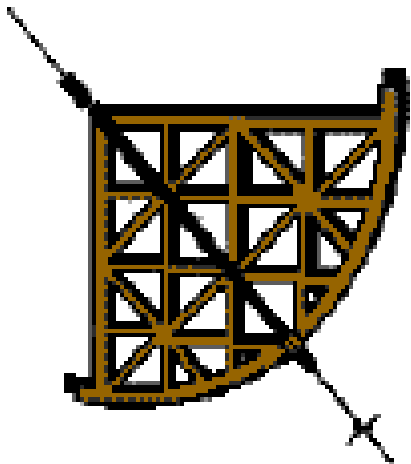


Introduzione alla Cosmologia

Fisica

Lezione 7

Le stelle ed il mezzo interstellare, il diagramma HR, nascita e morte delle stelle
la produzione degli elementi.



Giorgio G.C. Palumbo
Università degli Studi di Bologna
Dipartimento di Astronomia



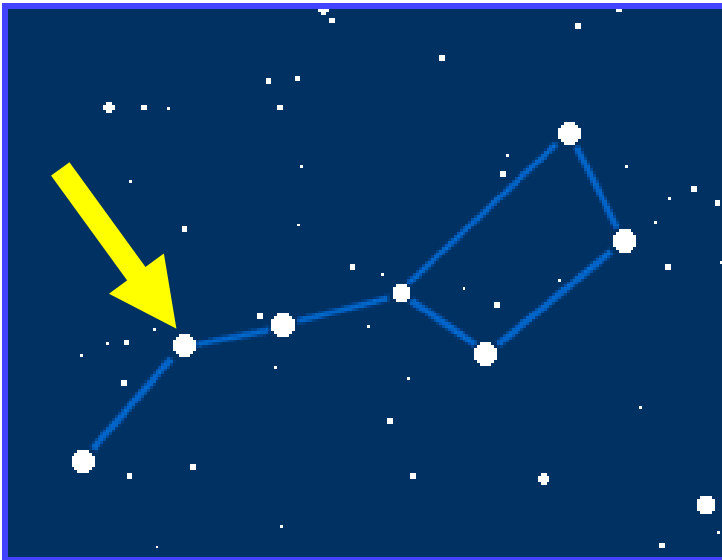
Stelle Binarie

- Definizione: due stelle in orbita tra loro
- Ci sono 3 tipi di binarie
 - **Visuali** – si identificano come coppie di stelle
 - **Spettroscopiche** – si rivelano usando lo spostamento Doppler
 - **A Eclisse** – ogni stella passa di fronte all'altra

Come si determina la massa?

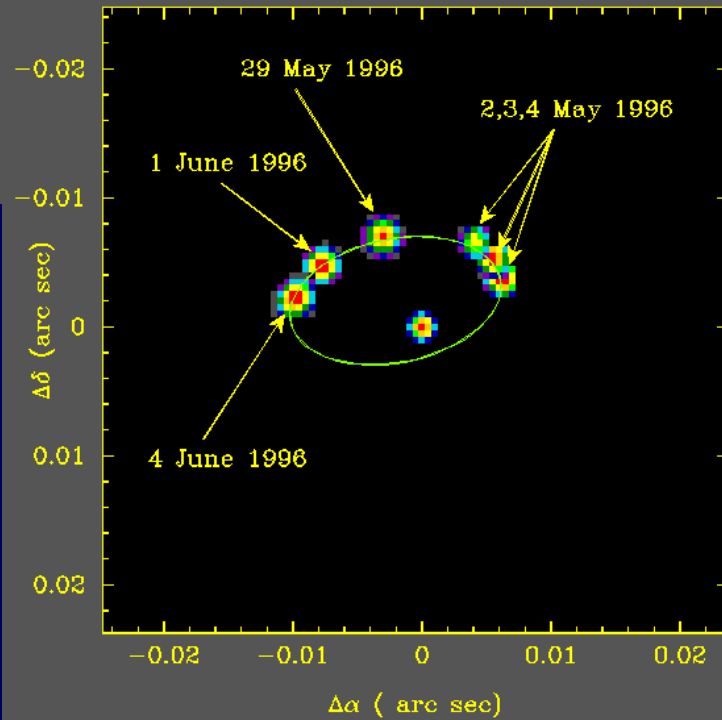
- Molto più difficile, fortunatamente vicino al Sole, più del 50% delle stelle sono in sistemi binari o multipli.
- Terza legge di Keplero modificata da Newton
- Detrminata l'orbita di un sistema binario, si può derivare la massa del sistema.
- Ipotesi: ogni stella di tipo G ha la stessa massa, sia in sistema binario o no.

Binarie Visuali

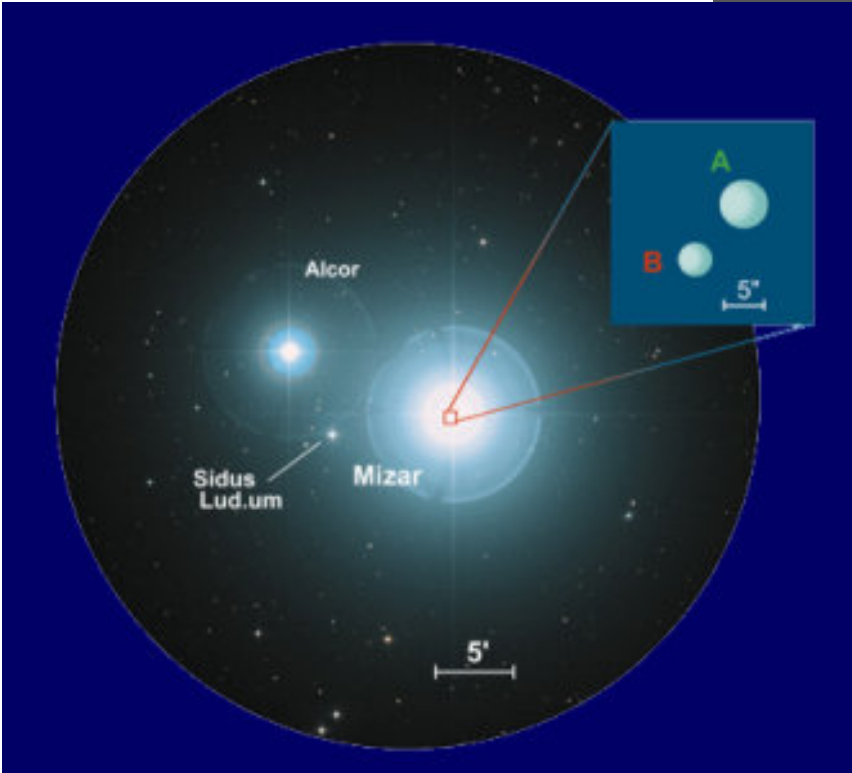


www.cosmobrain.com

ζ^1 Ursae Majoris



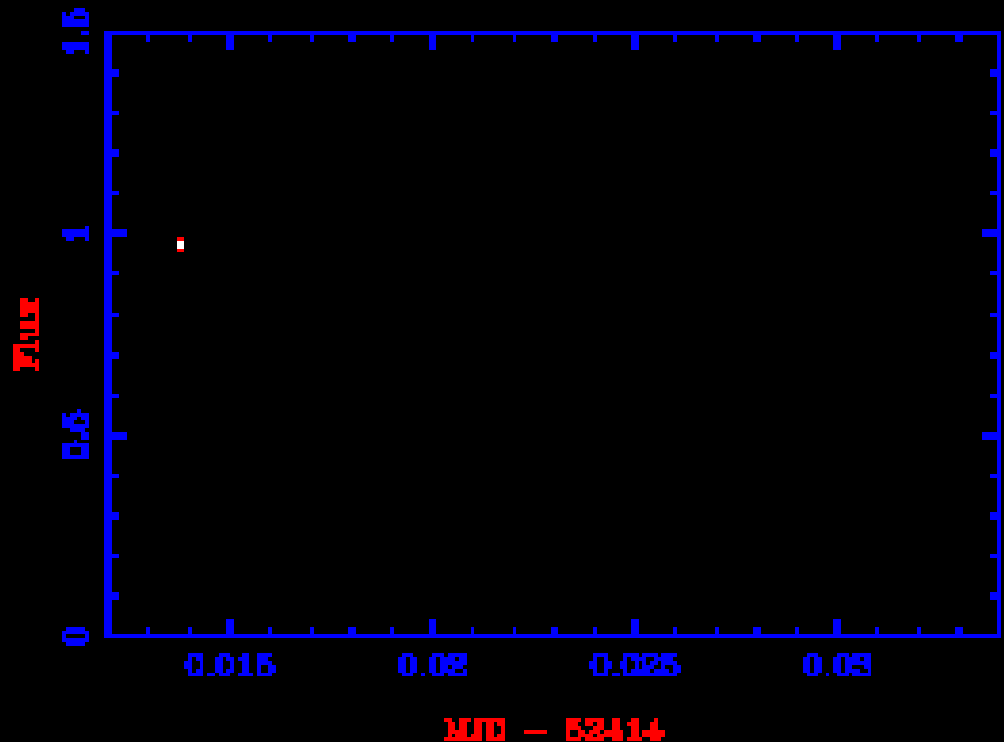
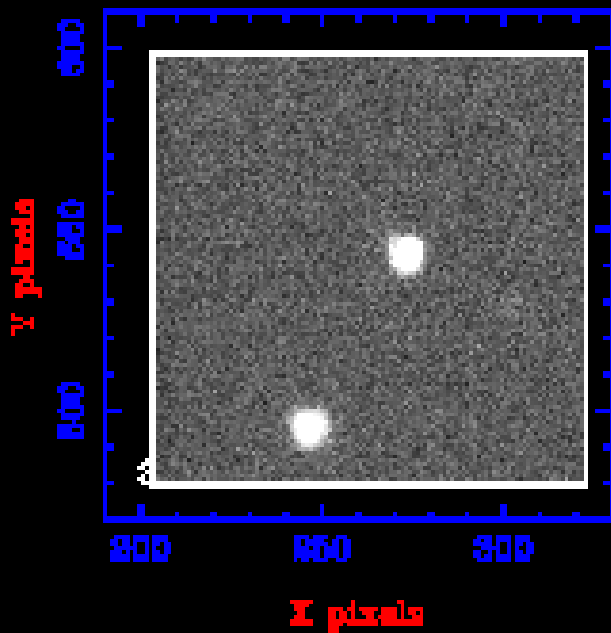
J. Benson, US Naval Observatory

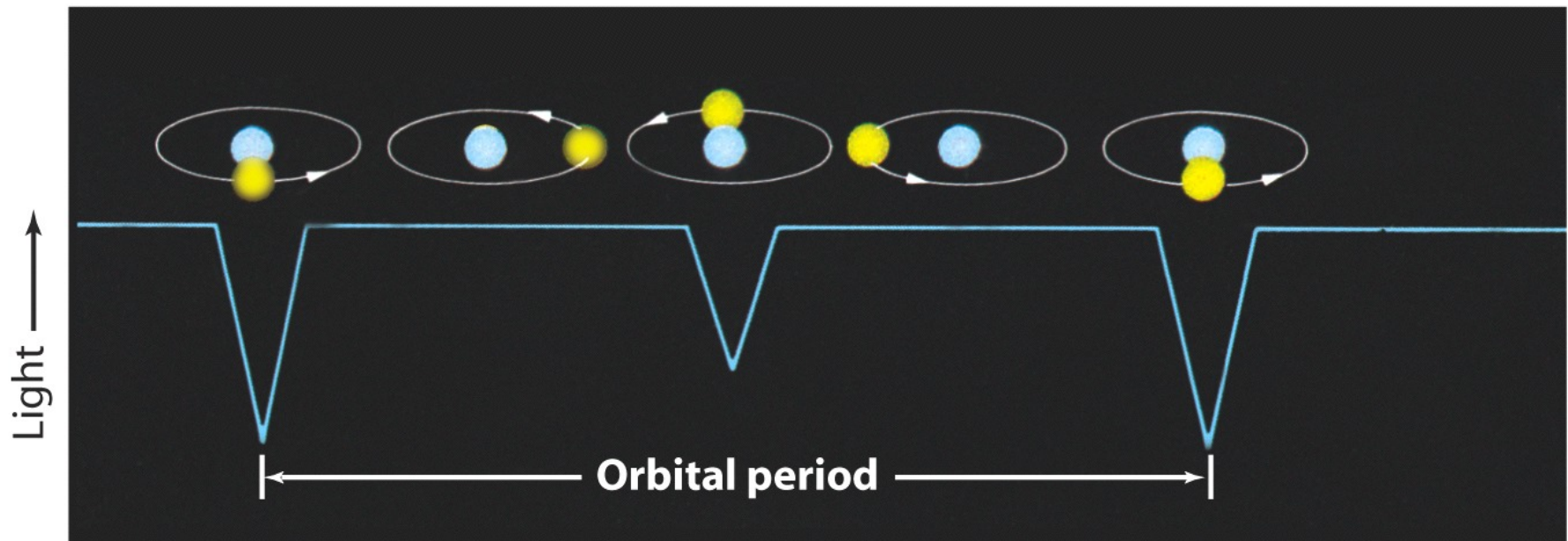


www.coelum.com

Binarie a eclisse

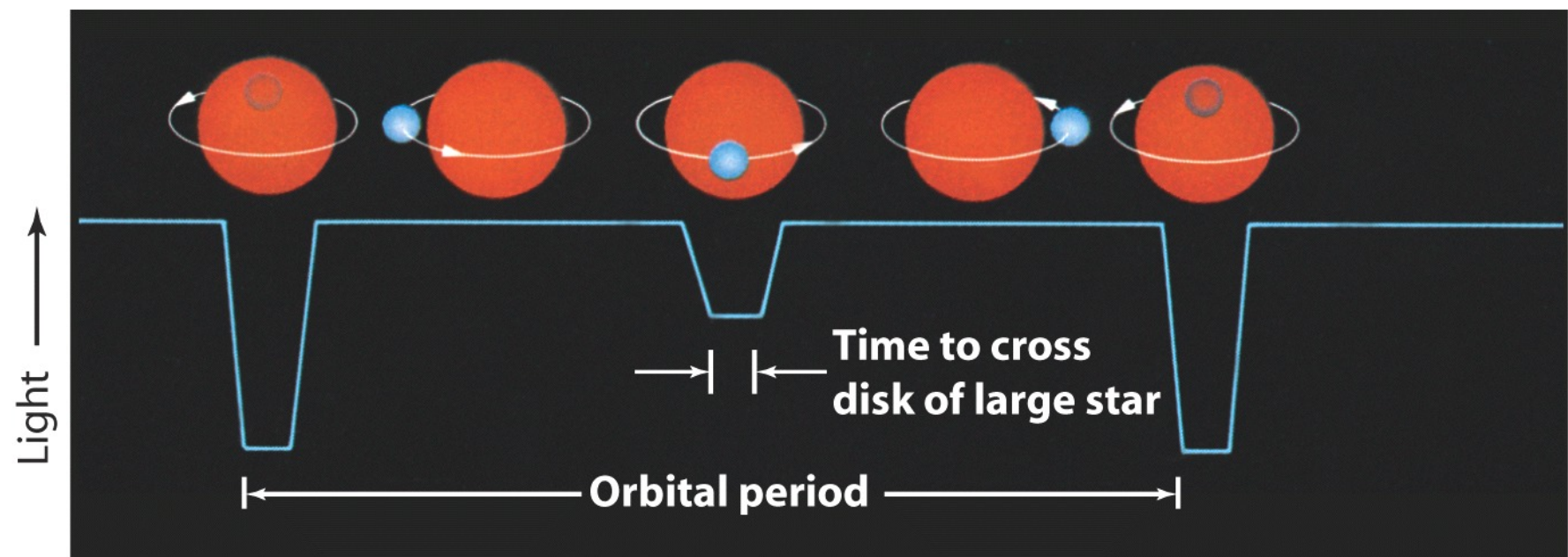
- ▶ Eclissi avvengono se
 - Stelle sono abbastanza vicine una all'altra
 - Il piano orbitale è vicino alla linea di vista
- Possono essere usate per determinare i diametri, le velocità, le strutture atmosferiche, etc.





a Partial eclipse

Time →

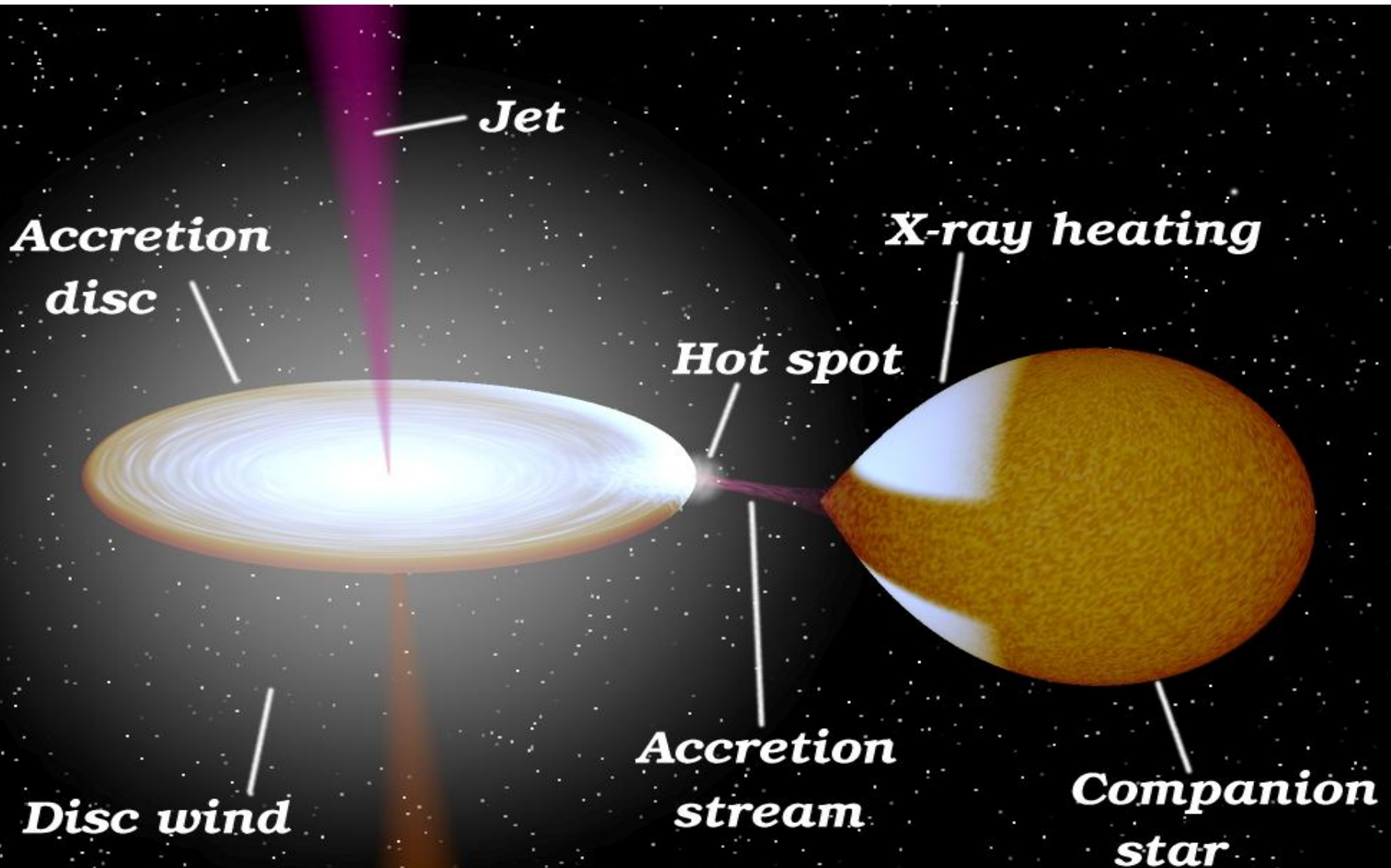


b Total eclipse

Sistemi Binari ?

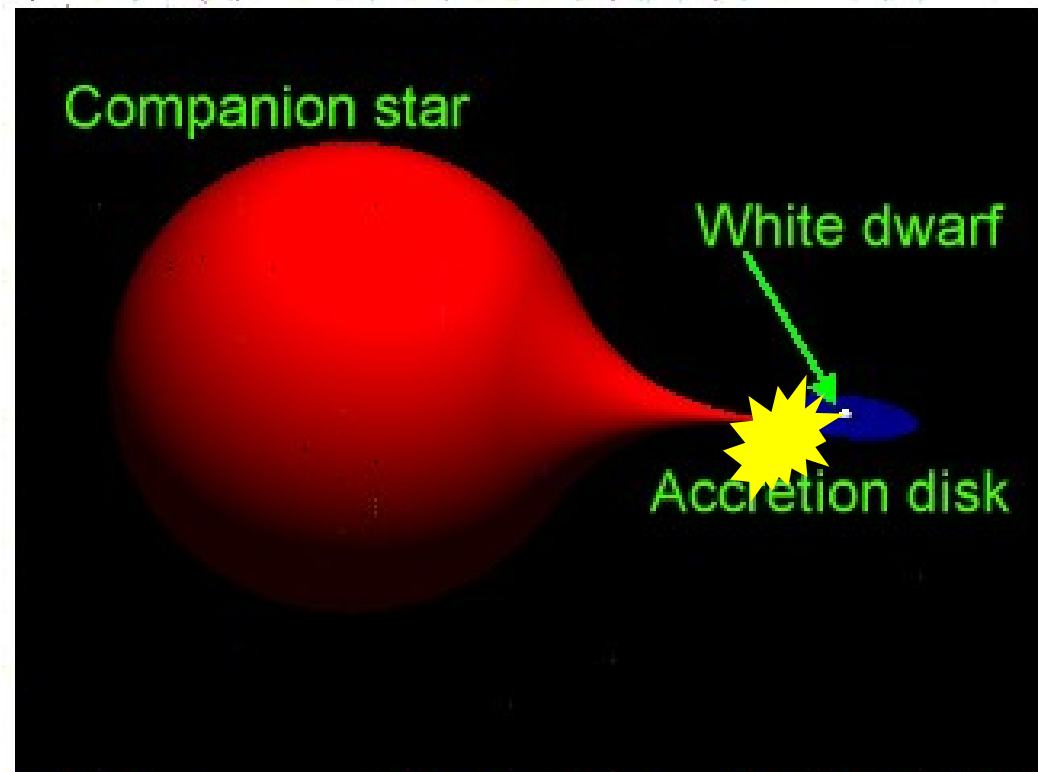
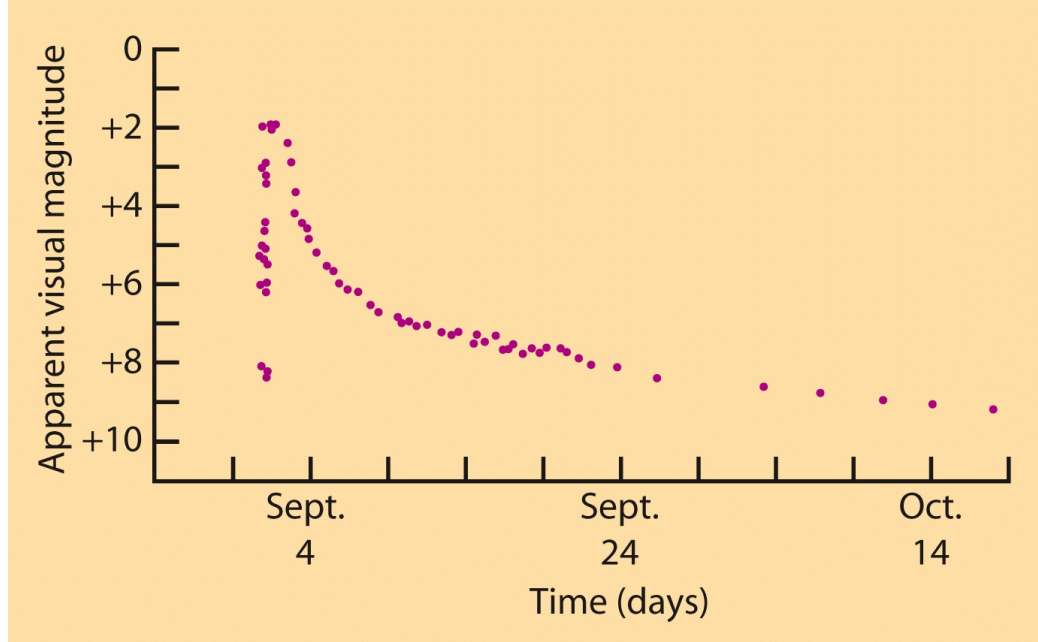
- Se le stelle binarie hanno masse leggermente diverse, la stella di massa superiore evolve in una Nana Bianca.
- Successivamente l'altra stella evolve in una Gigante Rossa.

Sistemi Binari ?



Novae

- ▶ Processo spesso ricorrente
- ▶ Novae: comuni, circa 20 all'anno nella galassia.
- ▶ É possibile che l'intera stella esploda in una Supernova di tipo 1a—troppo materiale satura la degenerazione elettronica (1.4 masse solari)

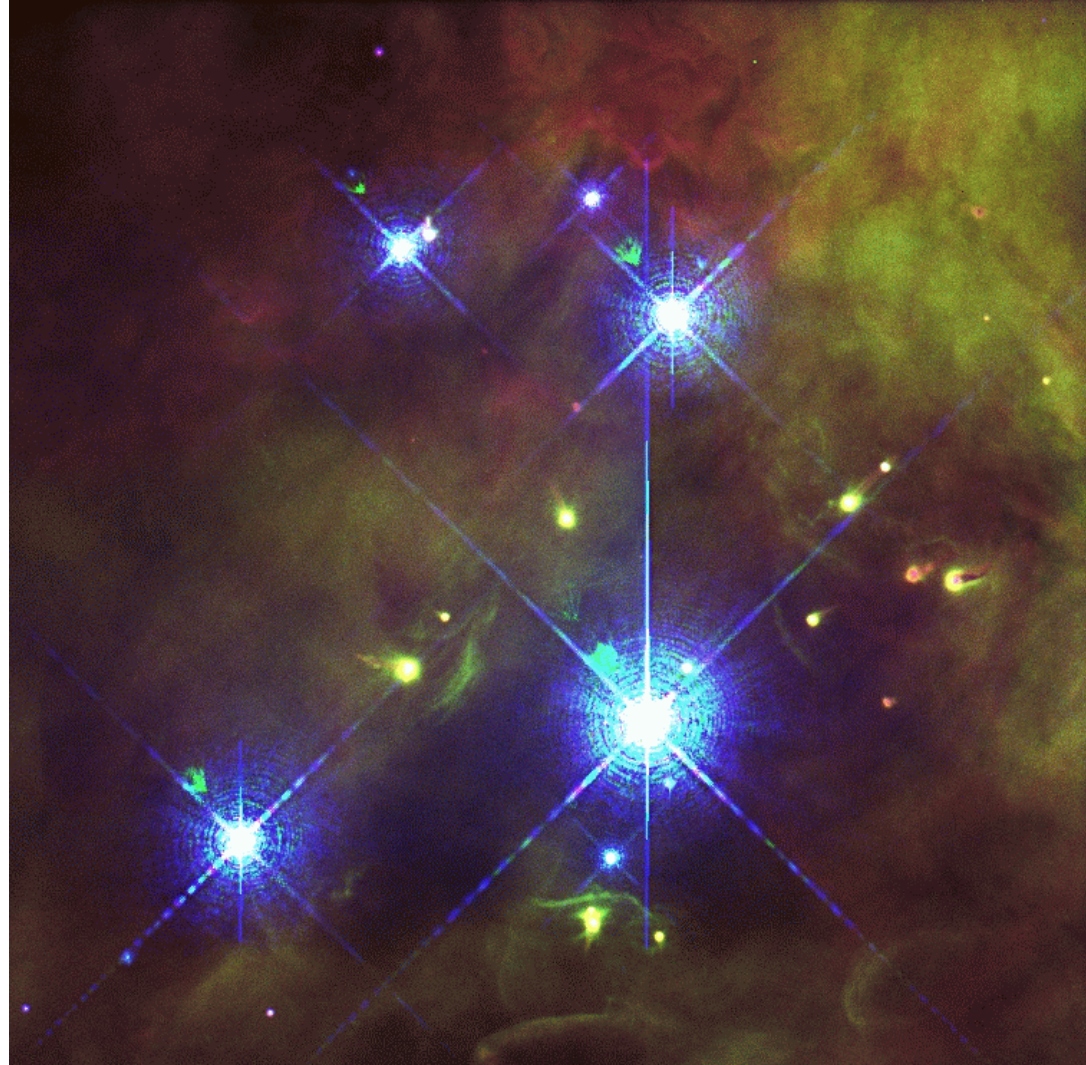


Nascita delle Stelle

- Il sistema solare si è evoluto da una nebulosa circa 4.6 milioni di anni fa.
- C'è materia diffusa tra le stelle, polvere e gas, noto come mezzo interstellare (MI).
- Il MI rappresenta il 10% della massa della nostra galassia. Consiste per il 90% di H, 9% He e 1% da altri elementi.
- Ci sono similitudini tra la Nebulosa solare di 4.6 milioni di anni fa e il in generale. La formazione stellare è in atto anche oggi.

Dove si formano le Stelle

- Le stelle giovani spesso si trovano in **clusters (ammassi)**
- Stelle molto giovani sono anche associate a nubi di gas (**nebulae**)



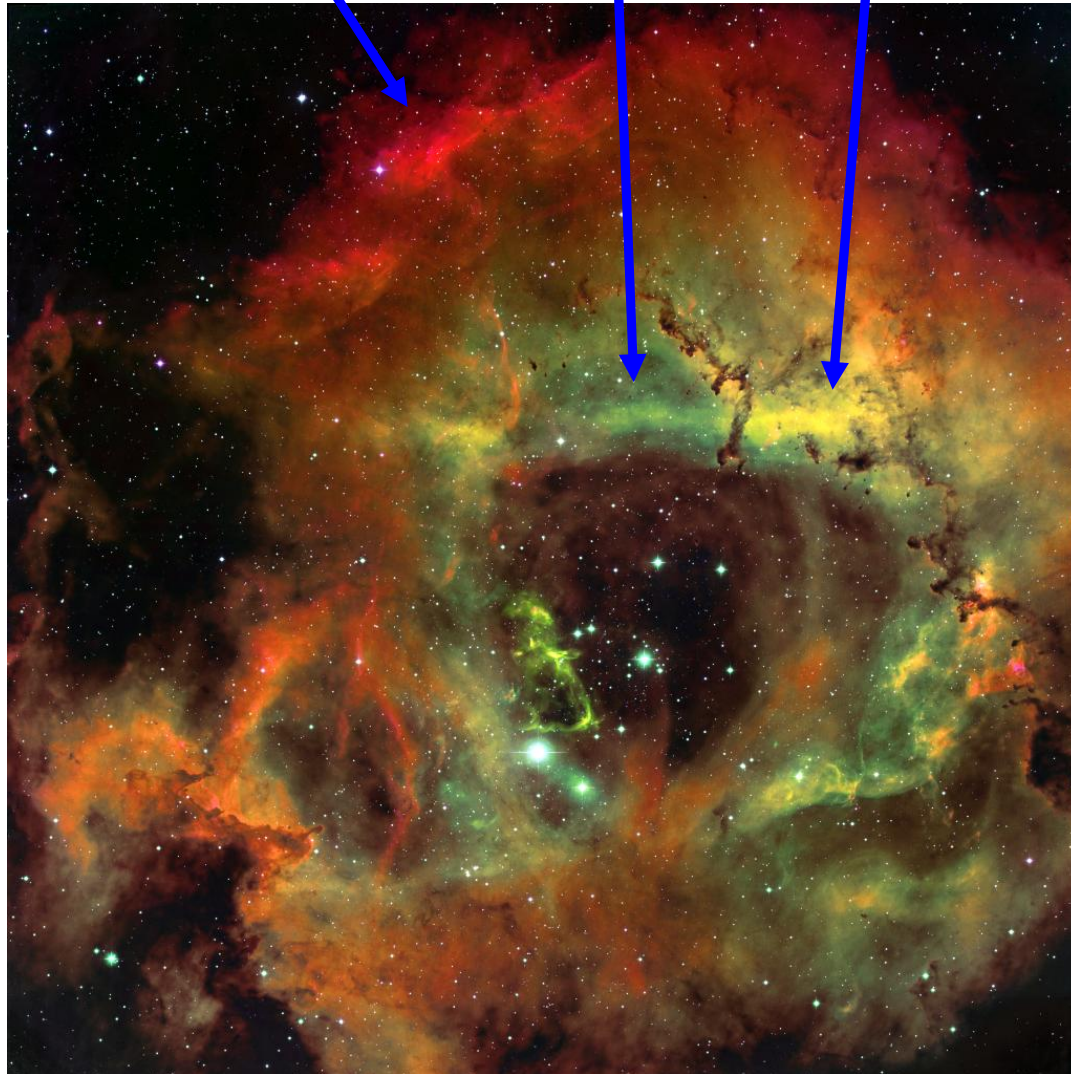
Il Trapezio

Nebulose ad Emissione (Fluorescent)

H

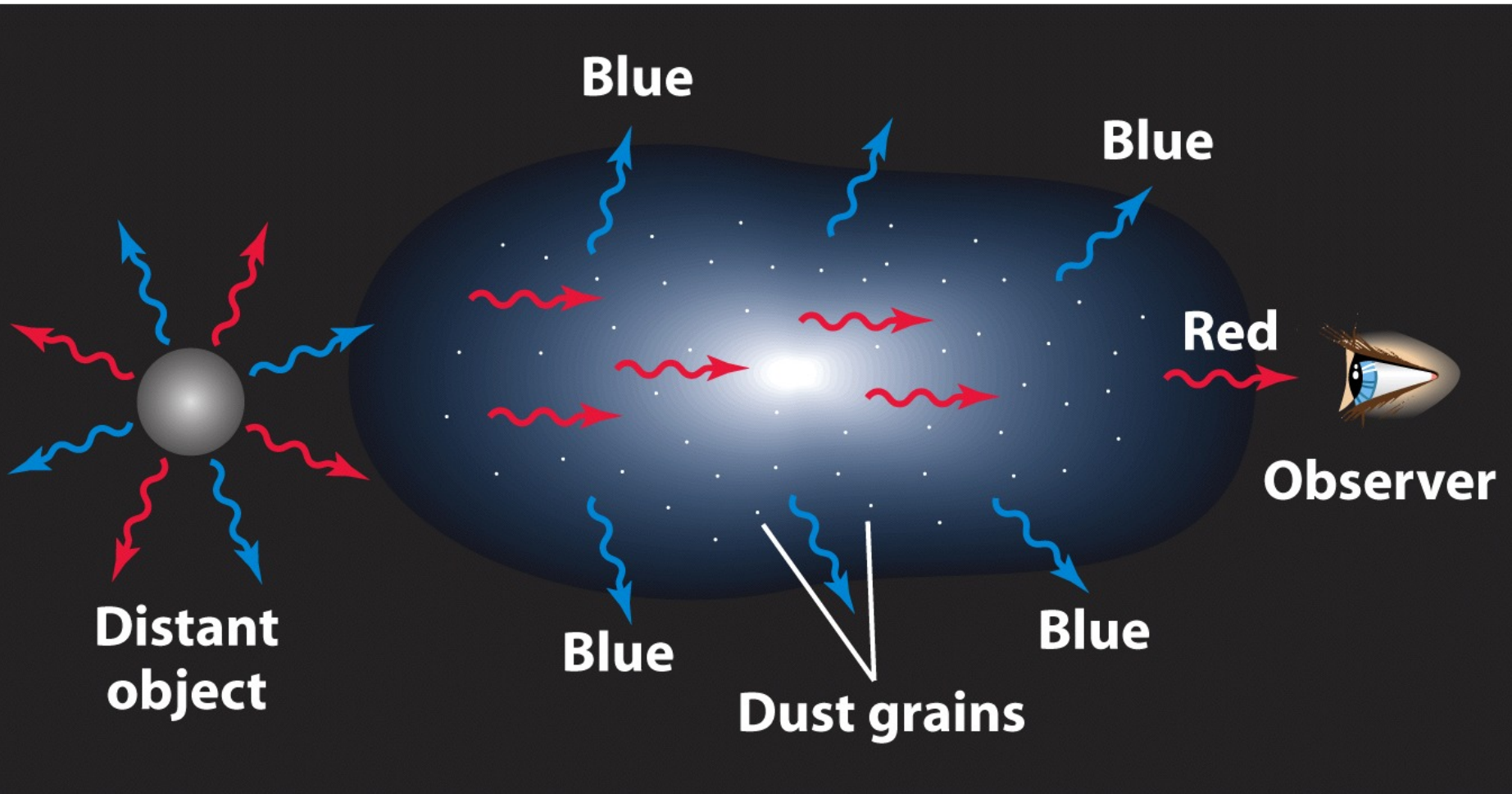
O

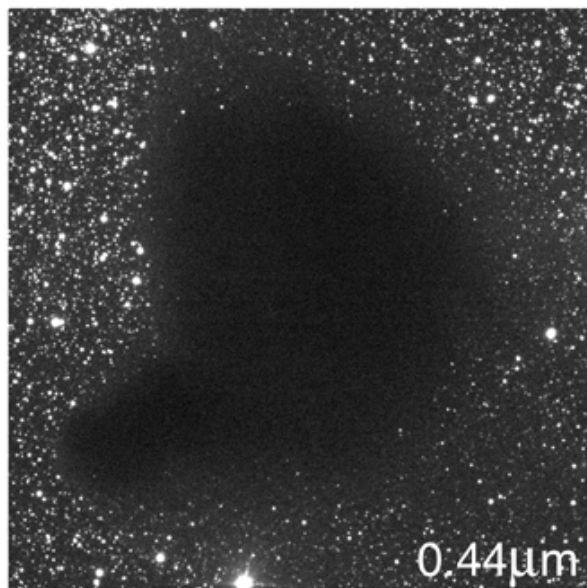
S



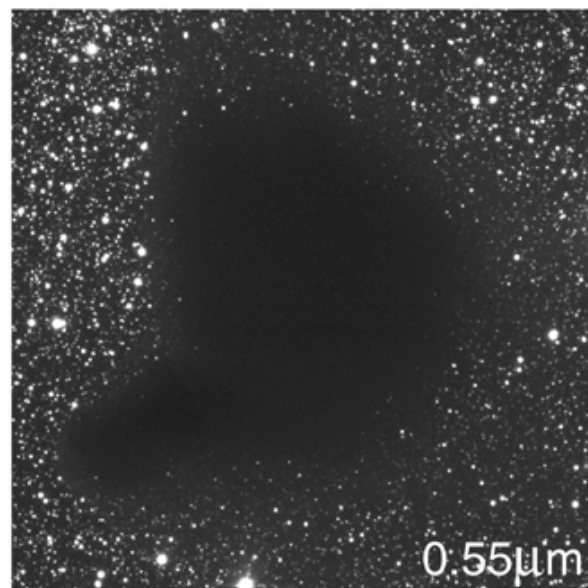
Nebulosa Rosetta

Nebulose "scure"

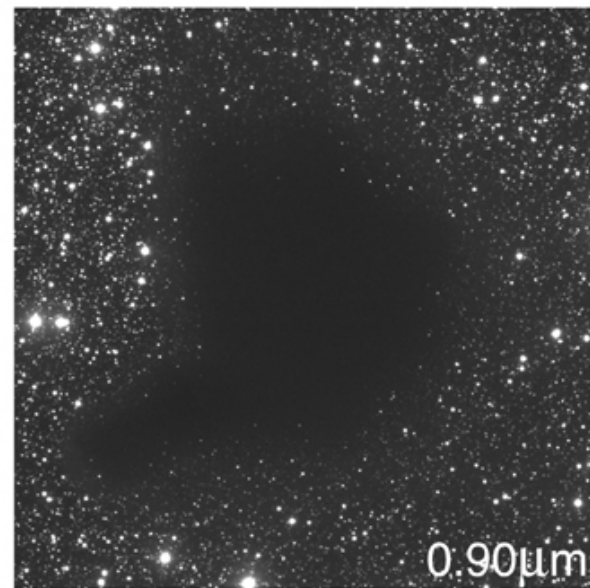




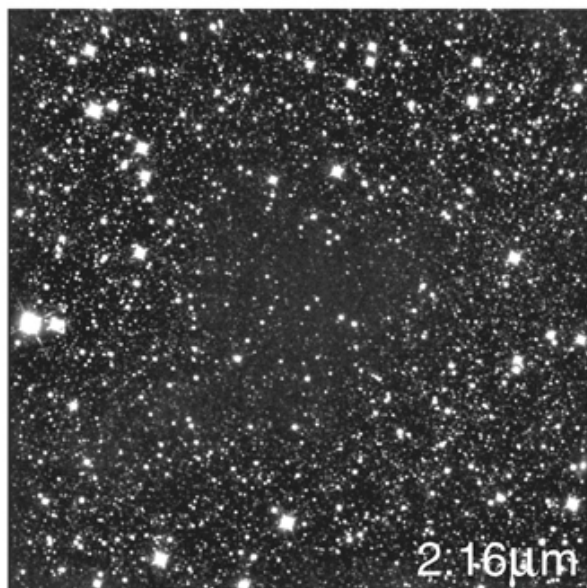
0.44 μm



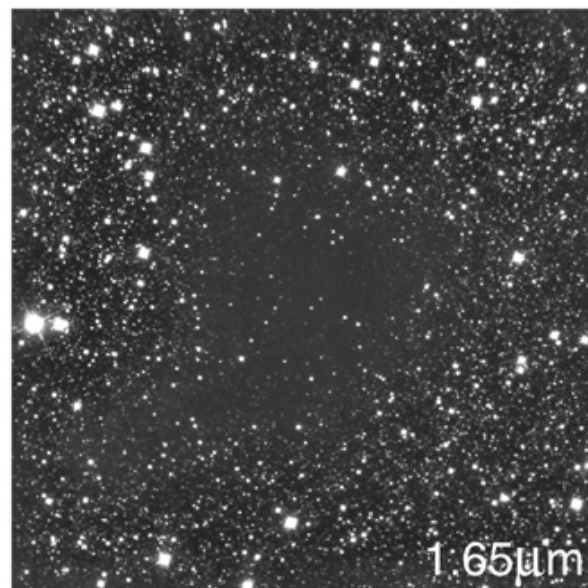
0.55 μm



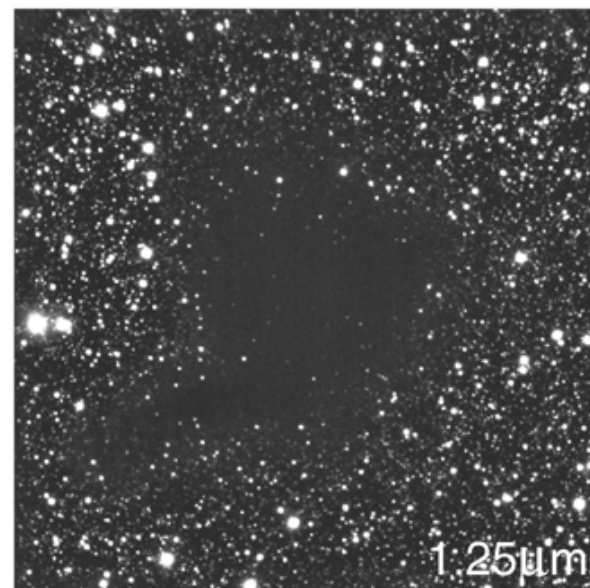
0.90 μm



2.16 μm



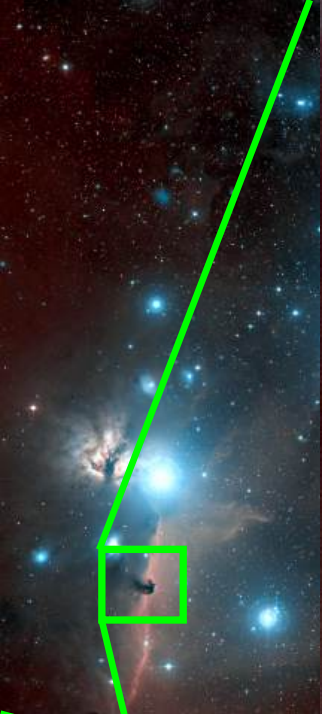
1.65 μm

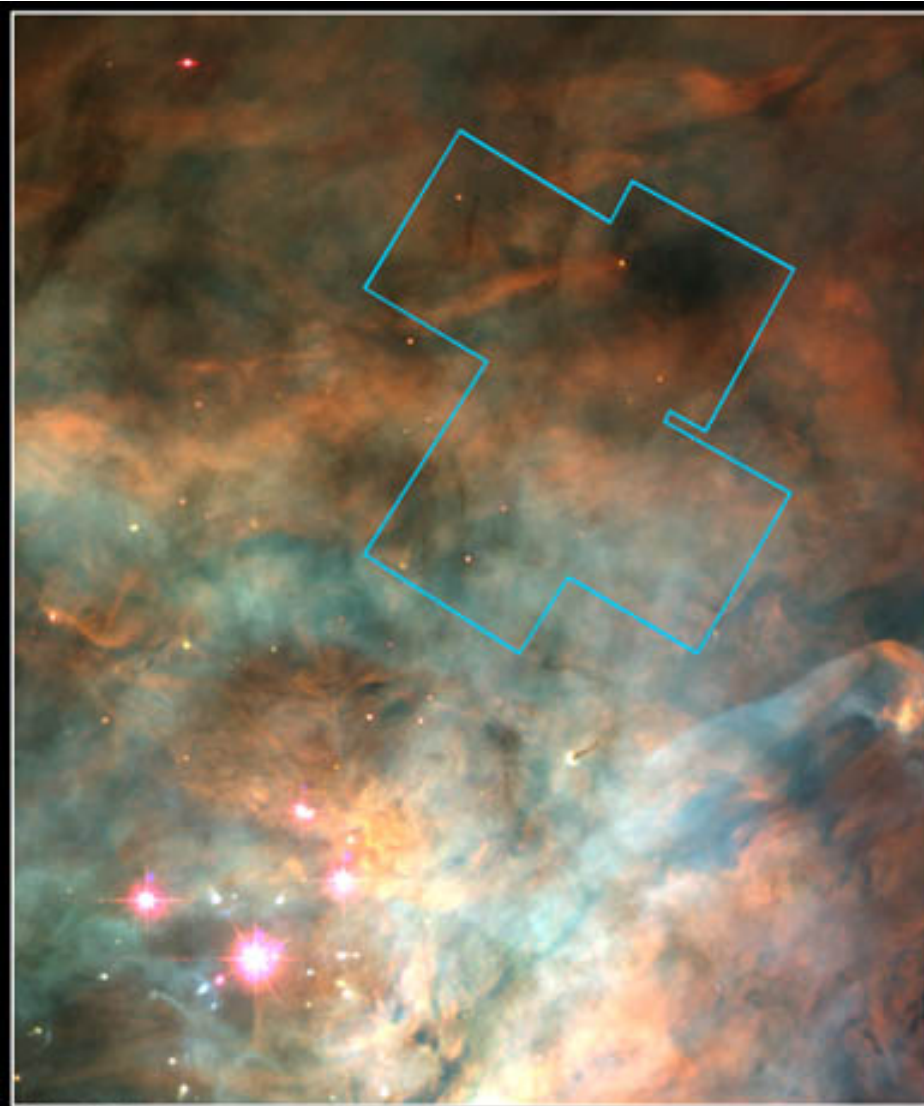


1.25 μm

The Dark Cloud B68 at Different Wavelengths (NTT + SOFI)





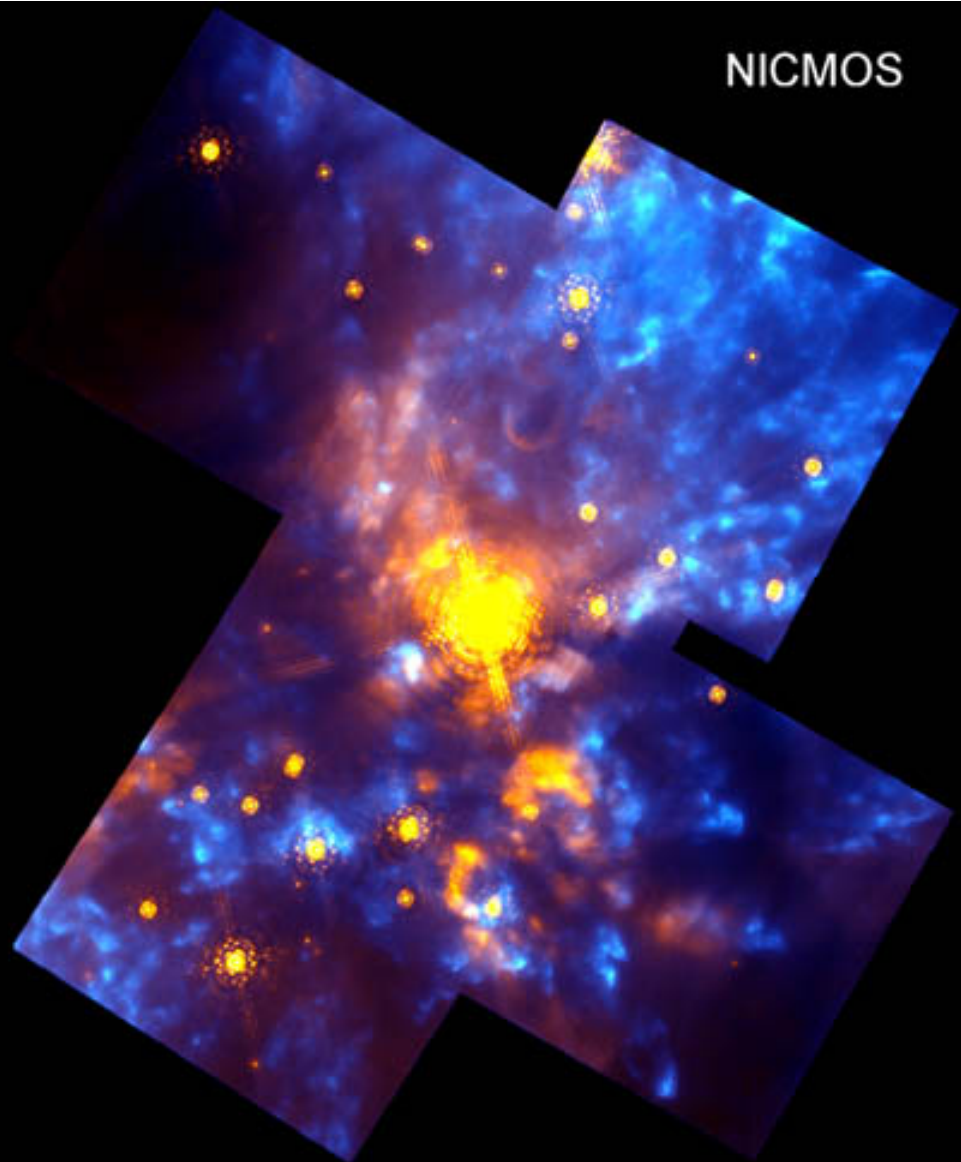


WFPC2

Orion Nebula • OMC-1 Region

PRC97-13 • ST ScI OPO • May 12, 1997

R. Thompson (Univ. Arizona), S. Stolovy (Univ. Arizona), C.R. O'Dell (Rice Univ.) and NASA



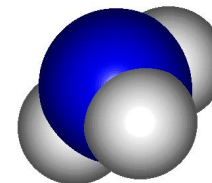
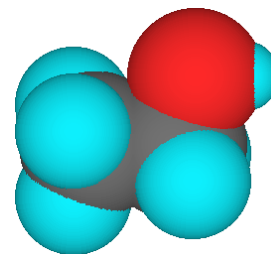
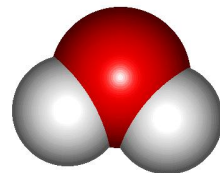
NICMOS

Hubble Space Telescope

Cosa c'è oltre all'H nelle Nubi Molecolari

▶ Molecole (e.g.)

- Monossido di Carbonio (CO)
- Acqua (H₂O)
- Ammoniaca (NH₃)
- Formaldeide (H₂CO)
- Alcohol Etilico(CH₃CH₂OH)
- Glycina (NH₂CH₂COOH)
- Acido Acetico (CH₃COOH)
- Urea [(NH₂)₂CO]

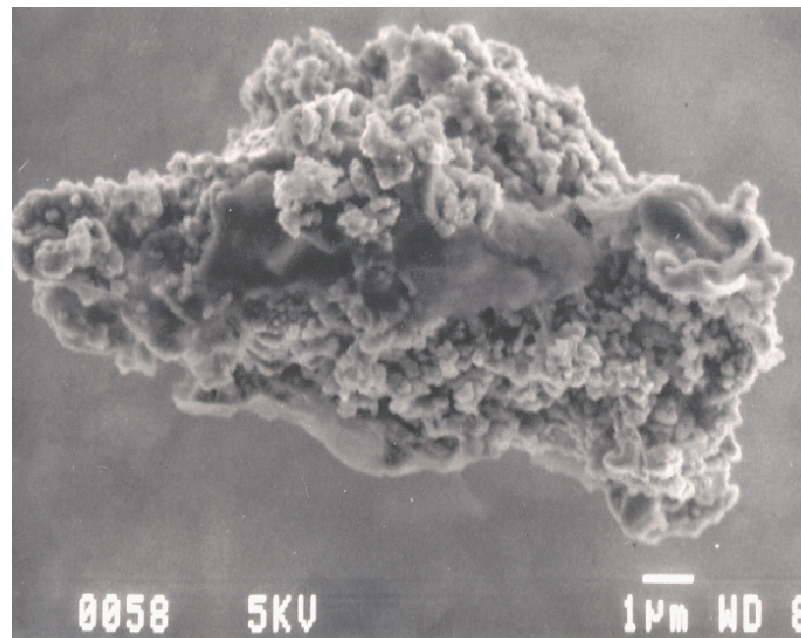


▶ Particelle di polvere

- ▶ Silicati, spesso coperti di ghiaccio
- ▶ Molecole di fuliggine



Idrocarburi policiclici aromatici (PAH)



Particelle di polvere(interplanetarie)

Nubi Molecolari Giganti

- **Fredde:** < 100 K
- **Dense:** $10^2 - 10^5$ H₂ molecole/cm³
- **Grandi:** $10 - 100$ pc, $10^5 - 10^6$ masse solari
- **CO emissioni molecolari & emissione da polveri traccia le strutture**

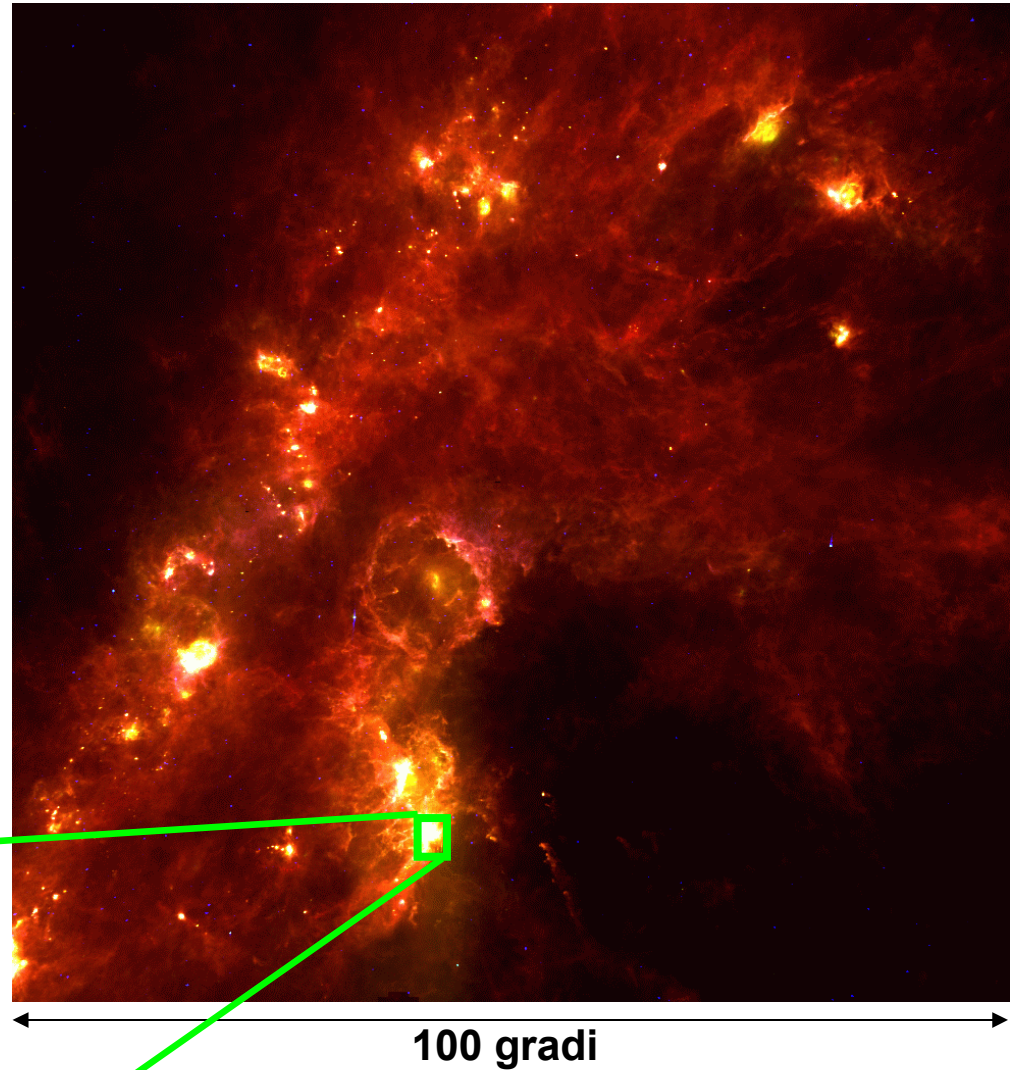
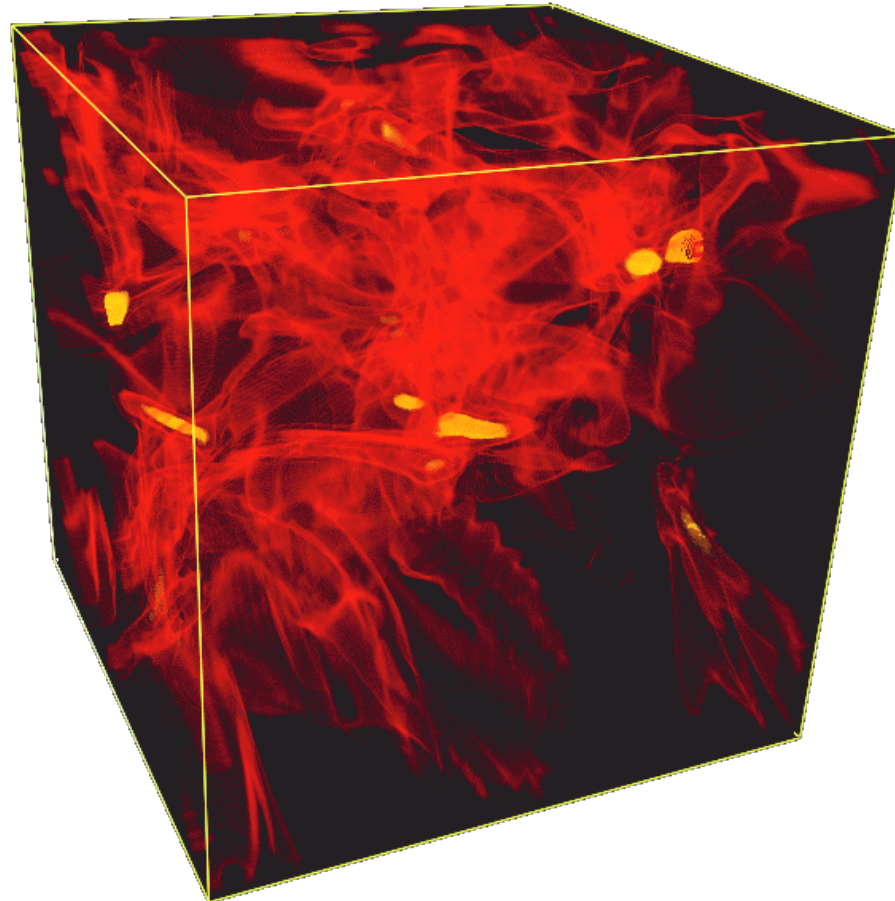


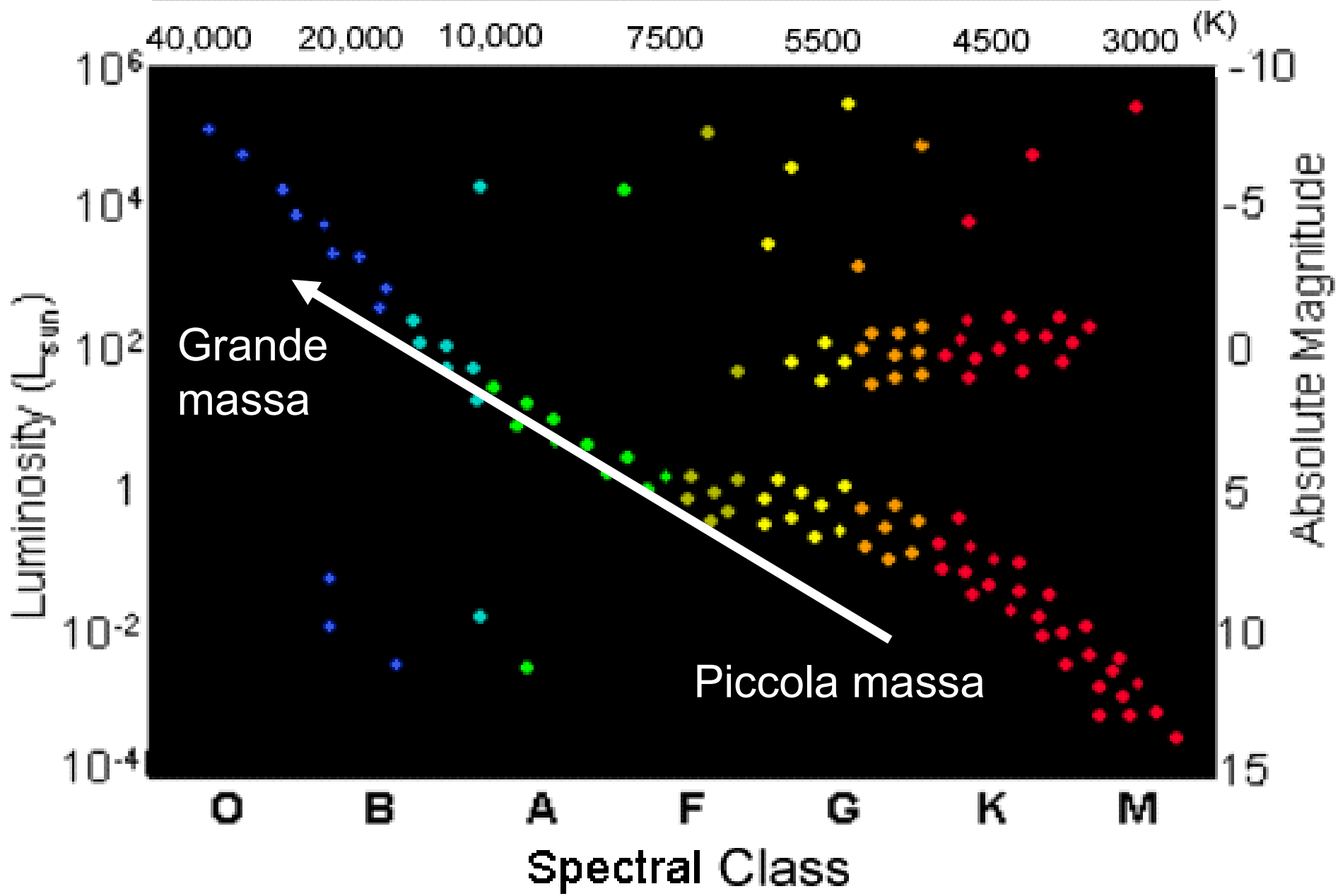
Immagine infrarossa da *IRAS*

Alcune domande sulla Formazione stellare

- **Perchè collassano i cores, ma non tutta la nube molecolare ?**
- **Cosa determina la dimensione dei cores, e aumenta la massa delle stelle che si formano?**
- **Cosa determina l'aggregarsi delle stelle, i raggruppamenti (cluster) o la formazione di sistemi multipli?**



Schematic Hertzsprung-Russell Diagram



Movimenti fuori dalla Sequenza Principale

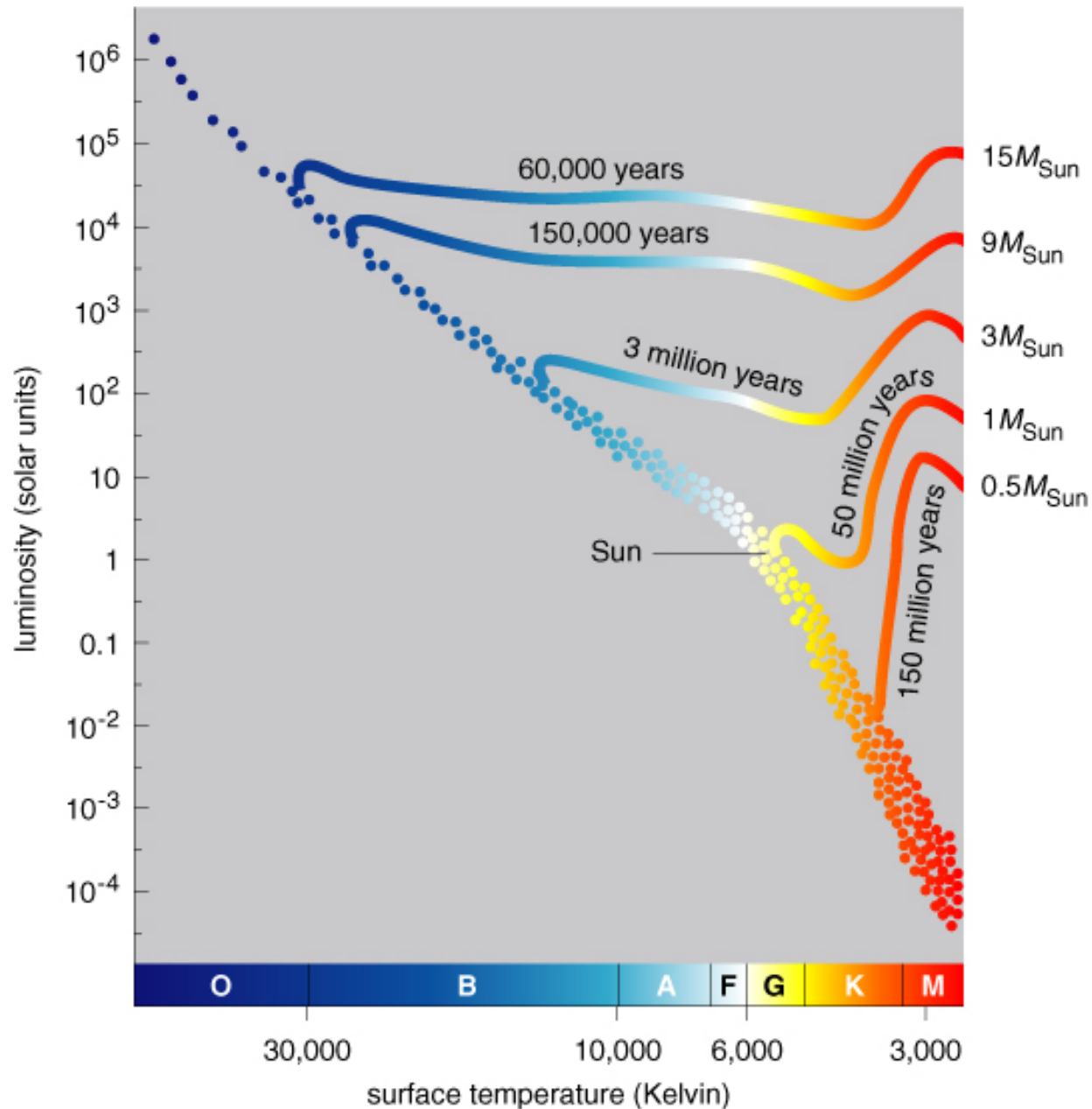


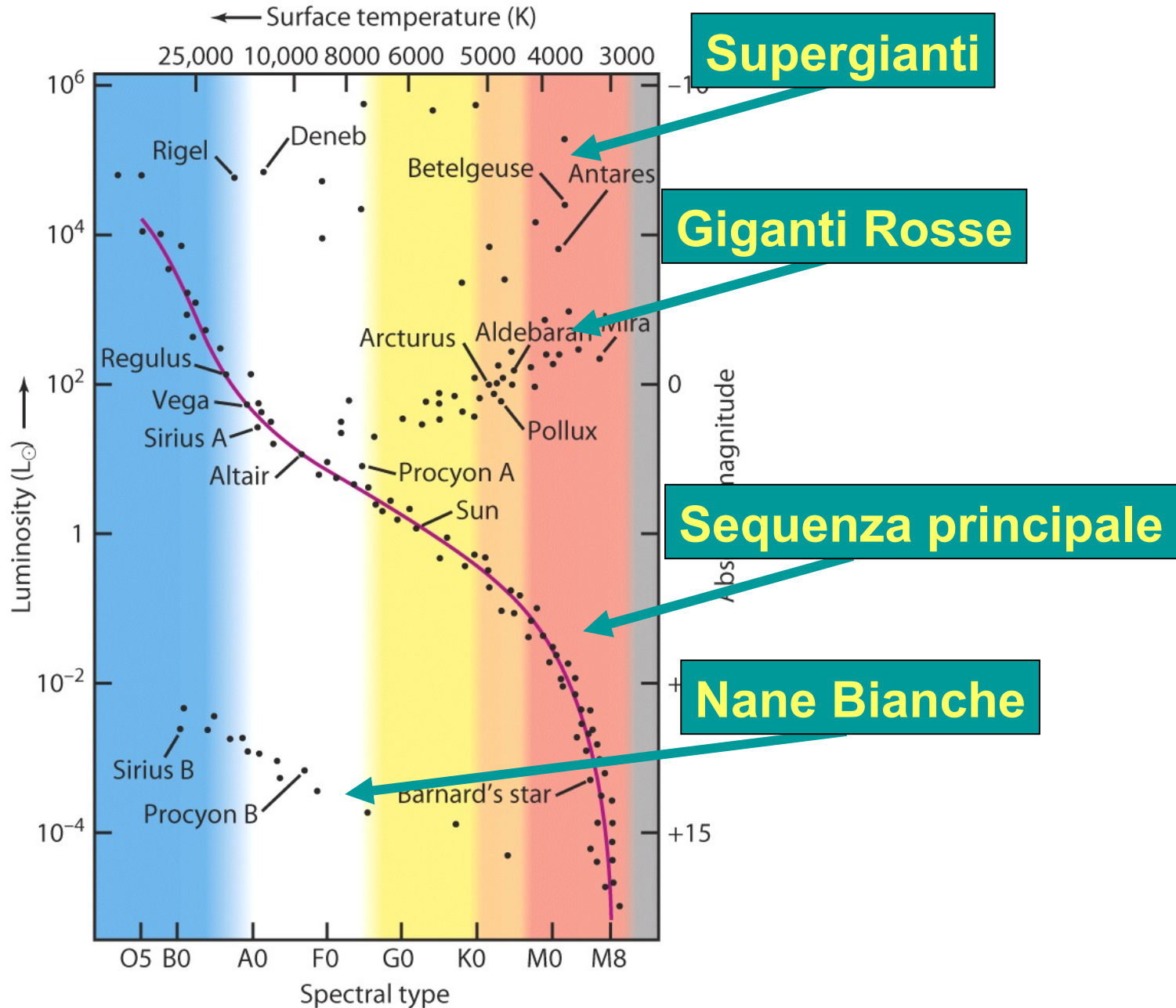
TABLE 11-1 Main-Sequence Lifetimes

Mass (M_{\odot})	Surface temperature (K)	Luminosity (L_{\odot})	Time on main sequence (10^6 years)	Spectral class
25	35,000	80,000	3	O
15	30,000	10,000	15	B
3	11,000	60	500	A
1.5	7,000	5	3,000	F
1.0 (Sun)	6,000	1	10,000	G
0.75	5,000	0.5	15,000	K
0.50	4,000	0.03	200,000	M

Luminosità = tasso a cui il combustibile viene consumato

Massa = quantità di combustibile disponibile

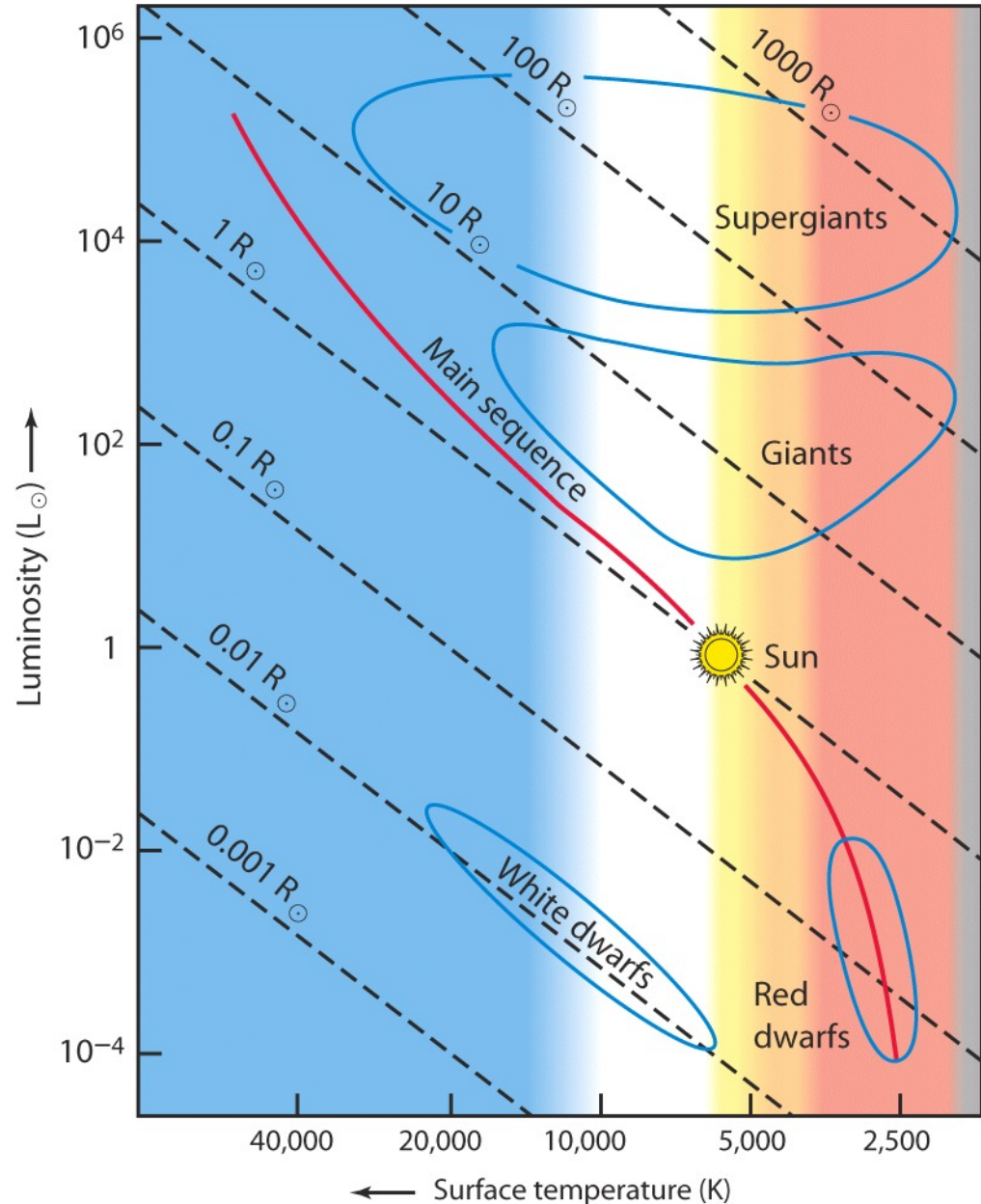
Diagramma Herzprung-Russell



Raggi delle Stelle

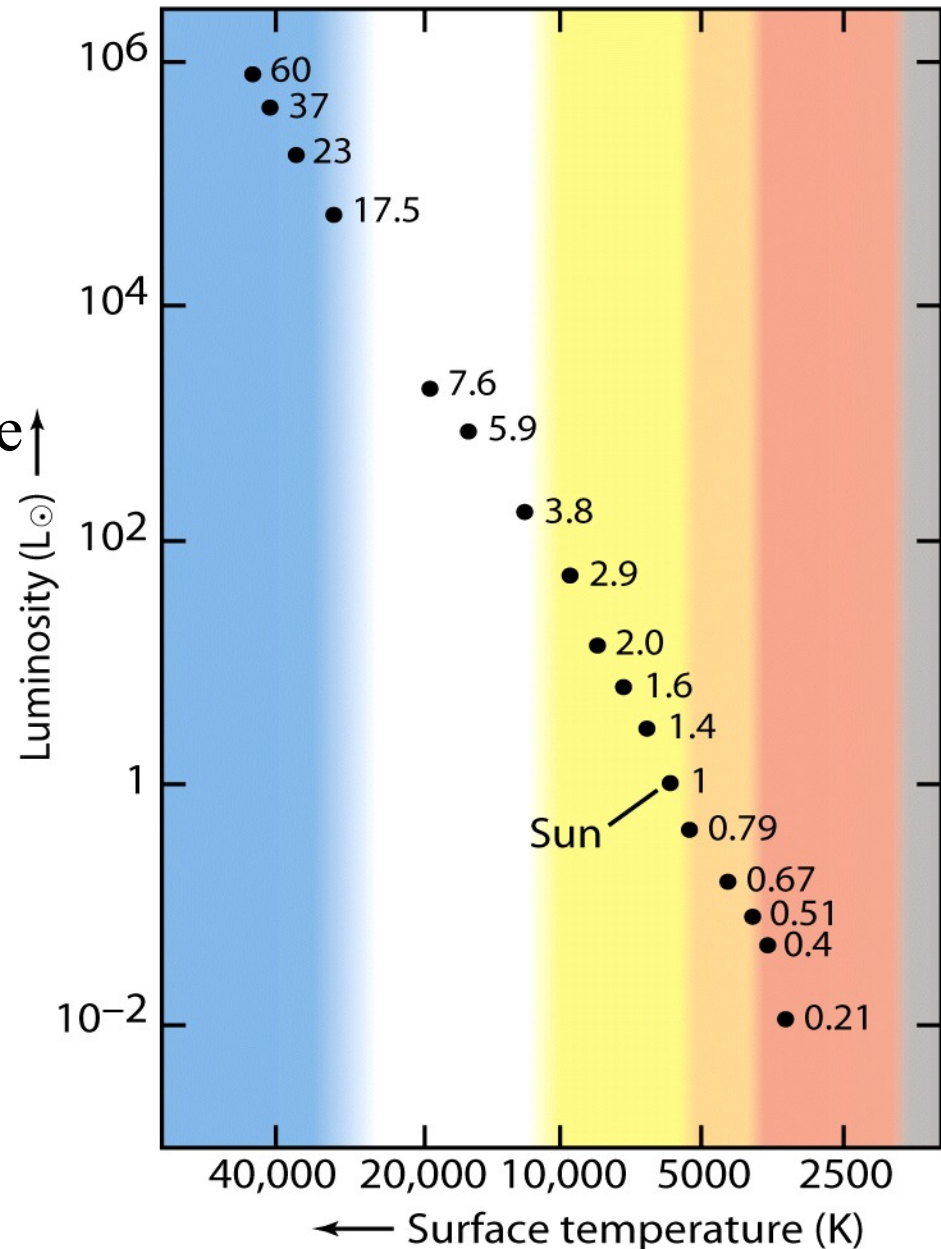
Stelle con temperature superficiali maggiori (a parità di raggio) sono più brillanti (Stephan-Boltzmann), e devono spostarsi verso l'alto.

Stelle con la stessa temperatura ma più brillanti devono essere più grandi.



Relazione Massa-Luminosità

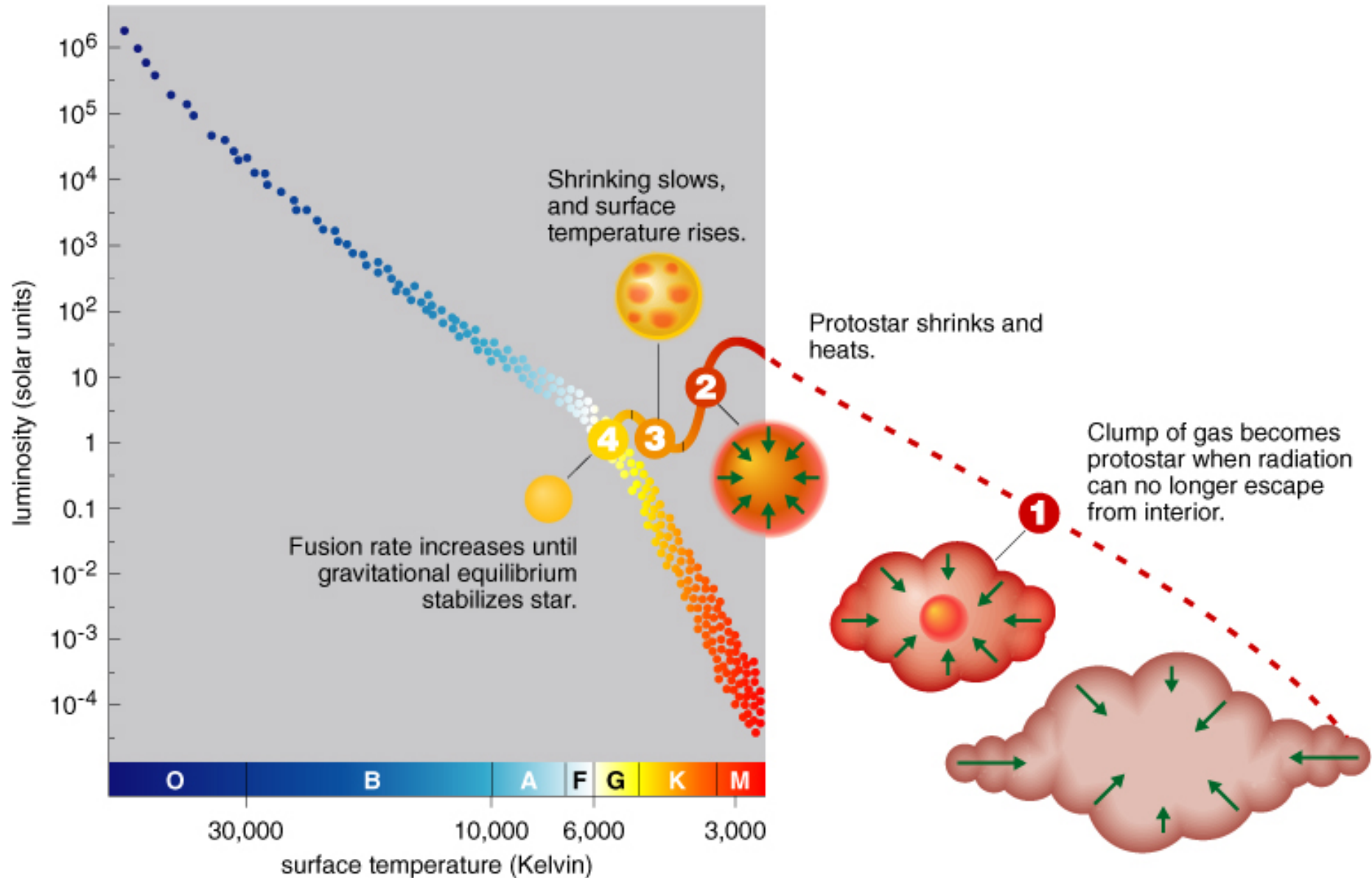
- Dati sulle binarie forniscono una relazione per la massa delle stelle della sequenza principale.
 - La luminosità è proporzionale ↑ alla $M^{3.5}$
 - Esempio:
 - $M = 3$ masse solari – luminosità = $47 \times L_{\text{Sole}}$
- ∇ → Intervallo in luminosità più grande che per la massa



Dal Diagramma HR si ricava il ciclo di vita delle Stelle!

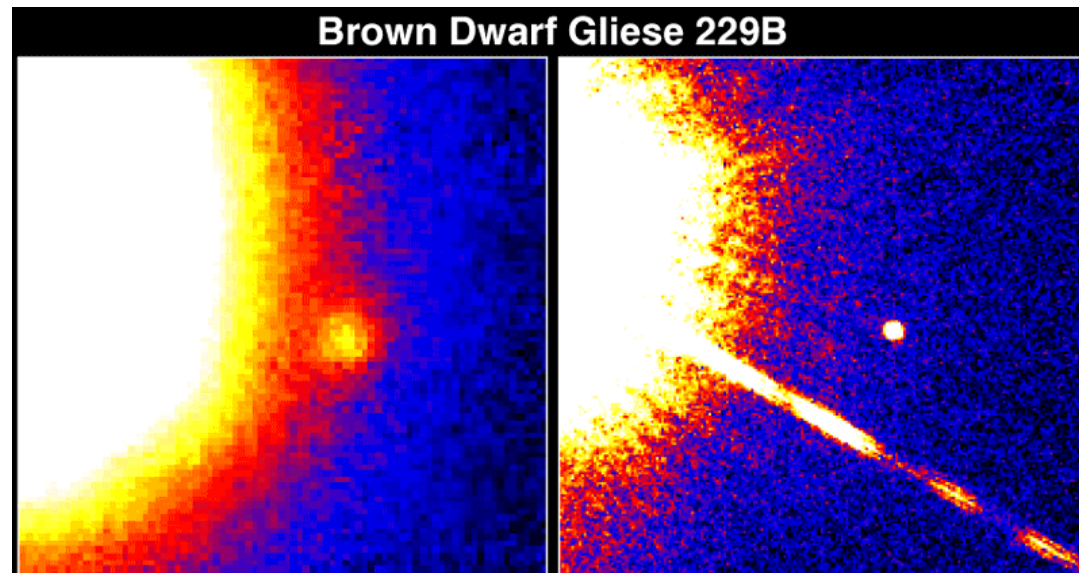
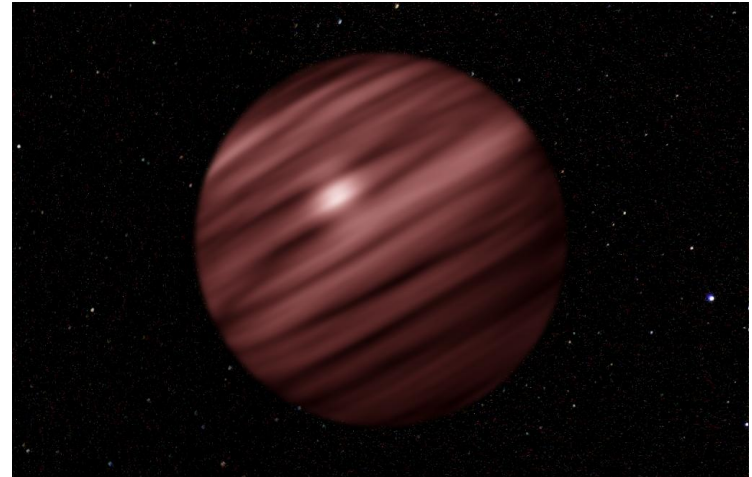
- È sulla Sequenza Principale che le stelle trascorrono la maggior parte della loro vita.
- Esempio: evoluzione del Sole sul Diagramma HR
- Stelle di grande massa hanno vita più breve di quelle con massa minore

Movimenti lungo la Sequenza Principale



Nane scure: $M < 0.08 M_{\text{Sole}}$

- Oggetti con meno di 80 masse di Giove.
- La densità e temperatura centrale sono insufficienti per innescare la fusione nucleare.
- Sono stelle mancate, gradualmente si raffreddano e contraggono.



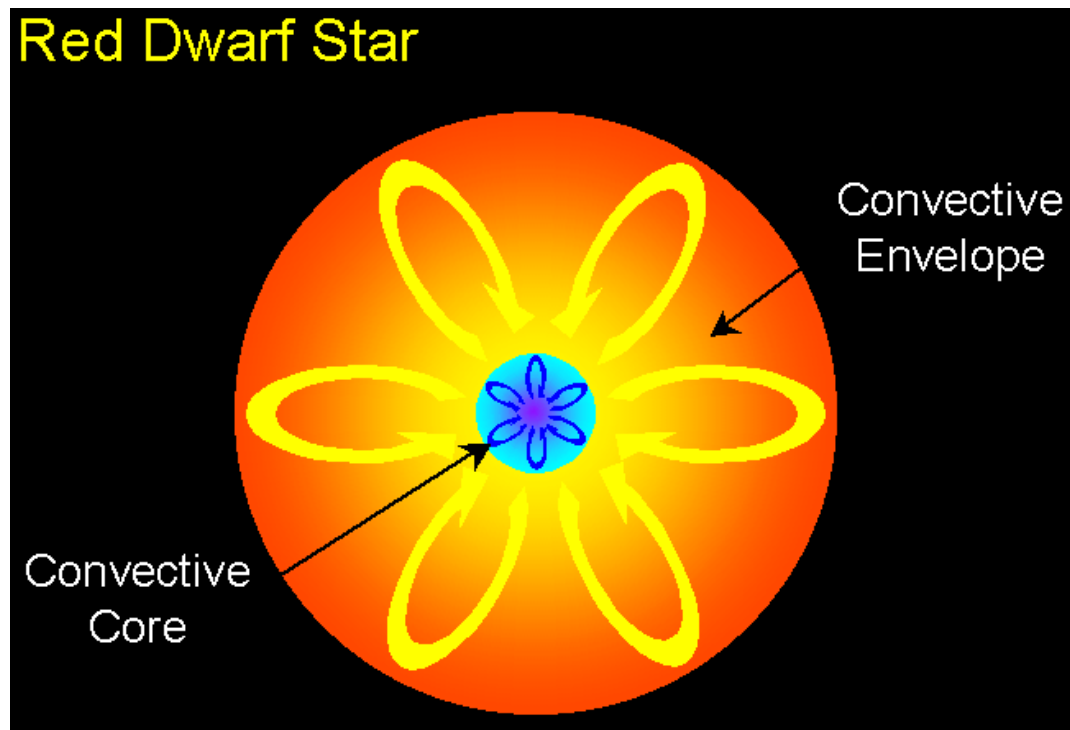
Brown Dwarf Gliese 229B

Palomar Observatory
Discovery Image
October 27, 1994

Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2
November 17, 1995

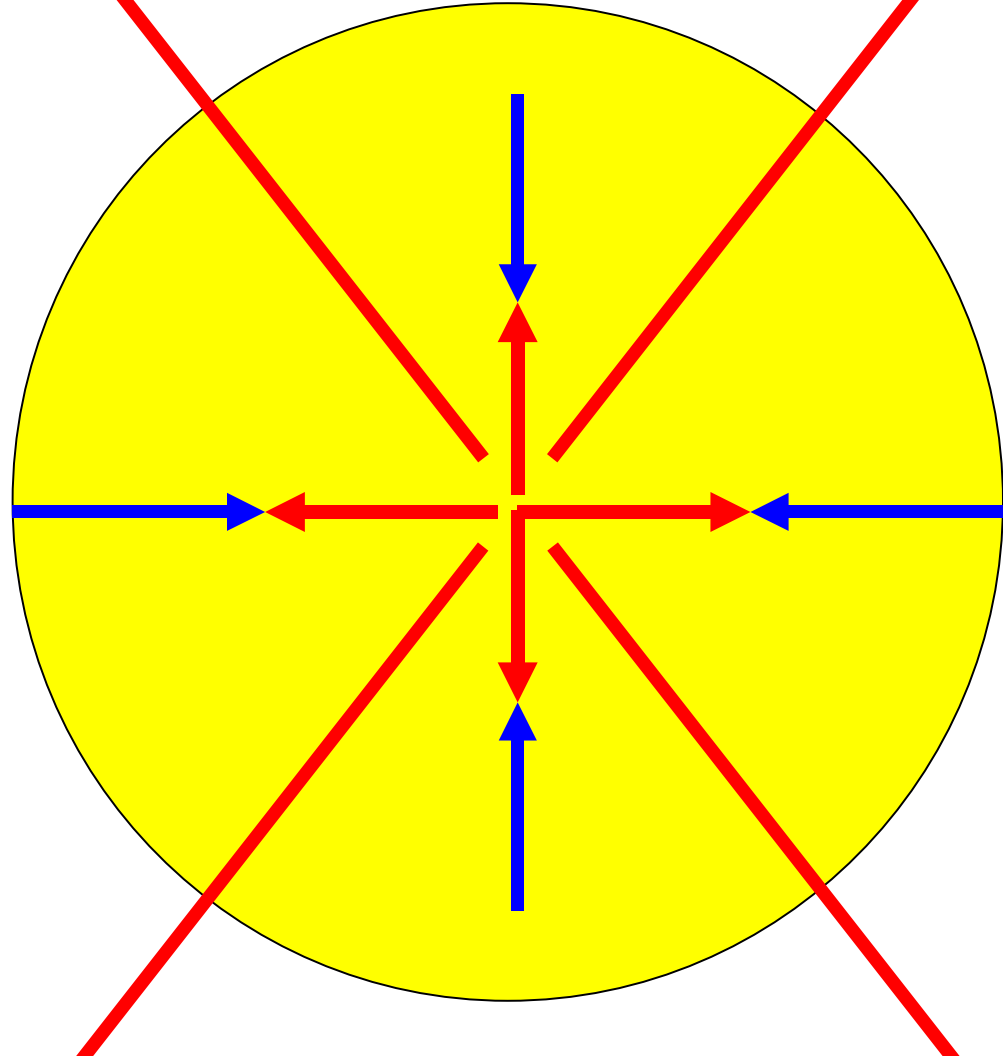
Nane Rosse: $0.08 M_{\text{Sole}} < M < 0.4 M_{\text{Sole}}$

- Interno totalmente convettivo, He prodotto dalla fusione uniformemente distribuito.
- Tutto l'H è convertito in He, poi la fusione si ferma.
- Queste stelle hanno una vita incredibilmente lunga – centinaia di miliardi di anni. Se l'Universo ha solo circa 14 miliardi di anni, nessuna Nana Rossa ha ancora concluso la sua vita.

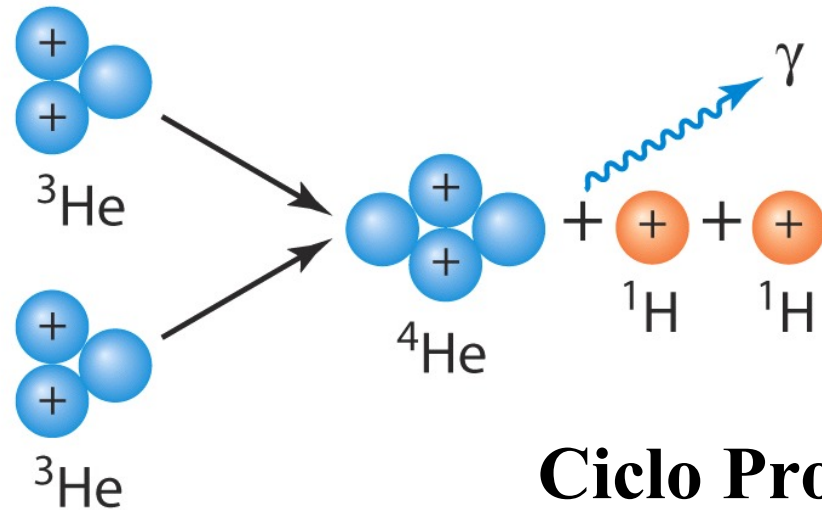
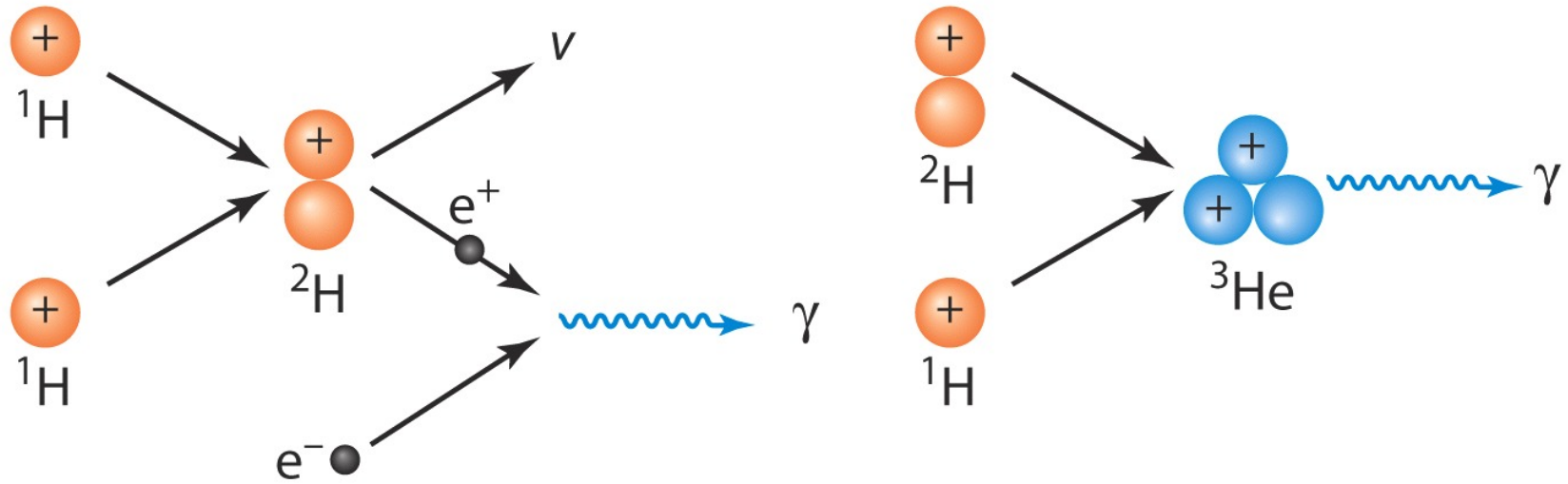


Equilibrio Idrostatico:

- La Pressione spinge verso l'esterno, la gravità verso l'interno – *equilibrio*
- Motivo per cui una stella di sequenza principale non collassa anche se è una grande massa di gas.
- La vita di una stella dipende interamente da questo *equilibrio*!



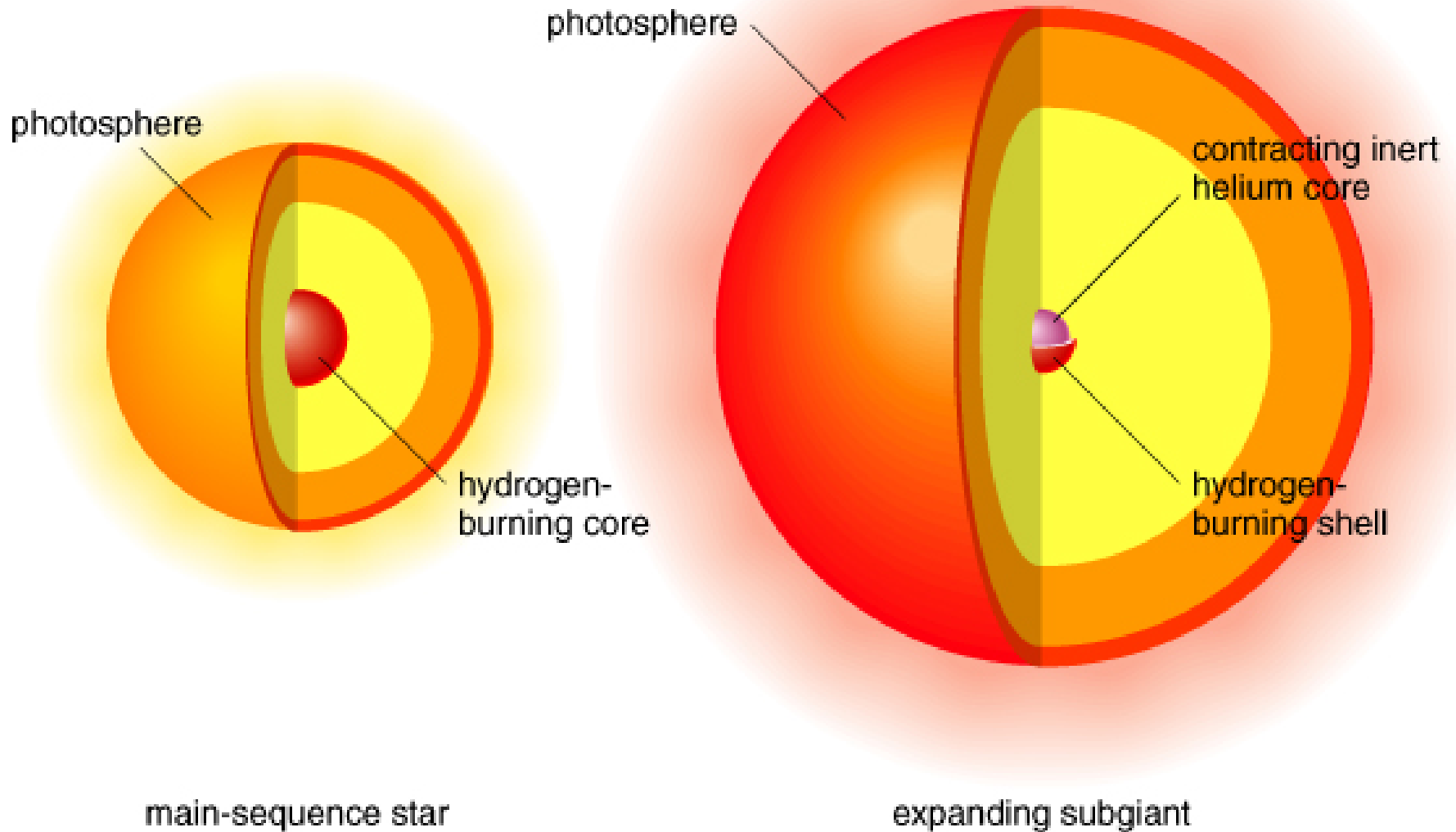
Cosa mantiene l'equilibrio?



Ciclo Protone-Protone

La Pressione viene dalla fusione. La Gravità comprime l'H finchè la fusione ha inizio.

L'Interno di una Gigante Rossa

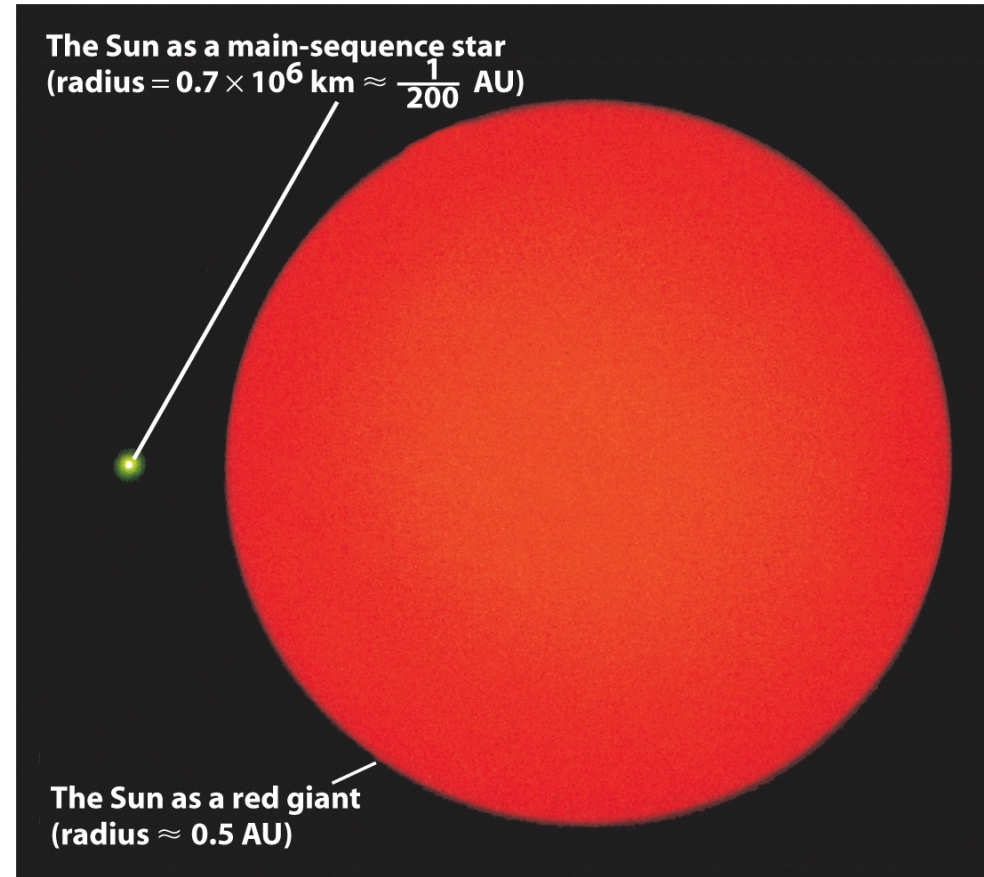


main-sequence star

expanding subgiant

.....e poi ?

- **Stella di piccola massa che ha:**
 - 1) **H che fonde in He nel core**
 - Sequenza principale
 - 2) **H che fonde in He in un strato (shell) intorno al core**
 - Gigante Rossa (100 x più grande, $R = 0.5 \text{ AU}$).
- ...e poi ? **Flash dell'He!**

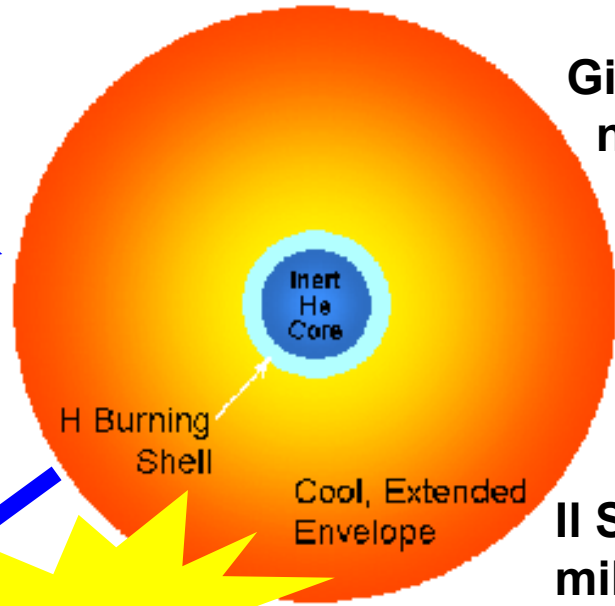


Evoluzione di una Stella di Massa-Solare



10^{10} yr

Sequenza Principale
H brucia nel Core
 $T_{\text{core}} \sim 16$ milioni di K

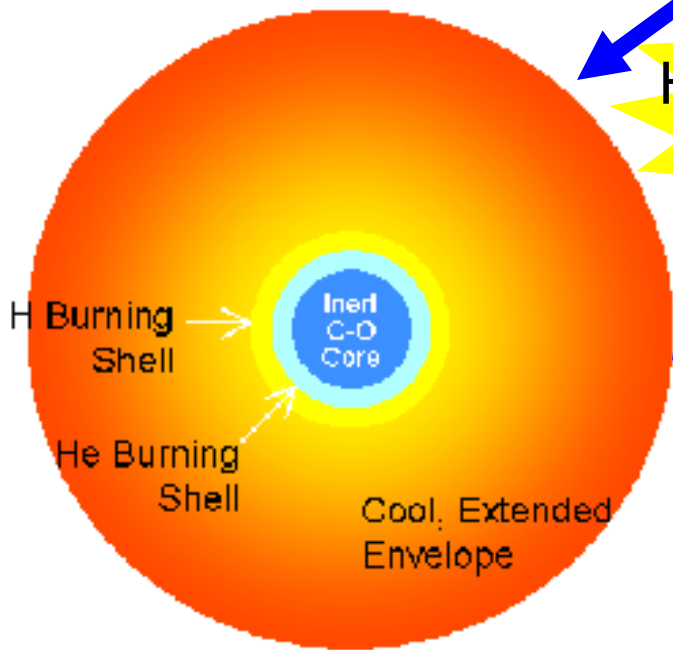


Gigante Rossa H brucia nell'involuppo esterno

10^9 yr

Helium flash

Il Sole ha ancora circa 5 miliardi di anni sulla sequenza principale.



He brucia nell'involuppo esterno



Nebulosa Planetaria e Nana Bianca

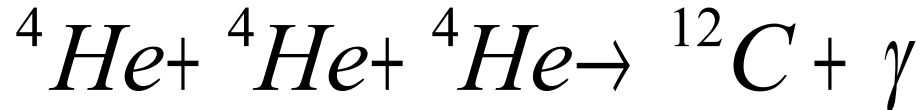
$$0.4 M_{\text{Sole}} < M < 4 M_{\text{Sole}}$$



Evoluzione di una stella di massa = M_{\odot}

Flash dell'He

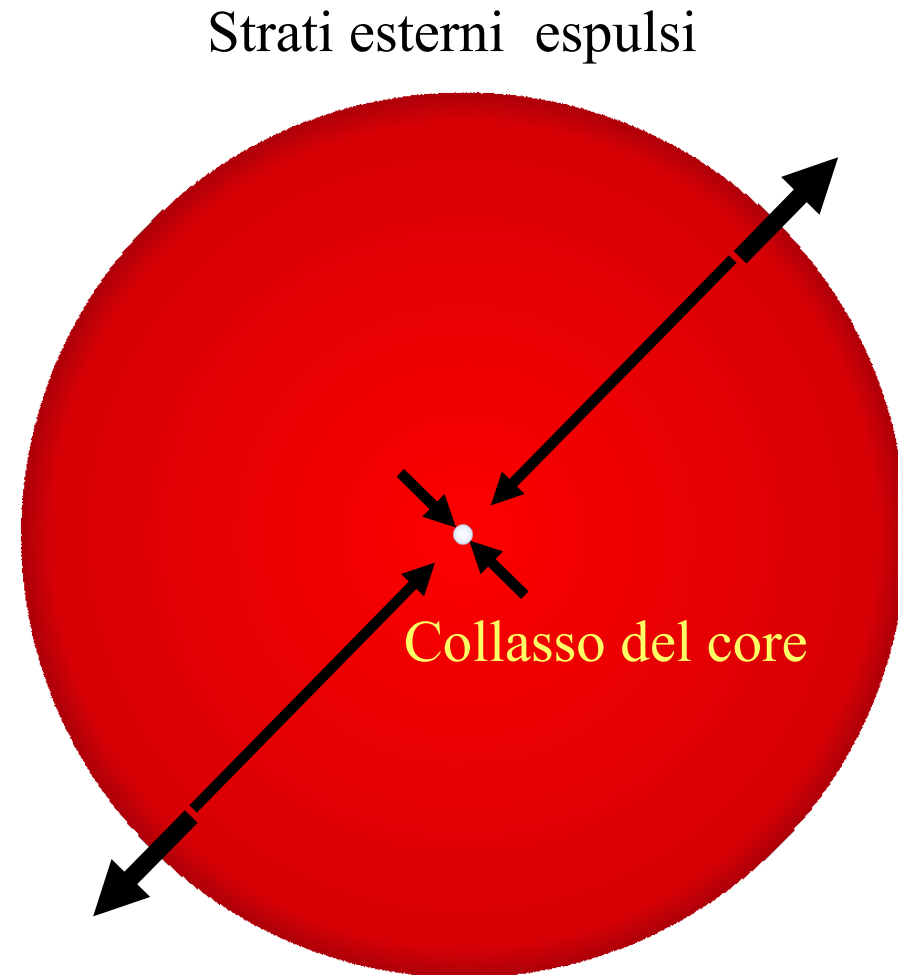
- Nella fase di gigante, cresce la temperatura del core
- Quando raggiunge 100 million K, He inizia a fondersi in Carbonio (C). Tre atomi di He fondono in un Carbonio e dei fotoni.



- La stella diventa nuovamente più grande
- Gli strati esterni si raffreddano
- .La bruciatura dell'He avviene di colpo ed è esplosiva

Espulsione di una Nebulosa Planetaria

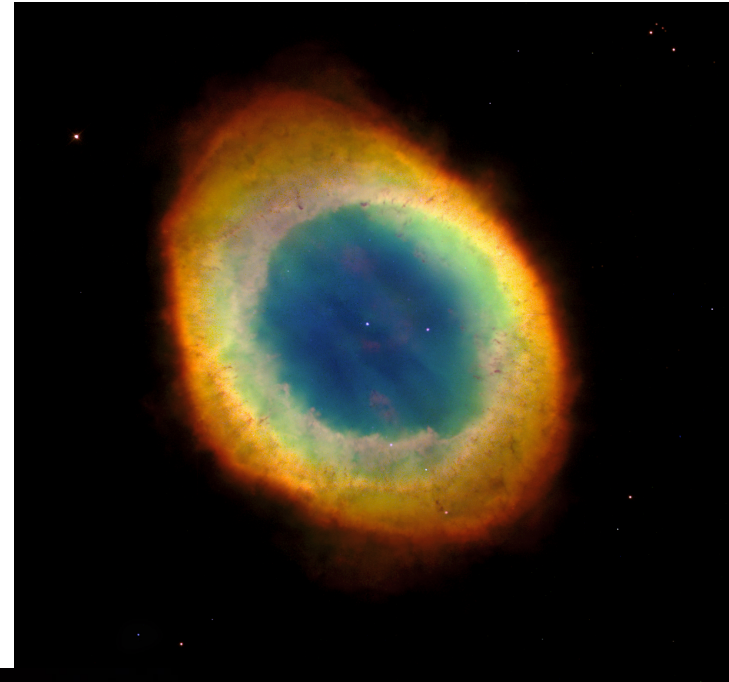
- La Fusione rallenta – l'He è bruciato in C e O, la pressione è insufficiente per fondere altri elementi.
- Il core collassa, la densità aumenta– cresce la T.
- Gli strati esterni sono spinti verso l'esterno dalla pressione di radiazione del core.
- Gli strati esterni sono quasi tutti espulsi.
- Il core (una Nana Bianca !) consiste di “ceneri” dalla fusione He – C & O.



Nebulose Planetarie



Hourglass Nebula

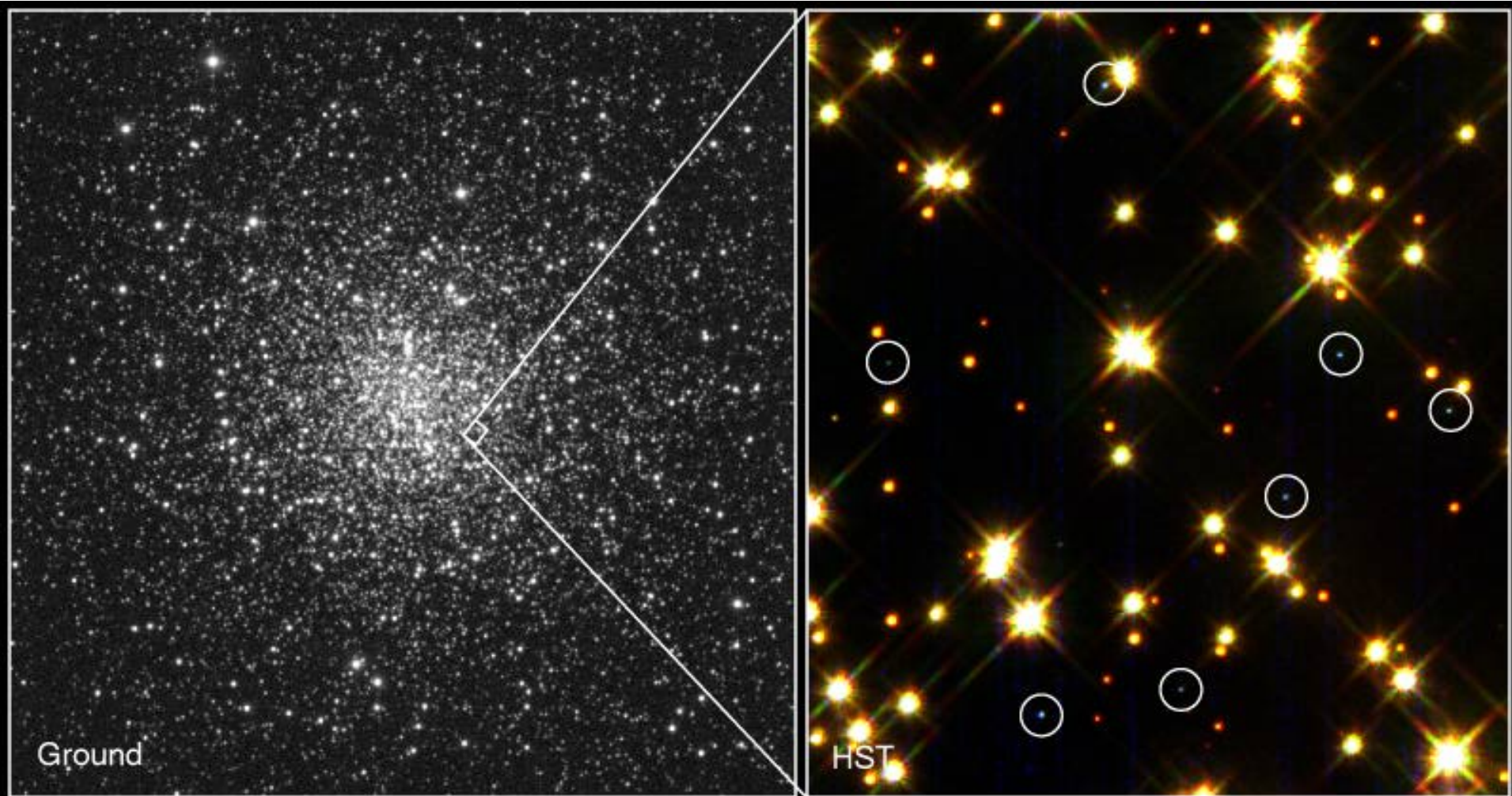


Ring Nebula



Cat's Eye Nebula

Nane Bianche!



White Dwarf Stars in M4

HST · WFPC2

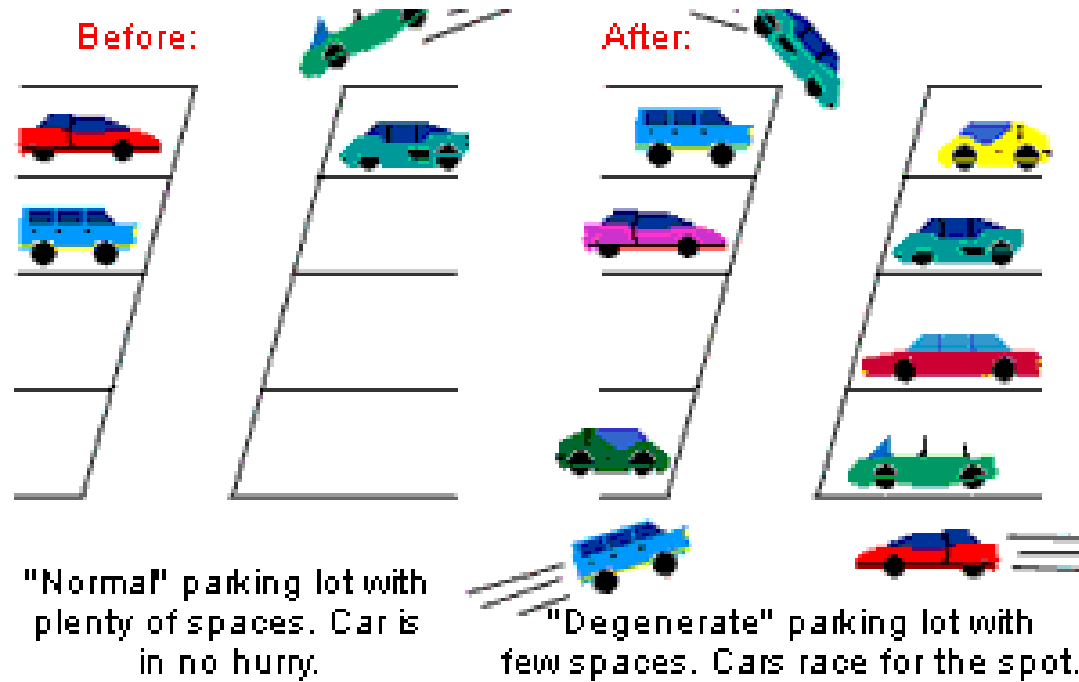
PRC95-32 · ST ScI OPO · August 28, 1995 · H. Bond (ST ScI), NASA

Cosa sostiene le Nane Bianche?

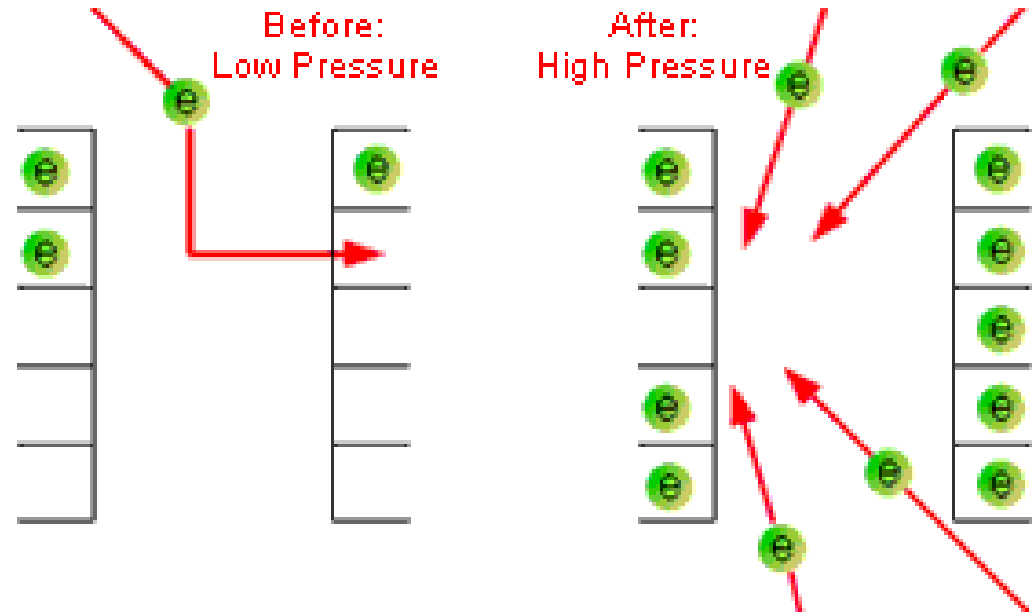
- La fusione nucleare si è fermata, la gravità prevale.
- Gli elettroni sono compressi in stati degeneri.
- Elettroni vicini non possono occupare gli stessi stati energetici.
- La degenerazione elettronica genera pressione che contrasta la gravità.

Pressione di Degenerazione

- ▶ Gli Elettroni sono costretti ad occupare i livelli energetici superiori più del normale – tutti i livelli inferiori sono occupati



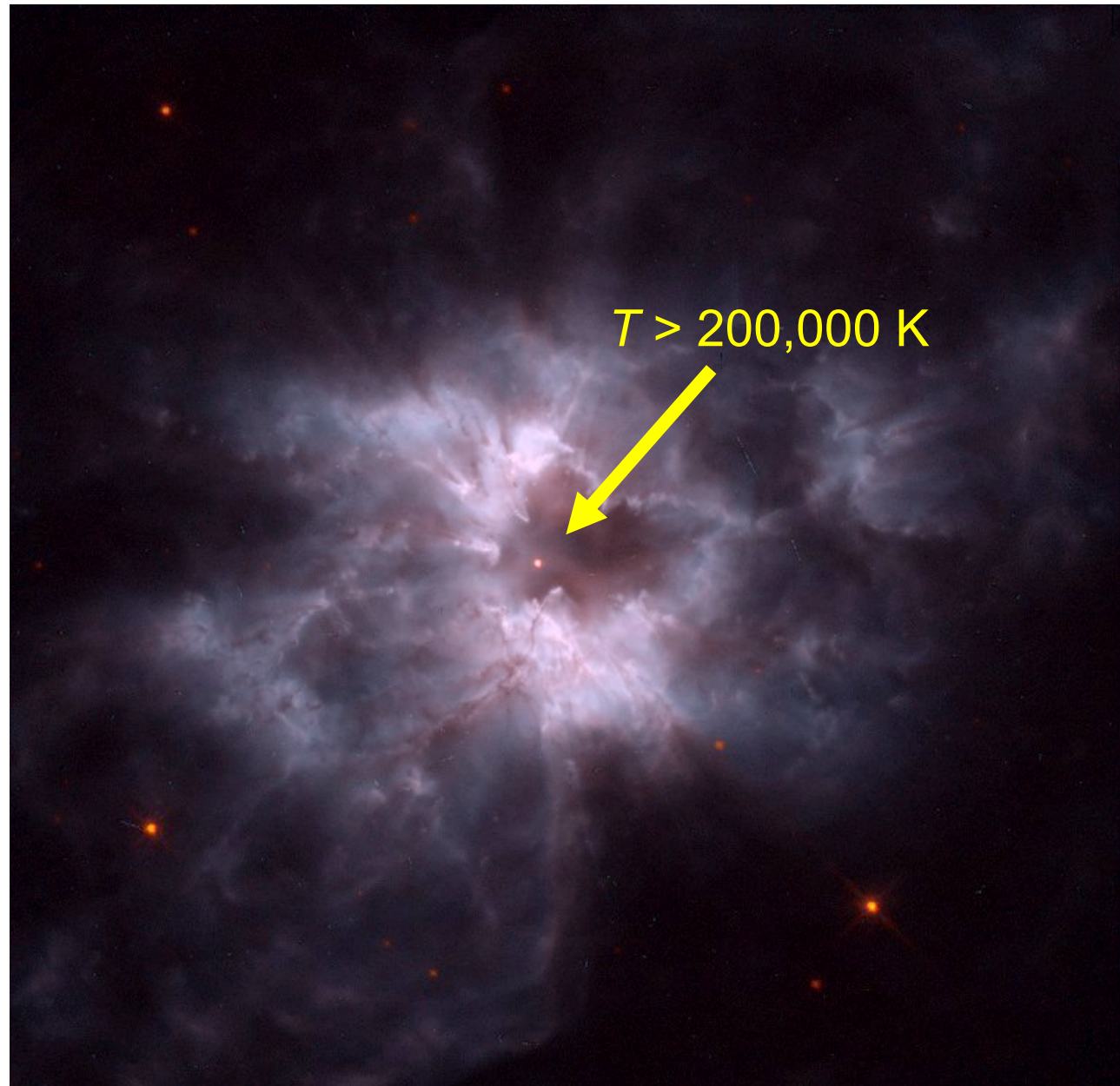
- ▶ L'effetto si traduce in pressione



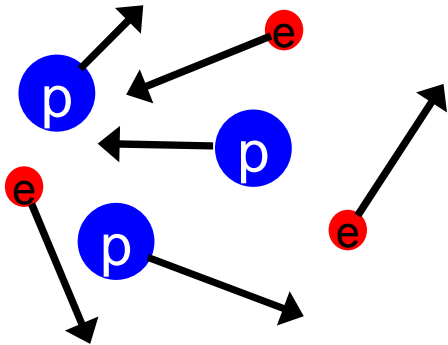
Nana Bianca e Nebulosa Planetaria

- **La Nana Bianca perde dal 20 a più del 50% della sua massa**
- **Mentre i gas si espandono, sono illuminati dall'interno dalla Nana Bianca**

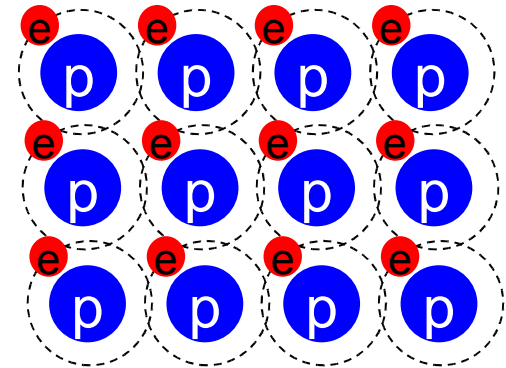
NGC 2440



Degenerazione Elettronica

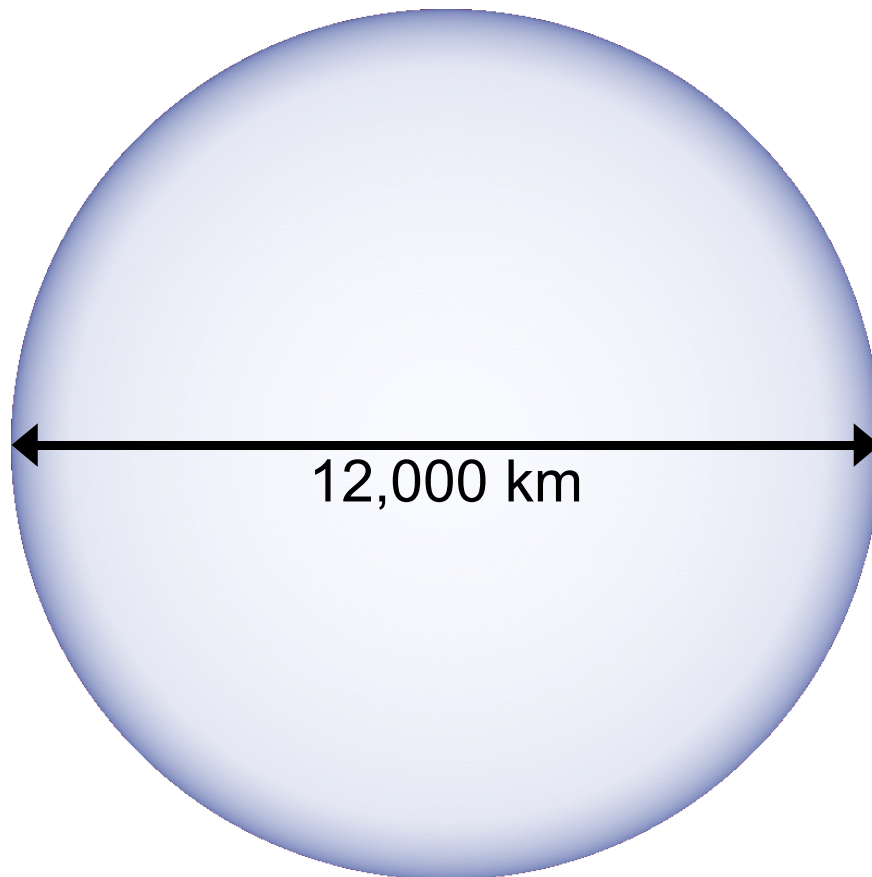


Materia nel core di
una stella normale



Degenerazione
Elettronica: materia in
una Nana Bianca
1 ton per cm cubico

Dimensioni Relative di una Nana Bianca



Nana Bianca – che pesa
circa 0.7 Masse Solari

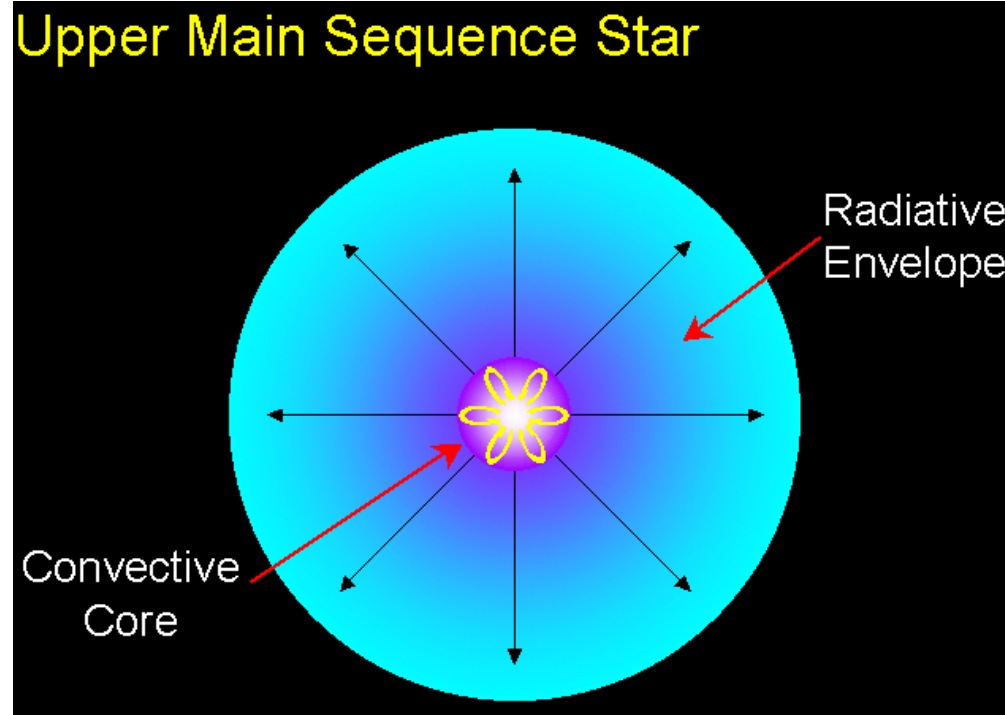
$$4 M_{\text{Sole}} < M < 8 M_{\text{Sole}}$$



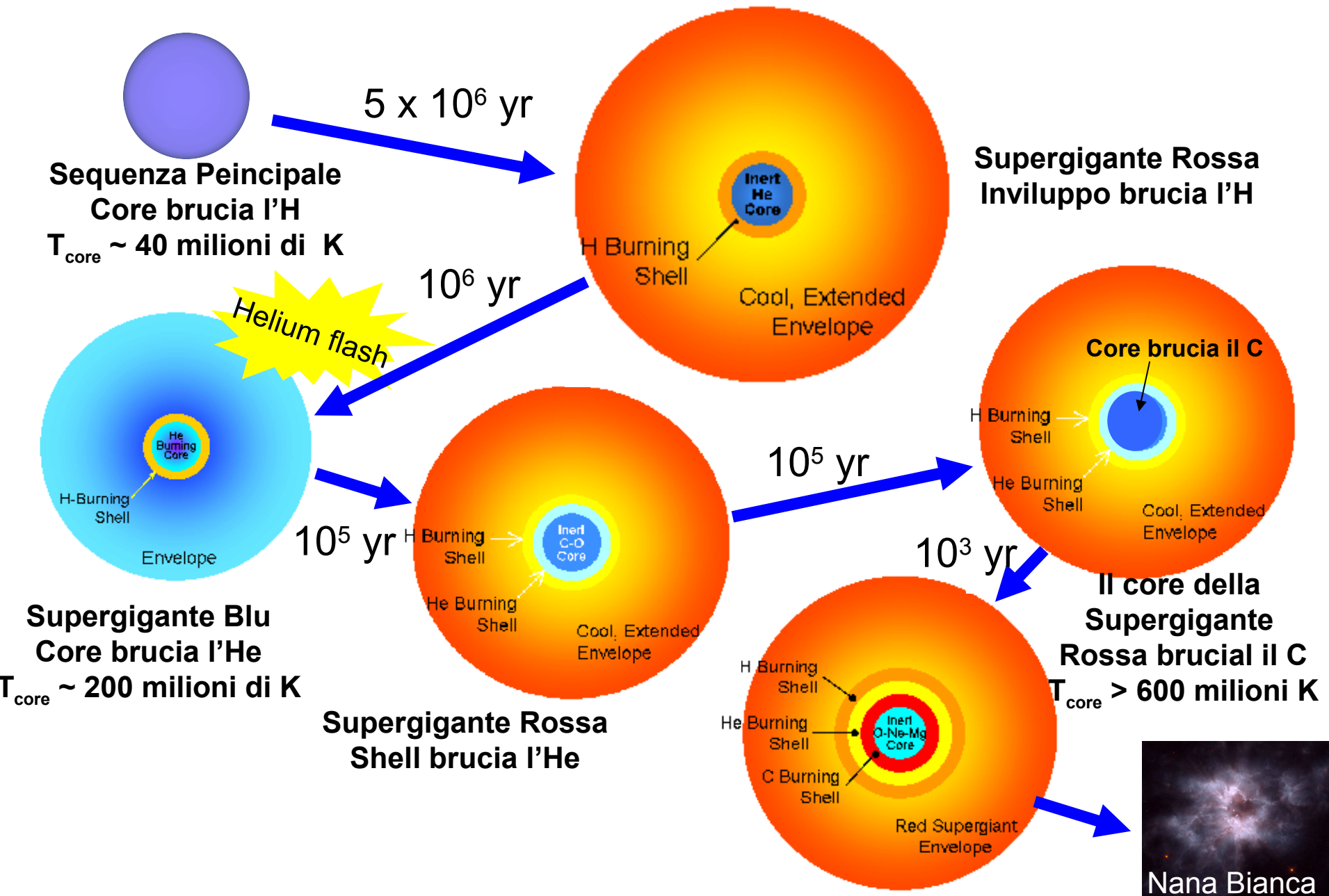
Evoluzione di una stella di massa intermedia

Quando finisce l'H ?

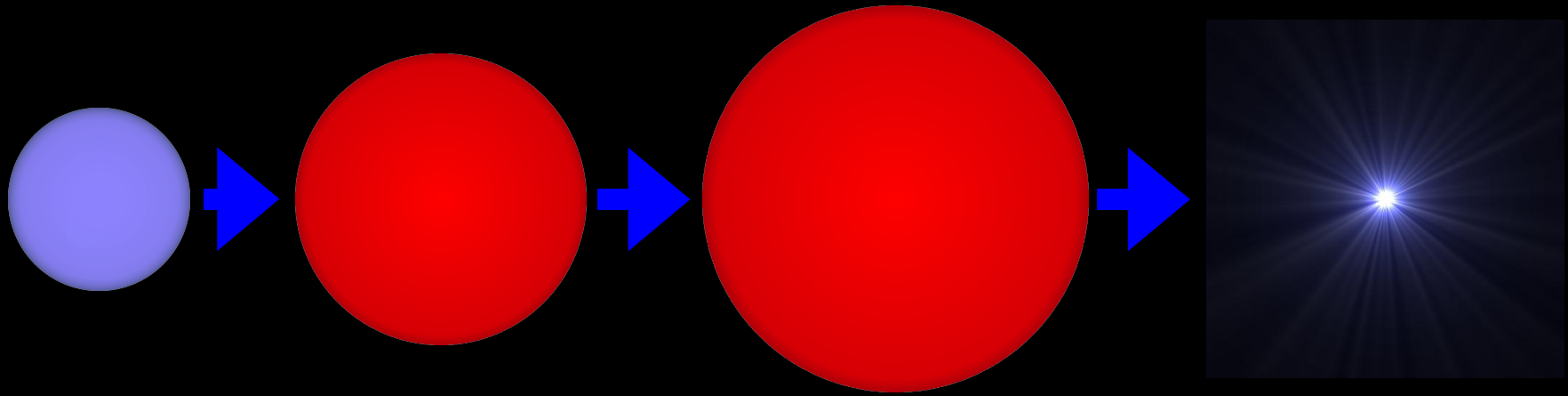
- Le stelle più massive hanno core convettivi ed involucri radiativi, molto simili a quelle di piccola massa nei primi stadi.
- Prima brucia l'H nel core— non ancora abbastanza calore per bruciare l'He
- Il core collassa un pò— inizia la combustione dell'H nell'involucro (intorno ad un core inerte di He).
- Questo ferma il collasso, l'involucro esterno espande rapidamente e la stella diventa una Supergigante Rossapoi...



Evoluzione di una stella di Massa Intermedia (> 4 M_{Sole})



Fine di una Stella Massiva



**10 M_{Sole} stella
di sequenza
principale**

**Supergigante
Rossa combustione
dell'He**

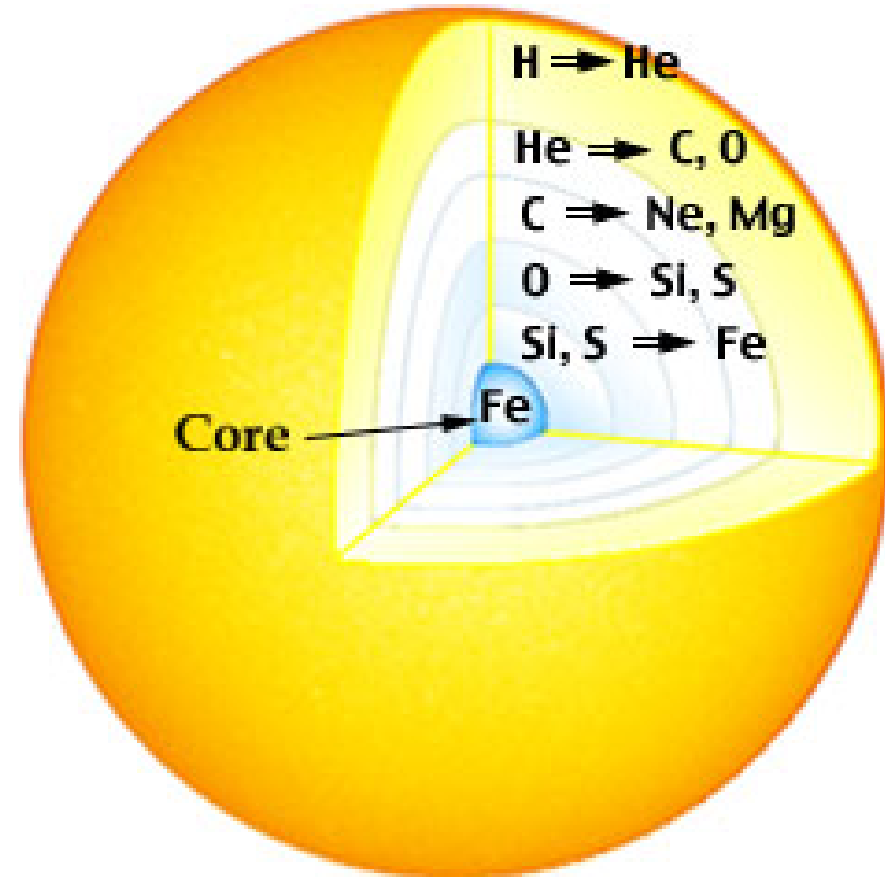
**Altre fasi da
supergigante**

Supernova core-collapse

Stelle di grande Massa

- Simili alle stelle di massa intermedia. La massa maggiore permette di “bruciare” atomi di elementi sempre più pesanti durante il processo di fusione.
- Finchè si forma il Fe – oltre ci vuole energia per formare atomi più pesanti.

Stadio	Temperatura (milioni di K)	Durata
Fonde l'H	40	7 milioni yr
Fonde l'He	200	500,000 yr
Fonde il C	600	600 yr
Fonde il Ne	1,200	1 yr
Fonde l'O	1,500	6 mesi
Fonde il Si	2,700	1 giorni



$$M > 8 M_{\text{Sole}}$$



Evoluzione di una stella di grande massa



Evoluzione di una stella che esplode come SN



THE CRAB NEBULA

Supernovae storiche

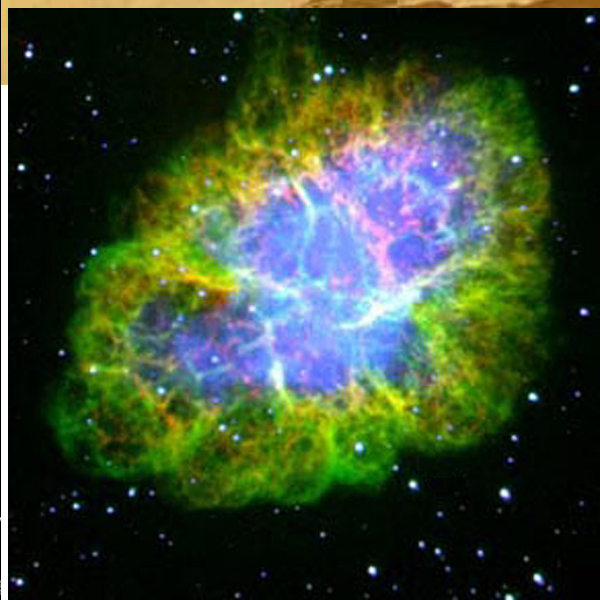
1054 AD

- Europa: nessuna traccia
- Cina: “stella ospite”
- Popolo Anasazi

Chaco Canyon, NM: dipinto su roccia



凡十一日没三年三月乙巳出東南方大中祥符四年正月丁丑見南斗魁前天禧五年四月丙辰出軒轅前星西北大如桃速行經軒轅太星入太微垣掩右執法犯次將歷屏星西北凡七十五日入濁没明道元年六月乙巳出東北方近濁有芒彗至丁巳凡十三日没至和元年五月己丑出天關東南可數寸歲餘稍没熙寧二年六月丙辰出箕度中至七月丁卯犯箕乃散三年十一月丁未出天囷元祐六年十一月辛亥出參度中犯掩側星壬子犯九游星十二月癸酉入奎至七年三月辛亥乃散紹興八年五月守婁



Oggi, in quella zona di cielo: Crab Nebula—resti dell'esplosione di una supernova

11 Novembre, 1572
Tycho Brahe

“Stella Nova”

Visione Moderna in Raggi X:
resti di una esplosione di
supernova

