



Università
del Salento



Progetto Lauree Scientifiche

Attività formativa

Modulo 2

Gli oggetti dell'analisi spettrale: le stelle e la loro evoluzione

Vincenzo Orofino
Gruppo di Astrofisica

LE NEBULOSE (1)

Oltre alle stelle, nella Galassia sono presenti nubi di gas e polvere dette *nebulose*.

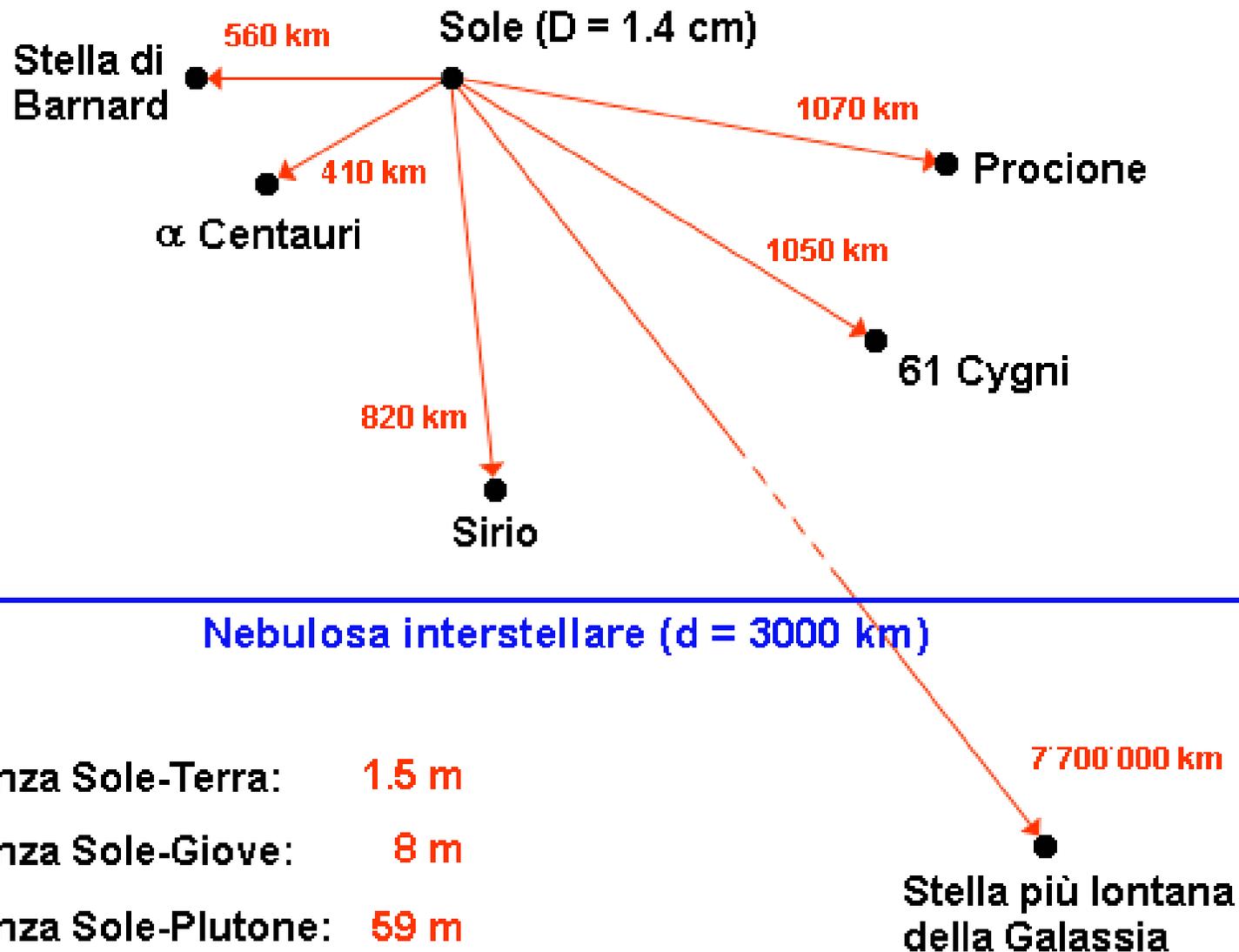
Il gas è composto da idrogeno (89%), elio (10%) ed altri elementi in tracce (carbonio, azoto, ossigeno).

La polvere è costituita da piccole particelle (*grani*) composte da silicati e materiali carboniosi.

Le nebulose hanno dimensioni enormi rispetto a quelle stellari:
 $D \sim 30 - 300$ anni-luce (1 anno-luce = $9.5 \cdot 10^{15}$ m); la densità del gas è dell'ordine dei 1000 atomi di idrogeno per cm^3 .

DIMENSIONI DELLE NEBULOSE

Scala 1 : 100 miliardi



M16 nella costellazione
del Serpente





M16 nella costellazione del Serpente

TIPI DI NEBULOSE

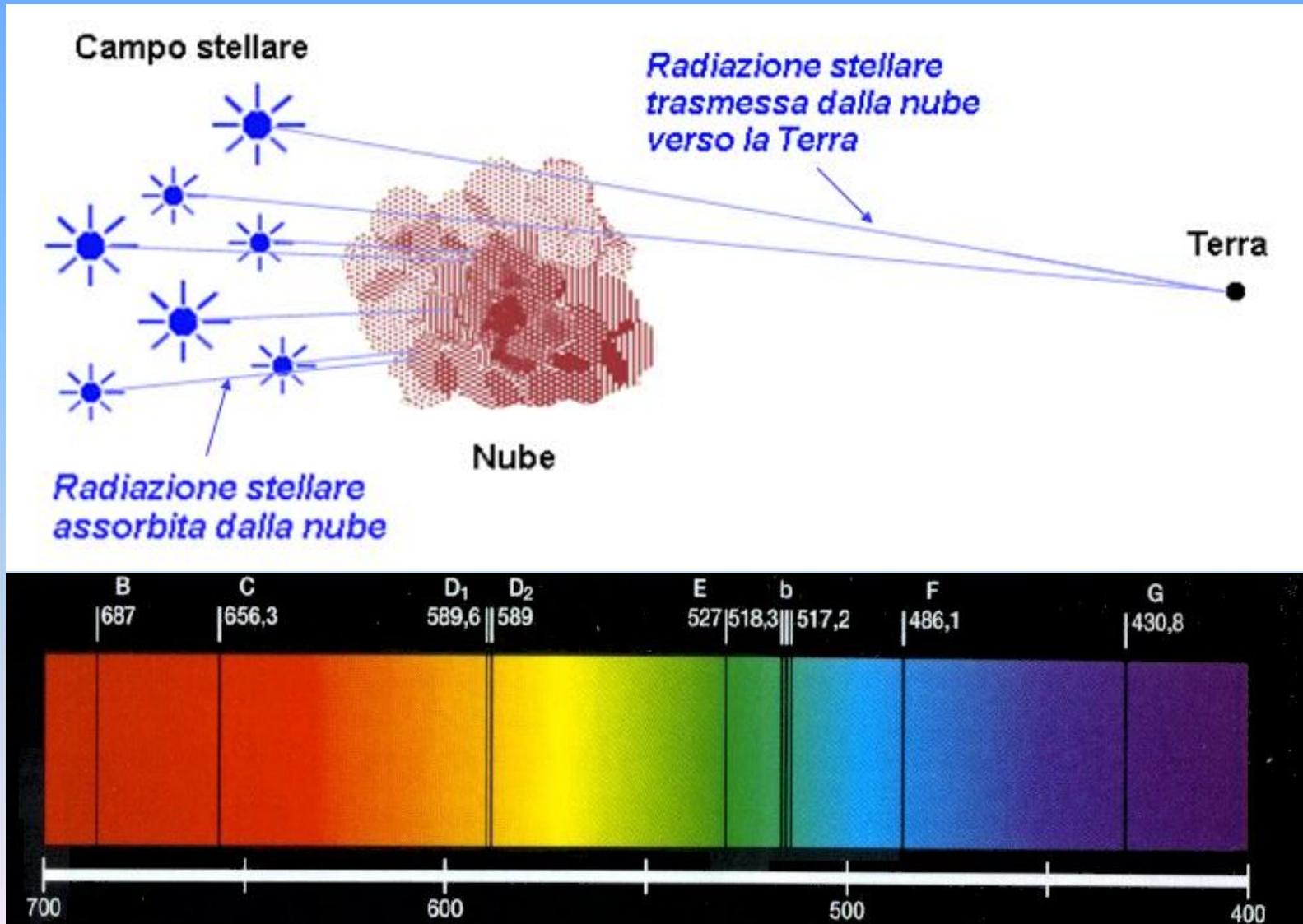
A seconda del modo in cui si rendono visibili, si dividono in:

- a) Nebulose oscure
- b) Nebulose in riflessione
- c) Nebulose in emissione



Nebulosa Laguna (M8) nella costellazione del Sagittario

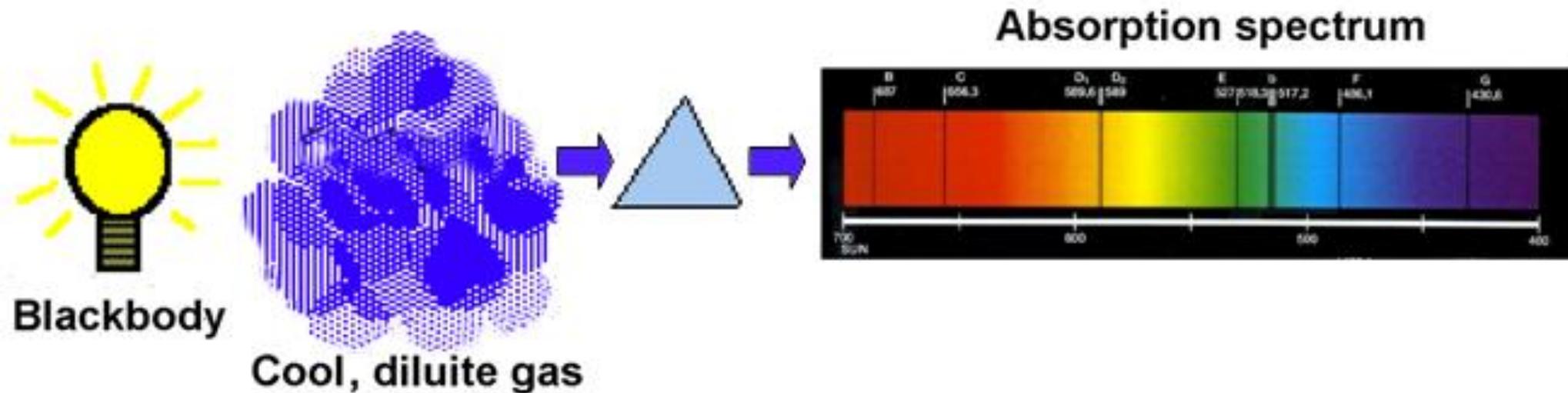
a) Nebulose oscure



LA SPETTROSCOPIA – Spettri di assorbimento

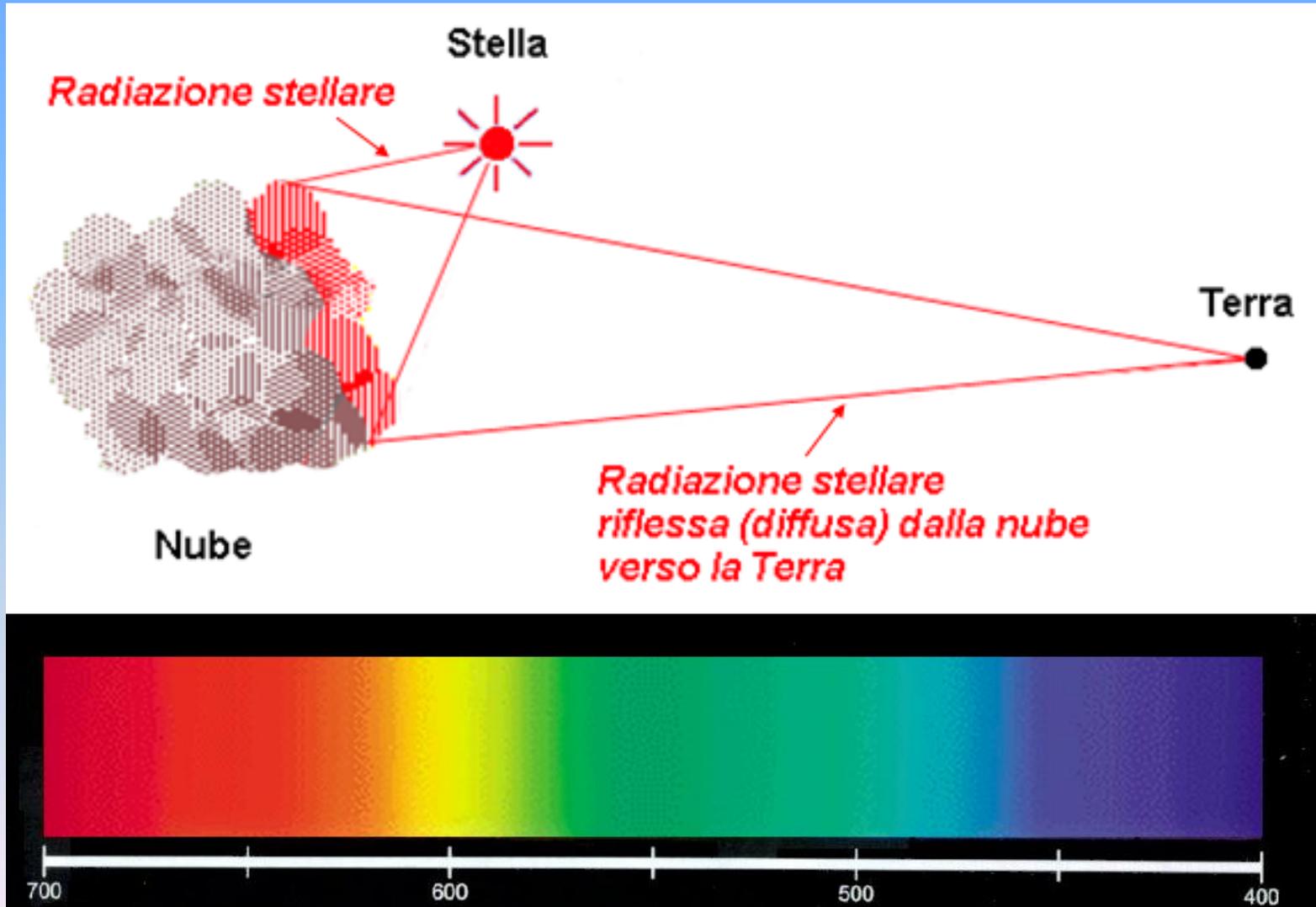
Gli *spettri d'assorbimento* sono spettri continui solcati da righe nere.

Si producono quando un fascio di luce attraversa un gas a temperatura inferiore a quella della sorgente.





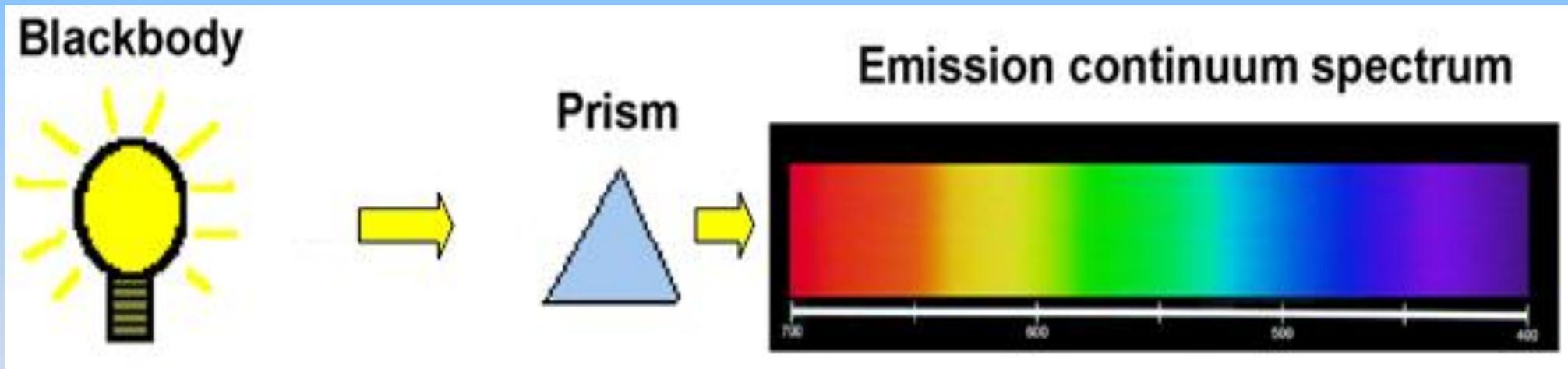
b) Nebulose in riflessione



LA SPETTROSCOPIA – Spettri di emissione

Gli spettri di emissione possono essere di tre tipi: *continui*, *a righe* e *a bande*.

Sono detti *continui* gli spettri dove sono presenti tutti i colori.

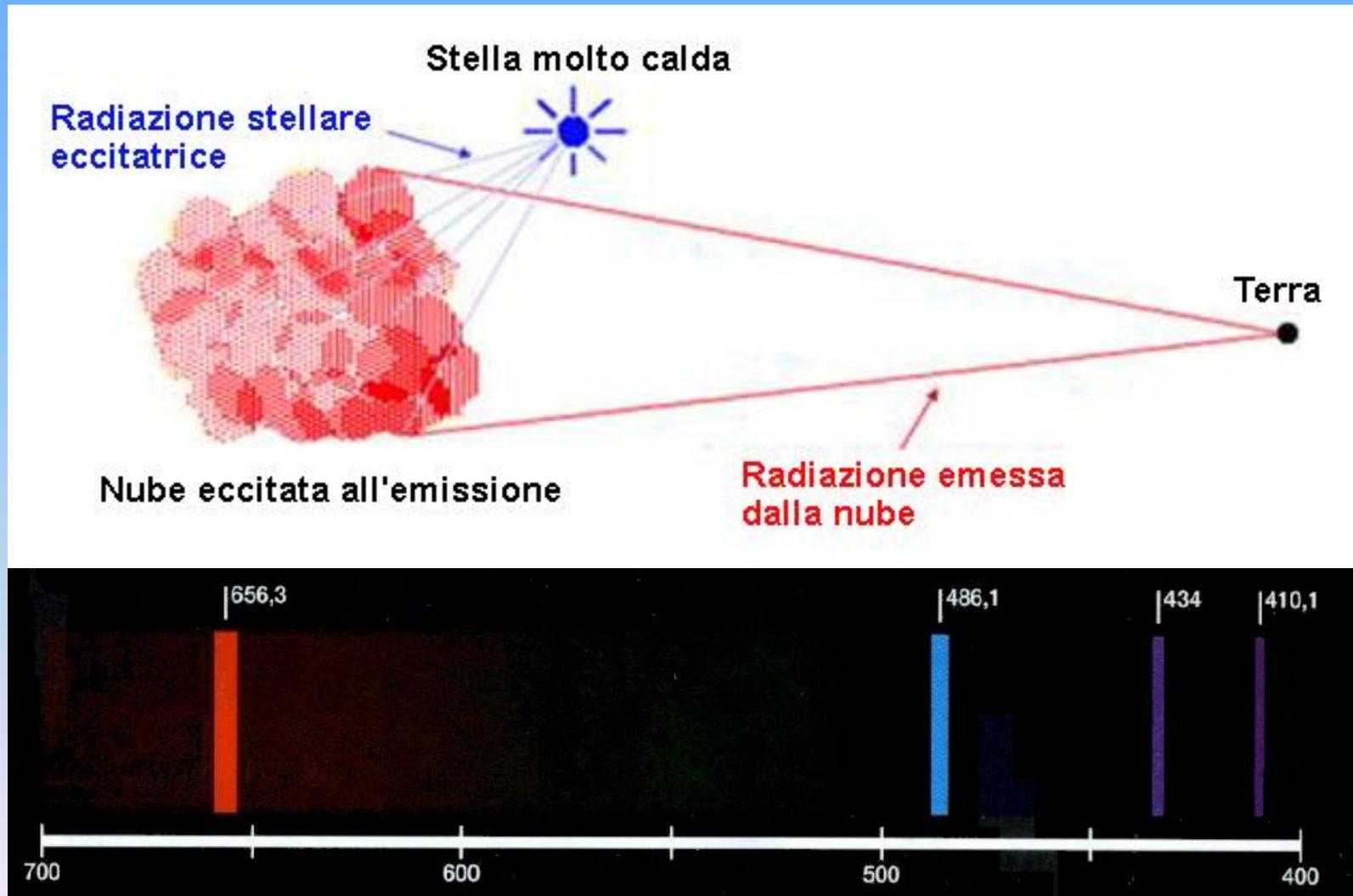


Sono emessi da tutti i solidi e liquidi incandescenti e da gas sottoposti a forti pressioni ed elevate temperature.



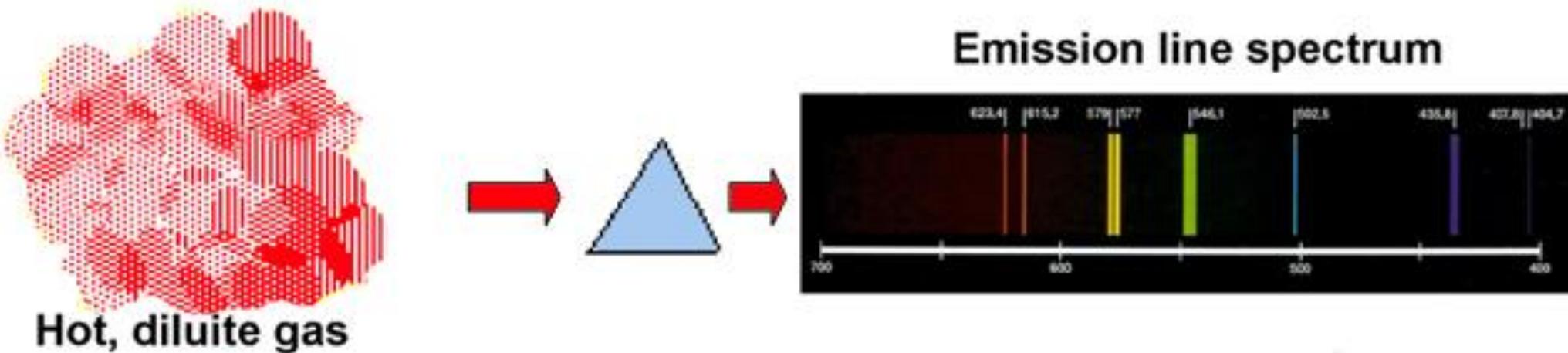


c) Nebulose in emissione



LA SPETTROSCOPIA – Spettri di emissione

Vengono detti *spettri a righe* quelli dove si osservano soltanto poche righe colorate su sfondo nero (immagini monocromatiche della fenditura dello spettroscopio)



Sono emessi da gas caldi a basse pressioni costituiti da molecole semplici.

Il numero di righe e la loro posizione sono caratteristici del gas.





Nebulose complesse

In una stessa nube possono coesistere varie parti che si comportano come nebulose dei tre tipi precedenti.

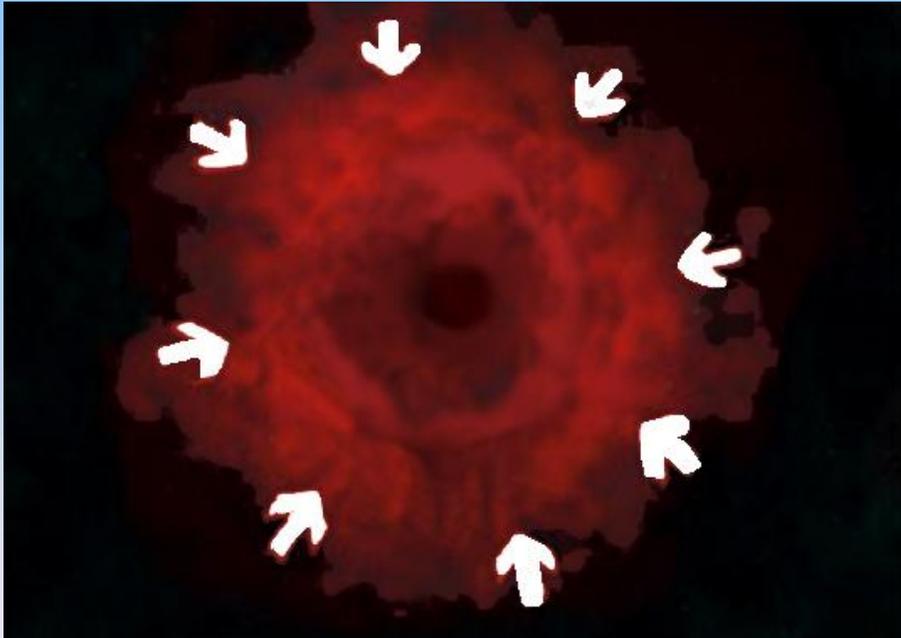
NGC 1977
nella costellazione
di Orione





LA NASCITA DELLE STELLE (1)

La densità delle nubi non è omogenea: a causa delle fluttuazioni casuali di densità, si creano addensamenti di materia che, per effetto della gravità, iniziano ad attrarre la materia circostante, accrescendosi rapidamente.



In breve tempo la nube si disgrega in genere in tanti frammenti in contrazione.

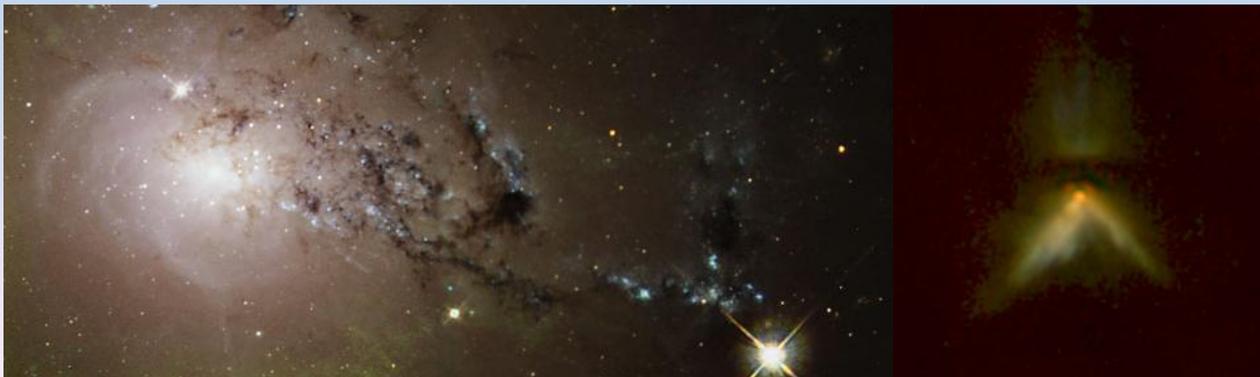
In ciascuno di questi frammenti la materia “cade” verso l’addensamento centrale la cui densità aumenta velocemente.

LA NASCITA DELLE STELLE (2)

Man mano che la densità del gas nelle parti centrali del frammento aumenta, anche la temperatura aumenta (*collasso adiabatico*).

Quando la temperatura al centro raggiunge i 5-6 milioni di gradi, si innescano le reazioni termonucleari che producono energia: è a questo punto che nasce una stella!

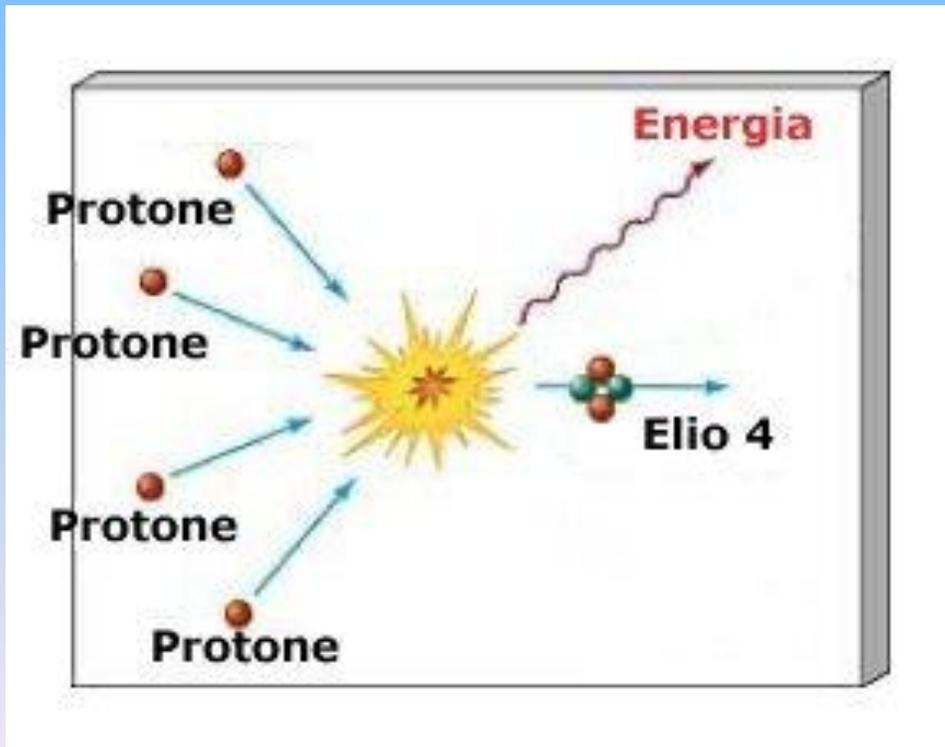
Da un'unica nube possono formarsi molte stelle, che all'inizio sono oscurate dai residui del frammento da cui sono nate.



Esempi di stelle appena formatesi

LE REAZIONI TEMONUCLEARI (1)

Nelle zone centrali (*nucleo*) di stelle come il Sole quattro nuclei di idrogeno (protoni) si fondono per formare un nucleo di elio secondo una catena di reazioni nucleari detta *ciclo protone-protone*.



Sono necessarie alte velocità (elevata temperatura) per vincere la repulsione di natura elettrostatica tra i protoni.

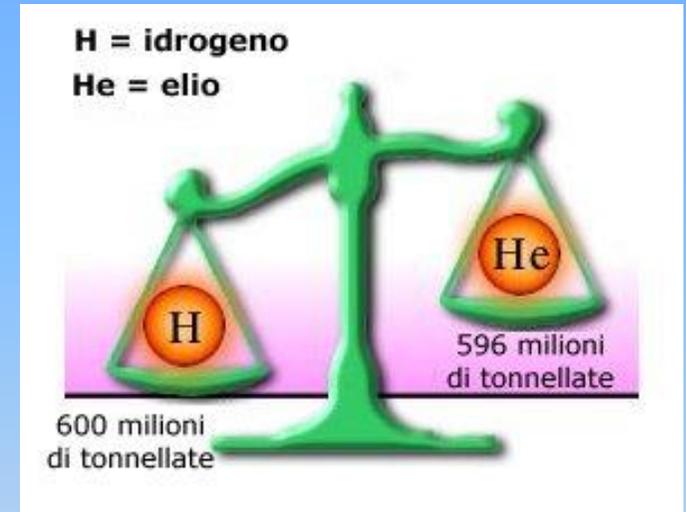
In queste reazioni nucleari una parte della massa, in sovrappiù, viene convertita in energia.

LE REAZIONI TEMONUCLEARI (2)

Ad ogni fusione viene prodotta una quantità di energia:

$$E = m c^2$$

dove c = velocità della luce nel vuoto
ed $m = 4 m_p - m_{\text{He}}$.



Nel Sole ogni secondo 600 milioni di tonnellate di idrogeno vengono trasformate in 596 milioni di tonnellate di elio; la differenza di massa viene convertita in energia che si muove dal centro verso la superficie.

Occorrono milioni di anni per raggiungere la superficie!

LE REAZIONI TEMONUCLEARI (3)

Nel nucleo di stelle più massicce del Sole la fusione di quattro nuclei di protoni, che dà luogo ad un nucleo di elio, avviene secondo un altro processo più complicato (*ciclo carbonio-azoto*).

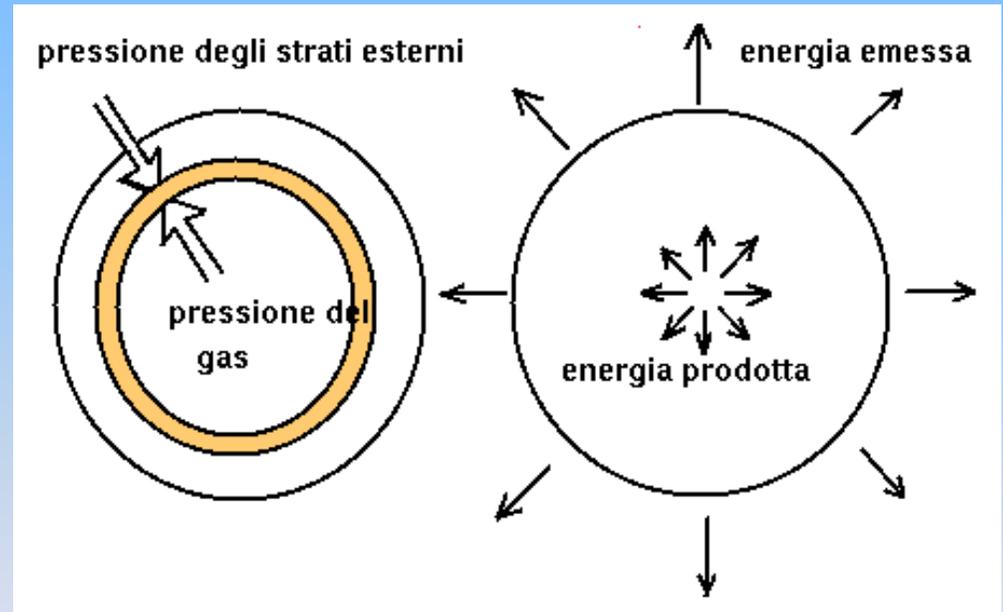
Questo processo richiede la presenza di nuclei di carbonio e di azoto, di cui il primo funge da catalizzatore nella reazione.

Anche in questa reazione nucleare una parte della massa, in sovrappiù, viene convertita in energia.

EQUILIBRIO IDROSTATICO

L'energia prodotta (sotto forma di raggi γ) nel nucleo riscalda gli strati più esterni ed aumenta la pressione, generando una forza di espansione che bilancia la forza di gravità che tende a far continuare il collasso.

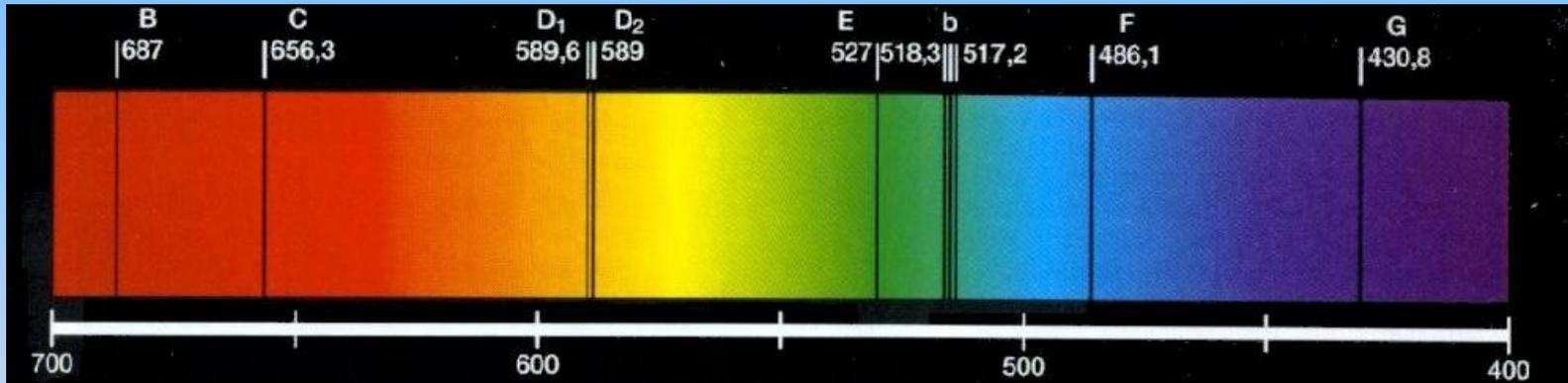
La contrazione si arresta e la stella raggiunge una configurazione di equilibrio (*equilibrio idrostatico*).



Con il raggiungimento dell'equilibrio idrostatico la stella entra nel suo periodo di maturità.

CLASSIFICAZIONE SPETTRALE (1)

Gli spettri stellari, come quello solare, sono caratterizzati da un fondo continuo sul quale sono sovrapposte molte righe in assorbimento (e raramente anche in emissione).



Gli spettri stellari sono stati classificati, sulla base dell'intensità delle varie componenti del continuo (colori) e dell'intensità e posizione delle varie righe in assorbimento, nei seguenti tipi spettrali: O, B, A, F, G, K, M.

CLASSIFICAZIONE SPETTRALE (2)

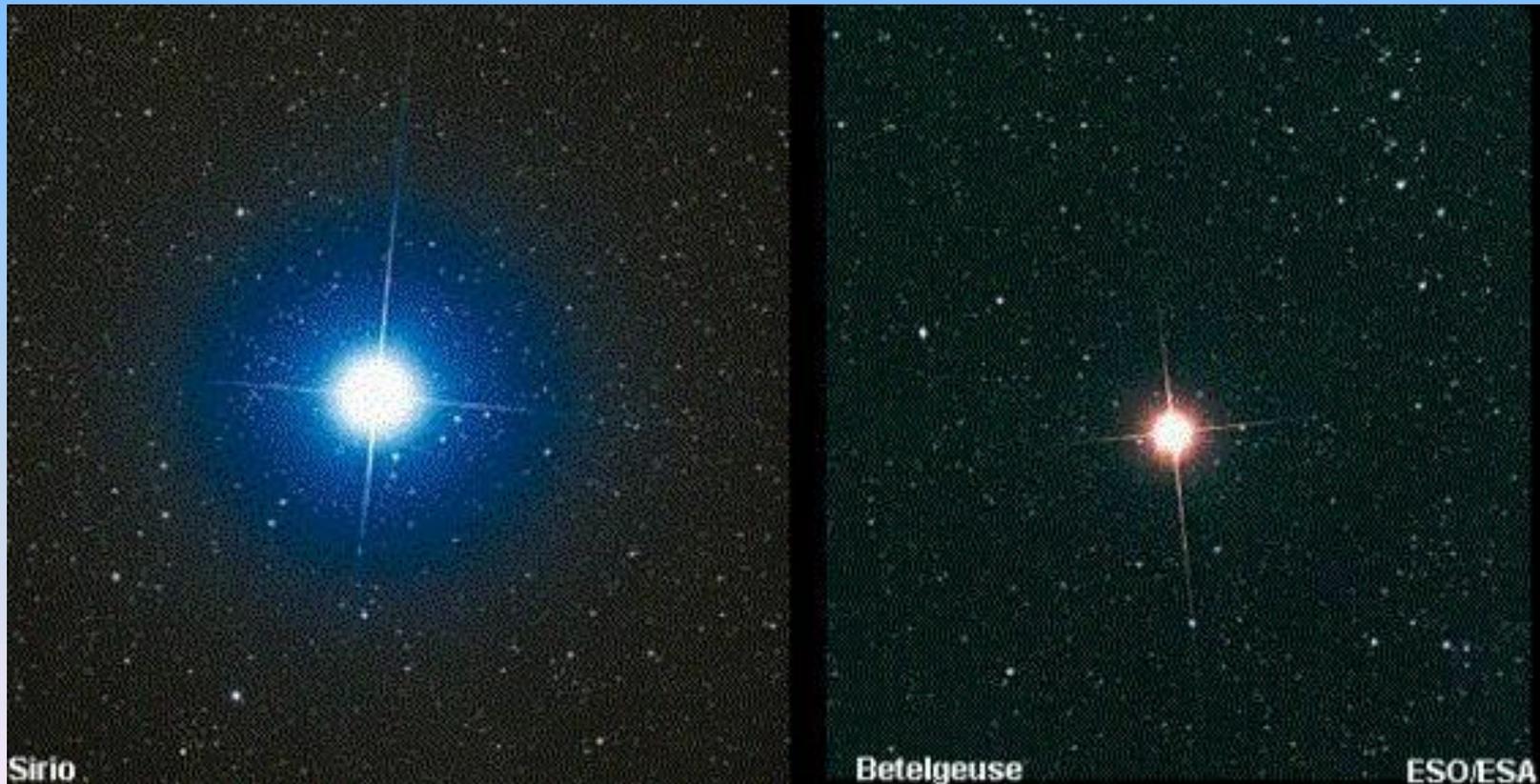
La temperatura superficiale è di circa 40'000 K per le stelle di tipo spettrale O e decresce progressivamente per le stelle dei tipi spettrali B, A, F, G, K fino ad assumere valori di circa 2000 K per le stelle di tipo M.

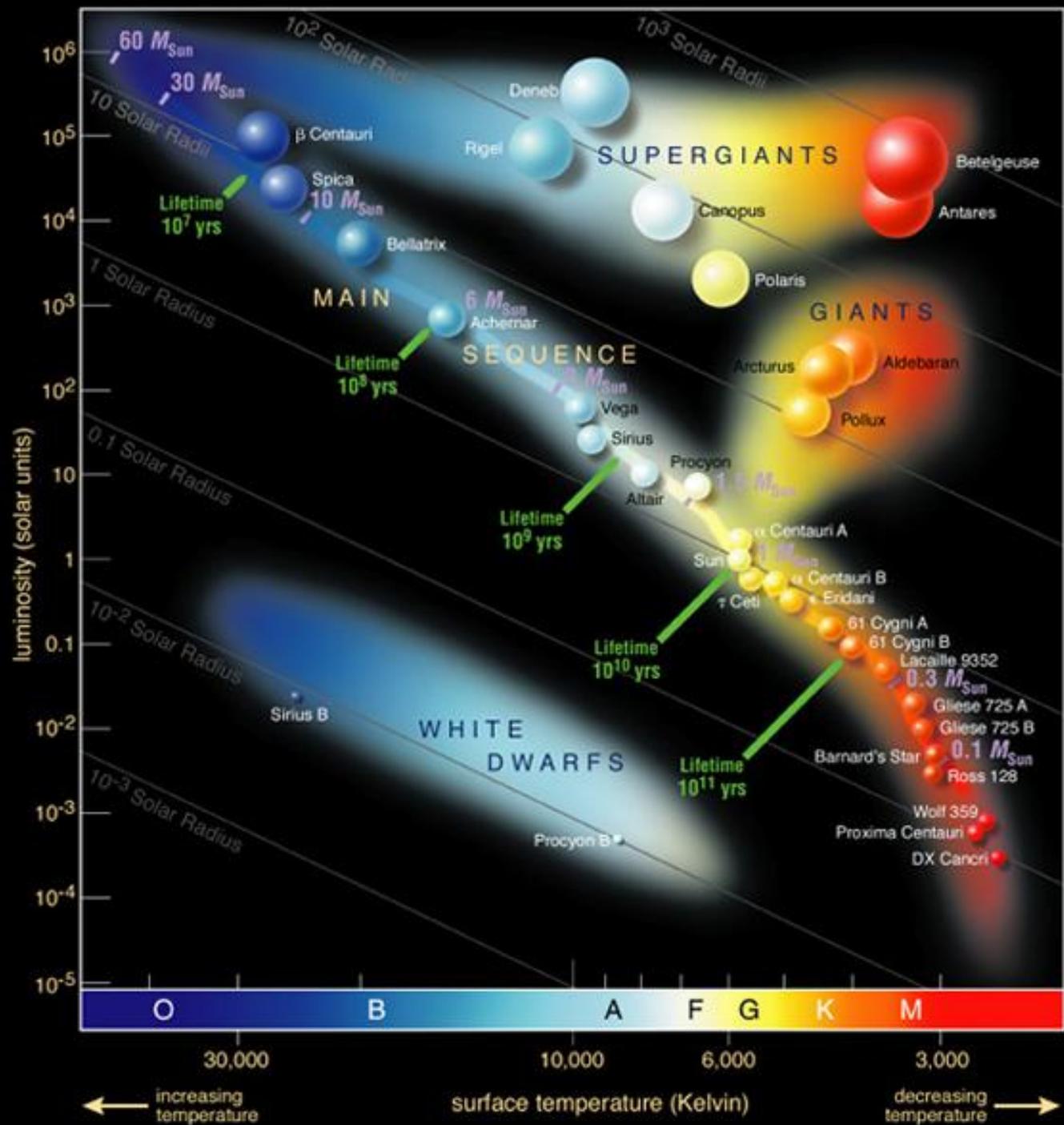
Tutte le stelle hanno temperature sufficientemente alte da avere tutti i colori presenti nel loro spettro: la loro luce è bianca, con una componente dominante che varia a seconda della temperatura. Si passa da un bianco-bluastro per le stelle più calde ad un bianco-rossastro per quelle più fredde.

CLASSIFICAZIONE SPETTRALE (3)

Sirio: stella bianco-bluastro
di tipo spettrale A
 $T = 10\,000\text{ K}$

Betelgeuse: stella bianco-rossastro di tipo spettrale M
 $T = 2400\text{ K}$





D
I
A
G
R
A
M
M
A
H
I
R
(1)

DIAGRAMMA H-R (2)

Al raggiungimento dell'equilibrio idrostatico la stella entra nella Sequenza Principale del diagramma H-R (Hertzprung-Russell) in un punto che dipende dalla massa della stella.

La stella rimane in quella posizione del diagramma H-R per un intervallo di tempo che cresce al diminuire della massa.

Le stelle che si trovano nella Sequenza Principale sono oggetti che hanno raggiunto la maturità, traendo energia dalla fusione di idrogeno in elio nel loro nucleo.

Il Sole, entrato nella Sequenza Principale 5 miliardi di anni fa, vi rimarrà per altri 5 miliardi di anni.

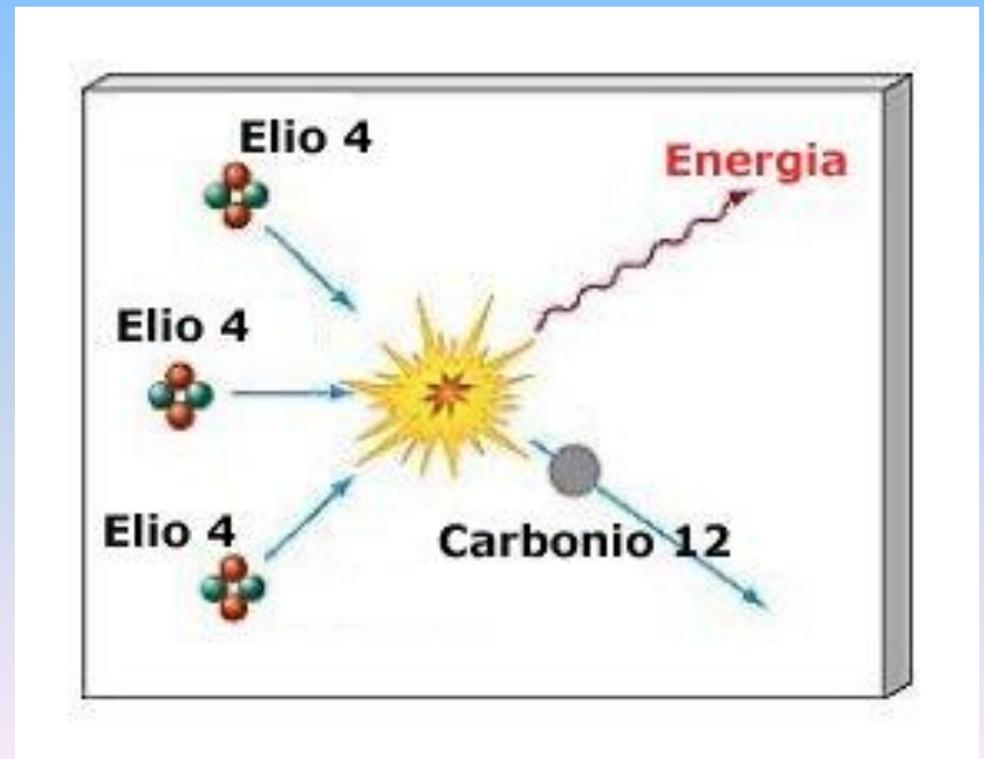
FASI EVOLUTIVE AVANZATE (1)

Esaurito l'idrogeno al centro, le reazioni nucleari si arrestano.

La pressione degli stati più esterni prende il sopravvento e la stella si contrae.

La compressione aumenta la densità e di conseguenza la temperatura del nucleo.

Si riaccendono le reazioni nucleari: questa volta fra nuclei di elio che si fondono in un nucleo di carbonio.

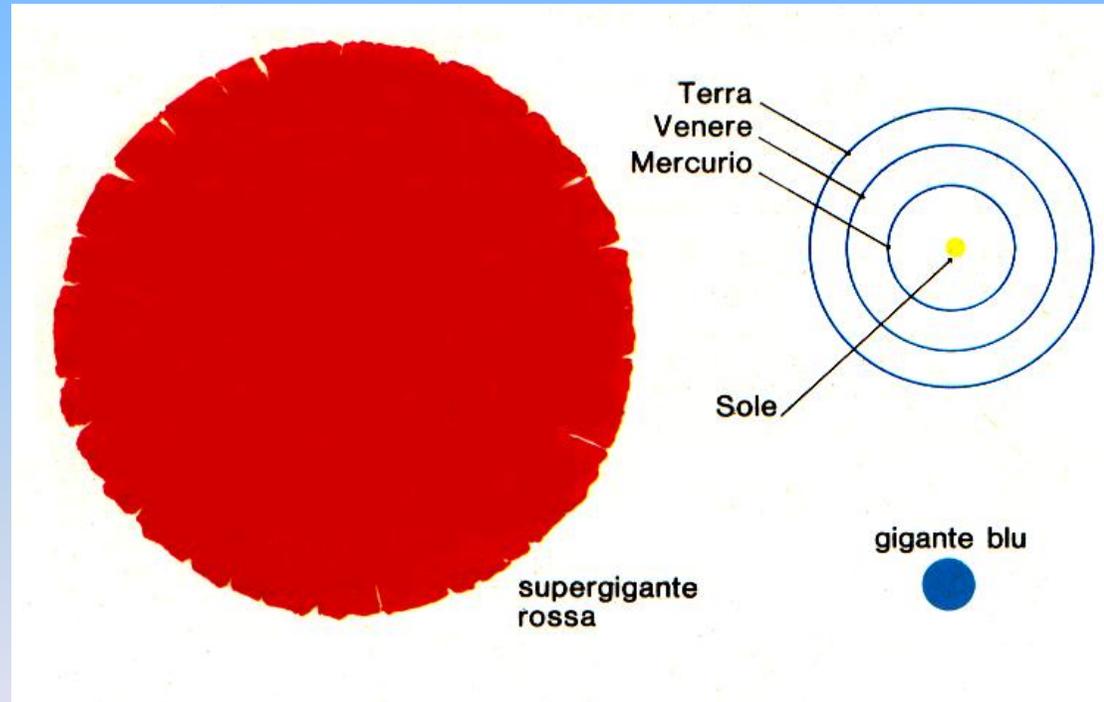


FASI EVOLUTIVE AVANZATE (2)

L'energia prodotta nel nucleo alza la temperatura degli strati più esterni ed aumenta la pressione: si genera una forza di espansione che supera la forza di gravità.

La stella si espande fino al raggiungimento di una nuova dimensione di equilibrio: diventa così una *gigante* (o *supergigante*) *rossa*.

Tra 5 miliardi di anni il Sole diventerà una gigante rossa.



Le supergiganti rosse sono tra le stelle più grandi che si conoscano.

FASI FINALI – Stelle di tipo solare: nane bianche

La fase di gigante (o supergigante) rossa non dura a lungo: finito l'elio nel nucleo, le reazioni nucleari di nuovo si arrestano e la stella collassa sotto il peso degli strati esterni.

Per stelle di massa medio-piccola la contrazione si arresta quando l'oggetto raggiunge una dimensione di circa 10^4 km; si tratta di una stella molto densa e calda detta *nana bianca*.

La densità media di una nana bianca è molto alta: un centimetro cubo pesa circa 1000 kg!

FASI FINALI – Stelle di tipo solare: nebulose planetarie

Spesso una nana bianca è circondata da un involucro gassoso (*nebulosa planetaria*) formatosi durante la precedente fase di gigante rossa, a causa del forte vento stellare dovuto alla bassa gravità superficiale.

Le nebulose planetarie sono oggetti in espansione molto più piccoli e meno massicci delle nubi in cui nascono le stelle.

Il processo che rende luminose le nebulose planetarie è identico a quello che opera nelle nebulose in emissione



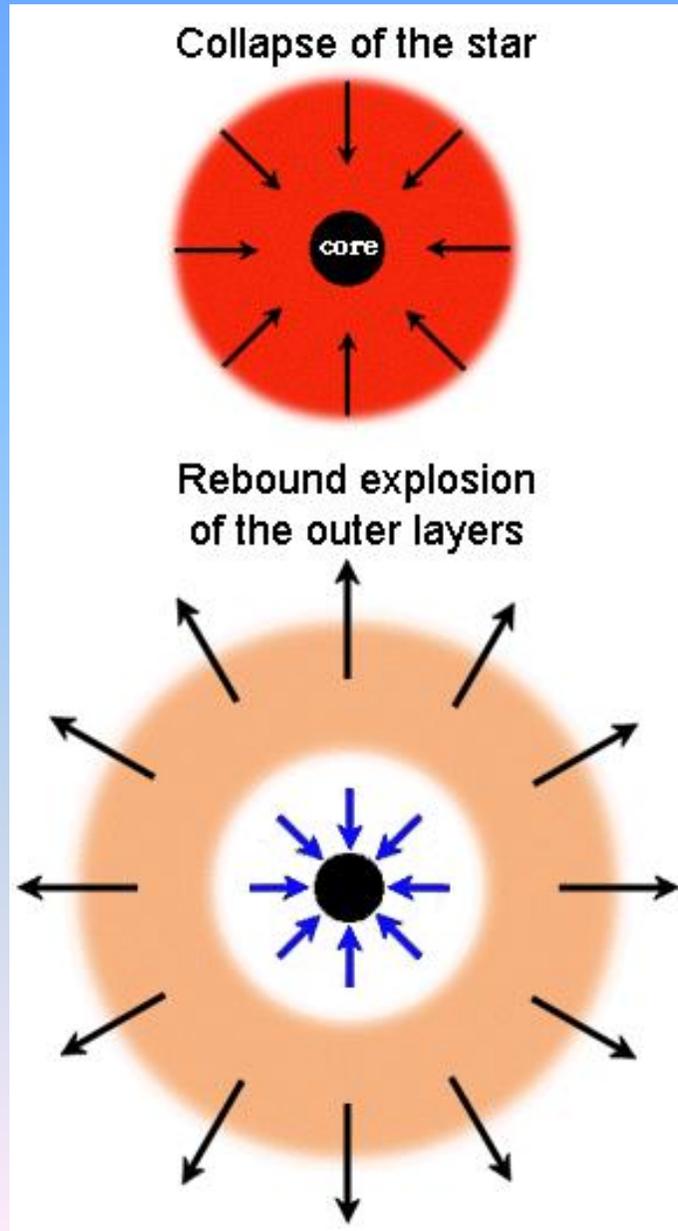
FASI FINALI – Stelle di grande massa: cicli contrazione-espansione e collasso finale

Per stelle di massa grande rispetto a quella del Sole ($M > 8 M_{\odot}$) la contrazione porta all'innescio di nuove reazioni termonucleari che portano via via, attraverso cicli di contrazioni ed espansioni, alla formazione di nuclei sempre più pesanti fino al ferro.

Le reazioni nucleari che coinvolgono il ferro ($\text{Fe} \rightarrow \text{Ni}$), invece di sviluppare energia, la richiedono: ciò dà luogo al violento collasso finale di tutta la stella, in cui il nucleo si contrae diventando un oggetto superdenso del diametro di poche centinaia di km.

NOTA: $1 M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg} = \text{massa del Sole}$

FASI FINALI – Stelle di grande massa: supernovae

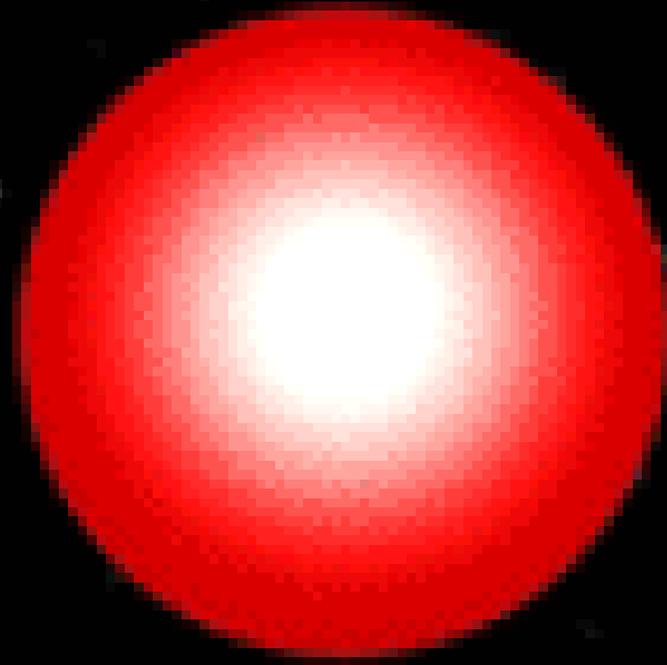


Gli strati esterni, che precipitano sul nucleo, “rimbalzano” su di esso, dando luogo ad una esplosione catastrofica: la stella diviene una *supernova*.

Fino al 70% della massa stellare viene espulso a velocità molto elevate (30'000 km/s), mentre il nucleo continua a collassare.

Per una settimana una supernova può avere una luminosità superiore a quella di tutte le altre stelle della sua galassia messe insieme.

FASI FINALI – Stelle di grande massa: supernovae



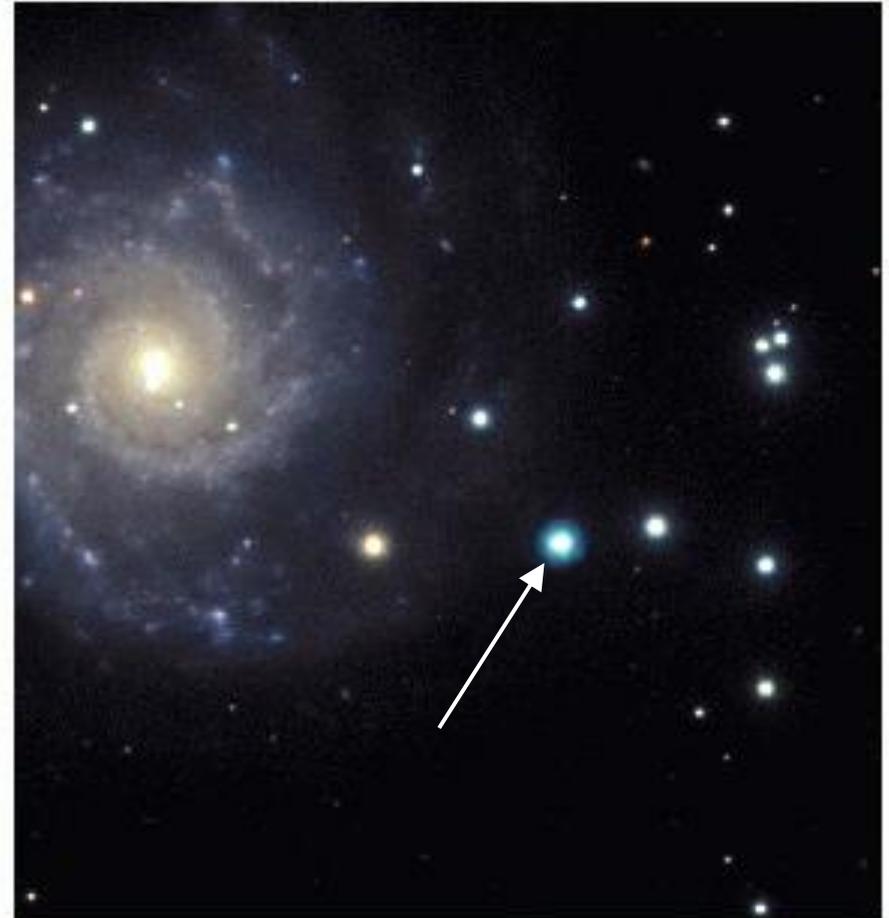


La Nebulosa del
Granchio nella
costellazione del
Toro

**M74 - Digital Sky Survey
1990**



**Mt. Hopkins 1.2 m - SN 2002ap
Jan 31, 2002**

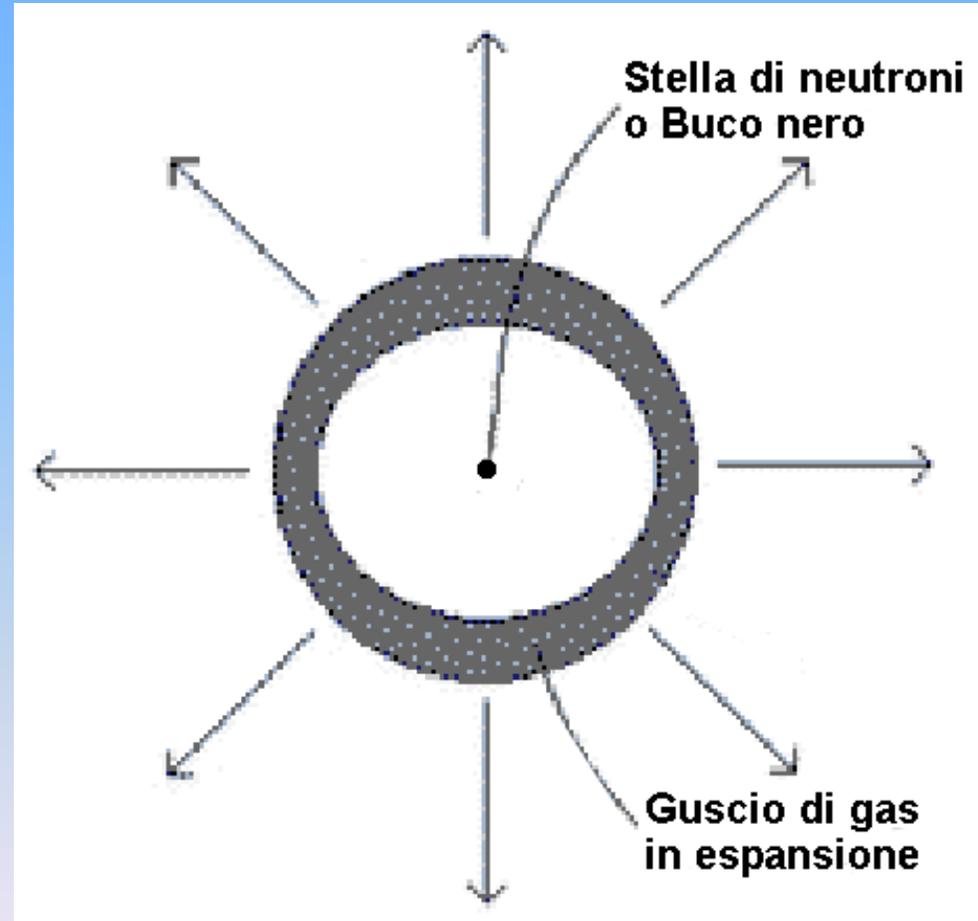


Esplosione di supernova nella galassia M74

FASI FINALI – Stelle di grande massa: residuo dell'esplosione di una supernova

Ciò che spesso rimane dopo l'esplosione è un piccolo oggetto superdenso di dimensioni pari a circa 10 km, chiamato *stella di neutroni*.

Talvolta, quando la stella è molto massiccia, l'esplosione di una supernova dà luogo ad un *buco nero* centrale.





Un buco nero isolato risulterebbe individuabile per un ipotetico osservatore solo se quest'ultimo gli fosse molto vicino.

EVOLUZIONE STELLARE – Riepilogo

