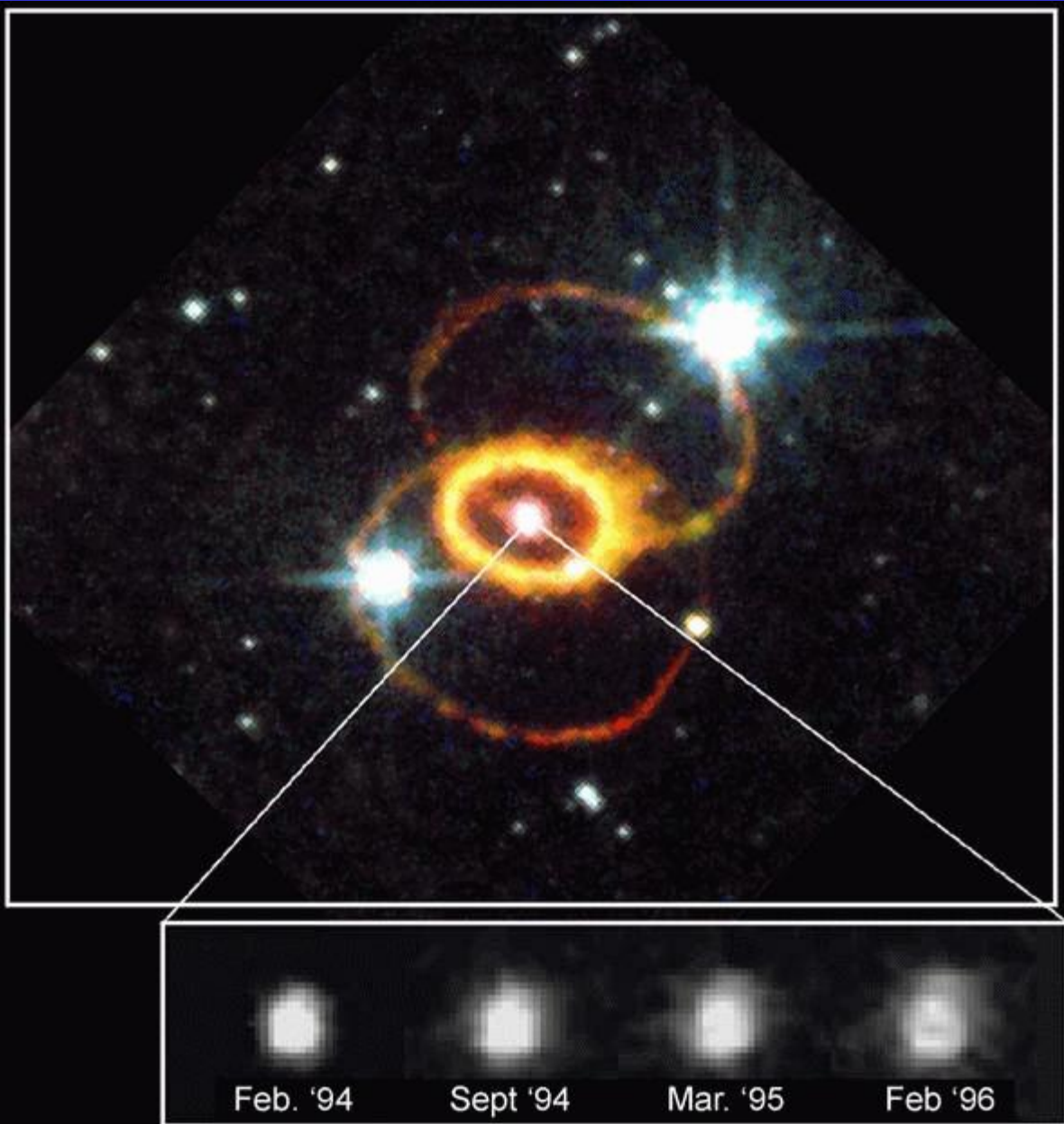


Una stella massiccia nella nebulosa "pistola" HST • NICMOS
PRC97-33 • ST ScI OPO • D. Figer (UCLA) and NASA

SN 1987A

LMC

D=169000 a.l.



Supernova 1987A

HST . WFPC2

PRC97-03 • ST ScI OPO • January 14, 1997
J. Pun (NASA/GSFC), R. Kirshner (CfA) and NASA