



Attività formativa

Modulo 1

**Gli oggetti dell'analisi
fotometrica e spettroscopica:
stelle e galassie**

Vincenzo Orofino



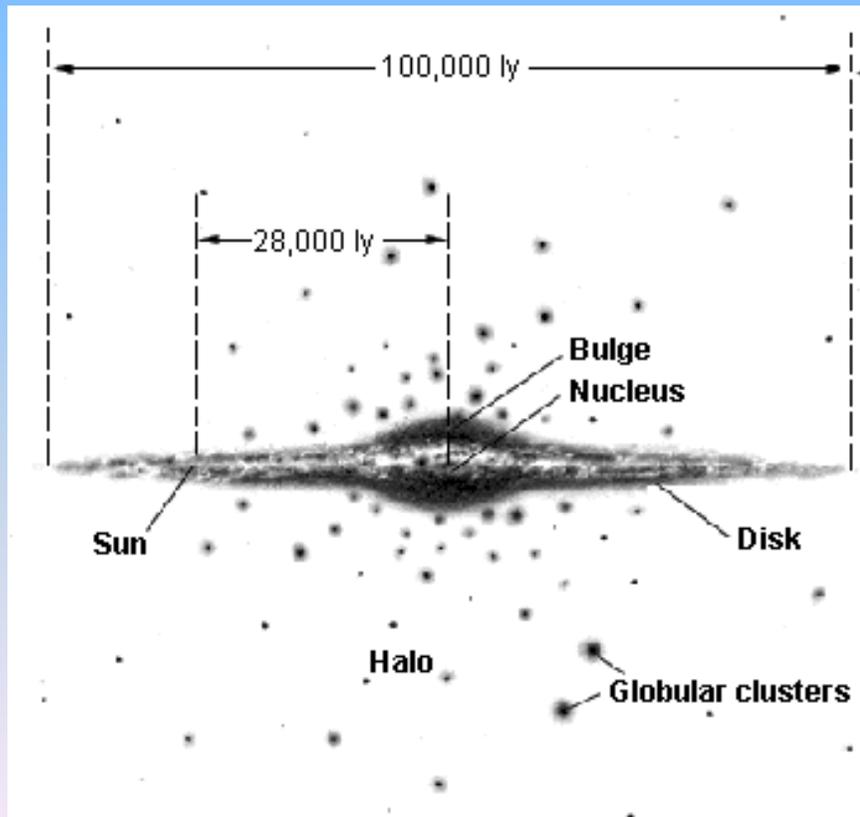
UNIVERSITÀ
DEL SALENTO

Lecce, 17-01-2018


Dipartimento di Matematica e Fisica
"Ennio De Giorgi"

LA NOSTRA GALASSIA

Tutte le stelle che osserviamo ad occhio nudo appartengono ad un enorme aggregato di stelle e nubi di gas e polvere chiamato *Galassia* (o *Via Lattea*) cui fa parte il nostro Sole.



M81 una galassia simile alla nostra

NEBULOSE

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 ~ 30 – 300 anni-luce (1 anno-luce = 9.5×10^{15} m); la densità del gas è dell'ordine dei 1000 atomi di idrogeno per cm^3 .

Dettaglio della Nebulosa
Aquila (M16)

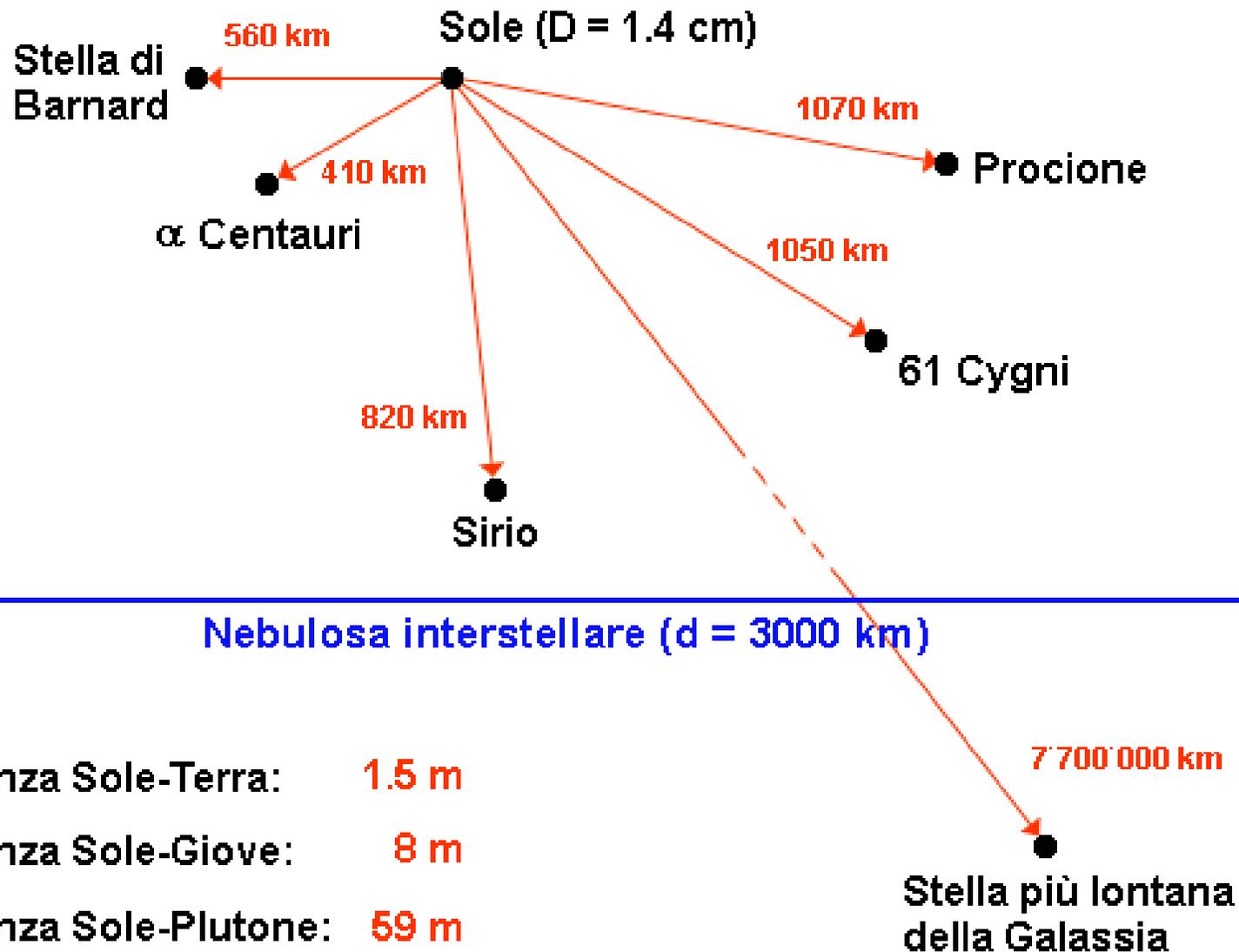




Nebulosa Aquila (M16) nella costellazione del Serpente

NEBULOSE – Dimensioni

Scala 1 : 100 miliardi



NEBULOSE – Classificazione spettrale

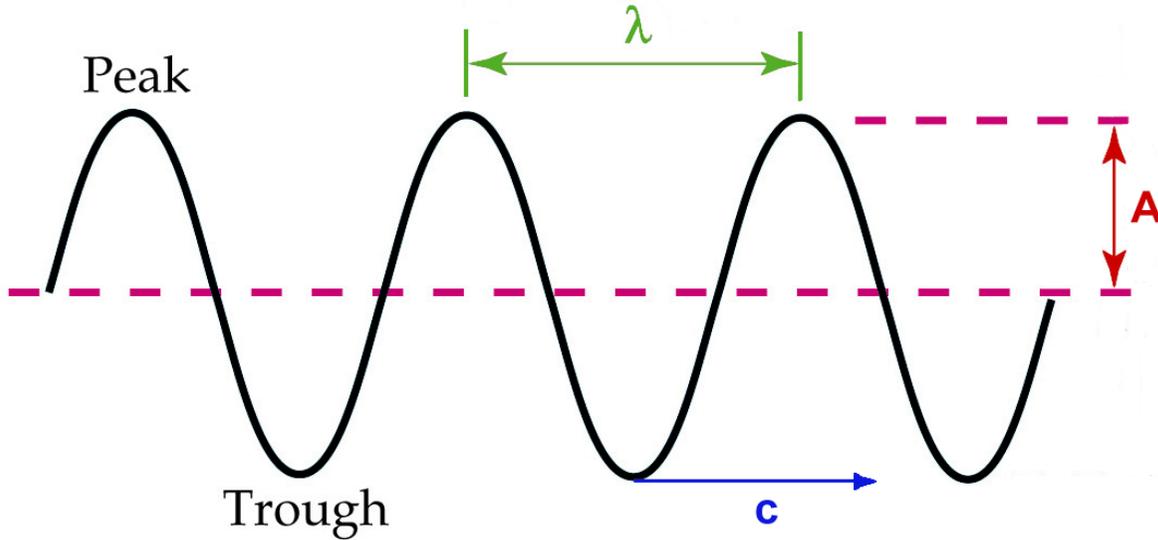
A seconda del modo in cui si rendono visibili, si dividono in:

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



Nebulosa Laguna (M8) nel Sagittario

SPETTROSCOPIA – Caratteristiche della luce

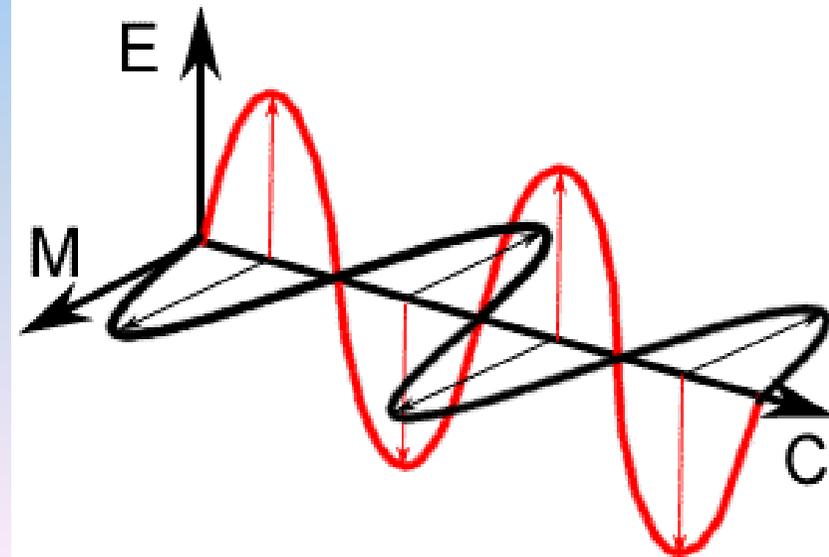


A : ampiezza

λ : lunghezza d'onda

c : velocità ($c \cong 300\cdot000$ km/s)

ν : frequenza ($\nu = c/\lambda$)



SPETTROSCOPIA – Luce e colori (1)

Colori diversi \Longrightarrow Sensazioni visive diverse

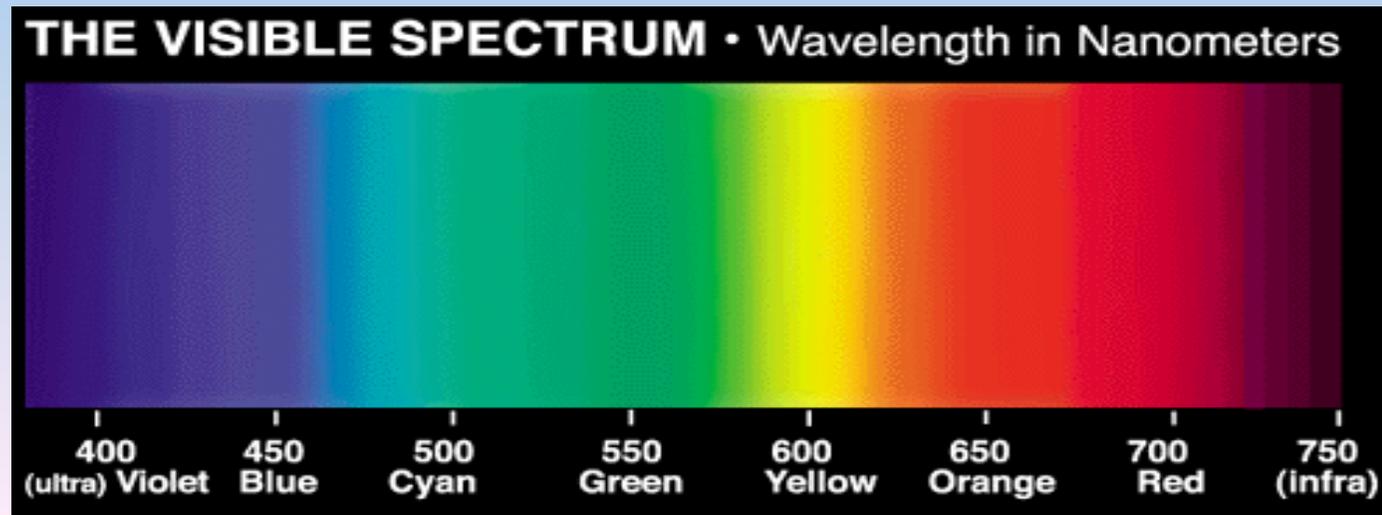
Le diversità di colore sono determinate da diversità di frequenza (o di lunghezza d'onda) della radiazione luminosa.

Un colore è dovuto a radiazioni comprese entro un certo intervallo di frequenza. Si distinguono *sette colori fondamentali*.

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$$

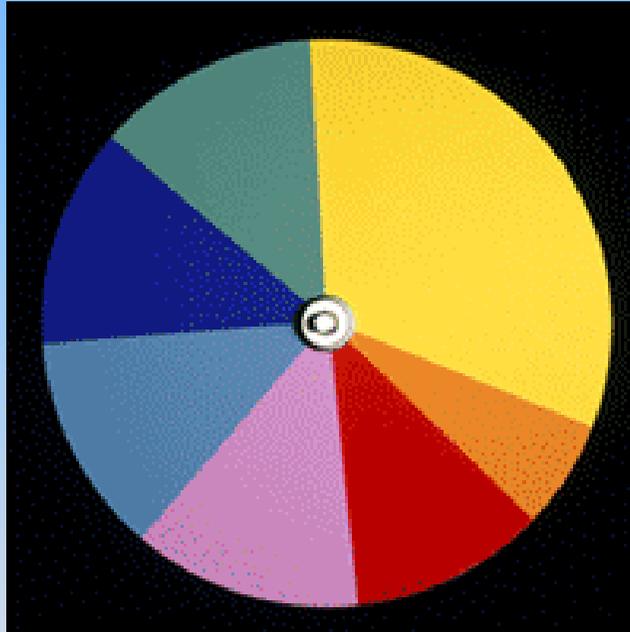
$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$$

$$1 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$$



SPETTROSCOPIA – Luce e colori (2)

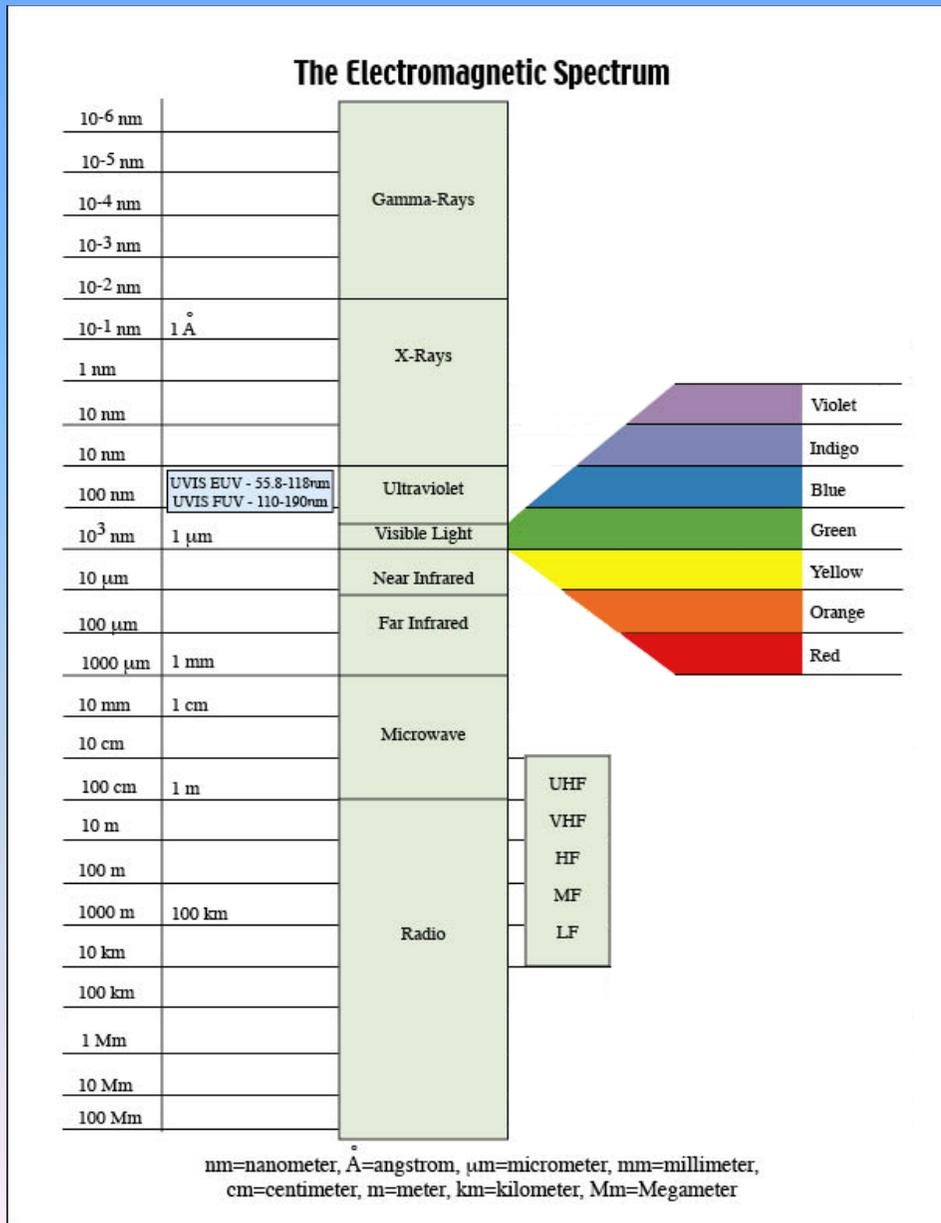
La luce bianca (*policromatica*) è composta da tutte le radiazioni visibili.



Disco di Newton

La luce *monocromatica* (in senso lato) è composta solo da radiazioni di frequenza compresa in uno stretto intervallo.

SPETTROSCOPIA – La radiazione e.m. (1)



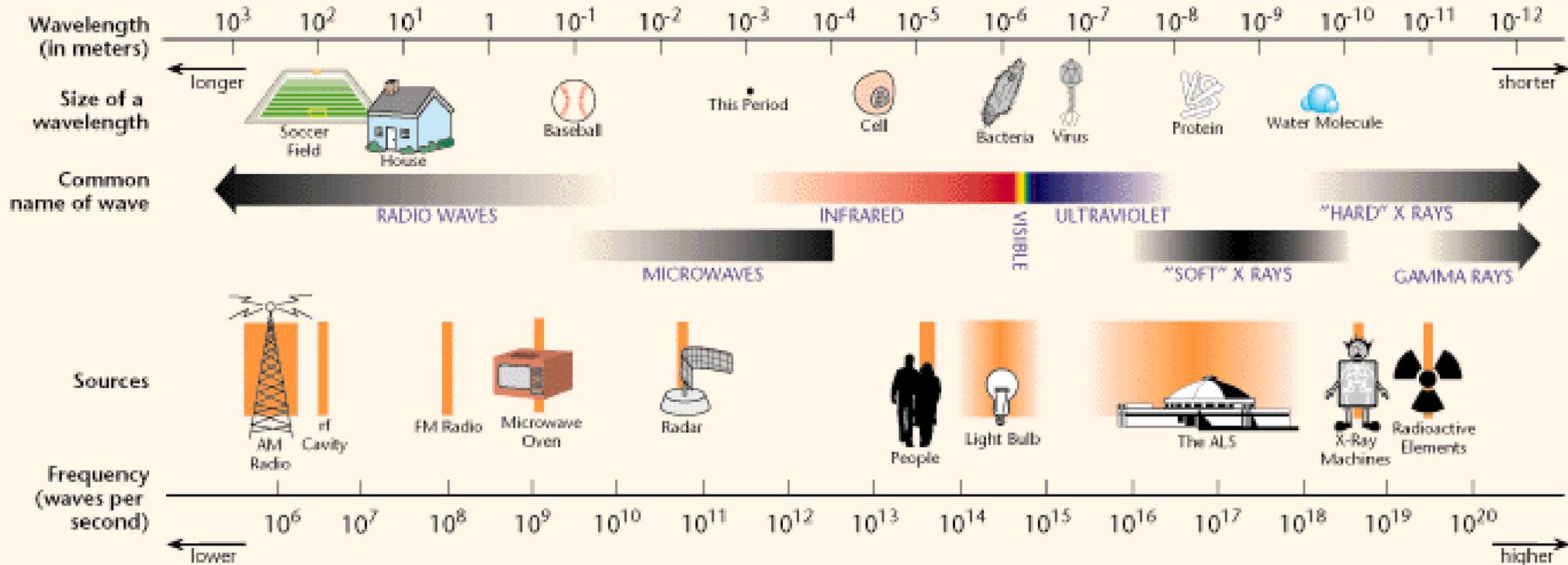
La luce è una piccola parte della radiazione elettromagnetica (e.m.).

Solo la luce è visibile all'occhio umano.

$$E_{\text{Radio}} \ll E_{\text{Gamma}}$$

SPETTROSCOPIA – La radiazione e.m. (2)

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

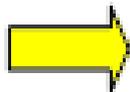
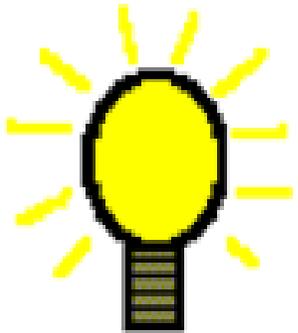


SPETTROSCOPIA – Spettri di emissione (1)

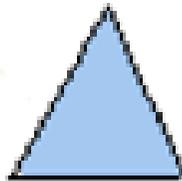
Gli spettri di emissione possono essere di due tipi: *continui* e *a righe* (oppure *a bande*).

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

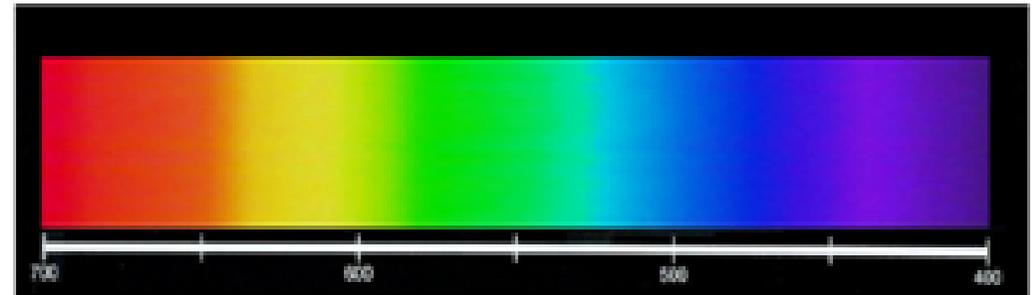
Blackbody



Prism



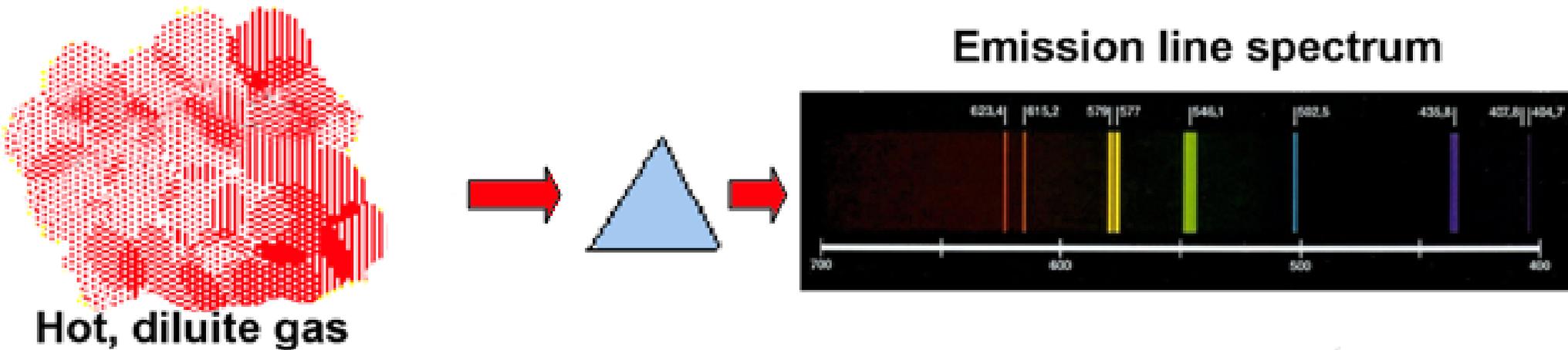
Emission continuum spectrum



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

SPETTROSCOPIA – Spettri di emissione (2)

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

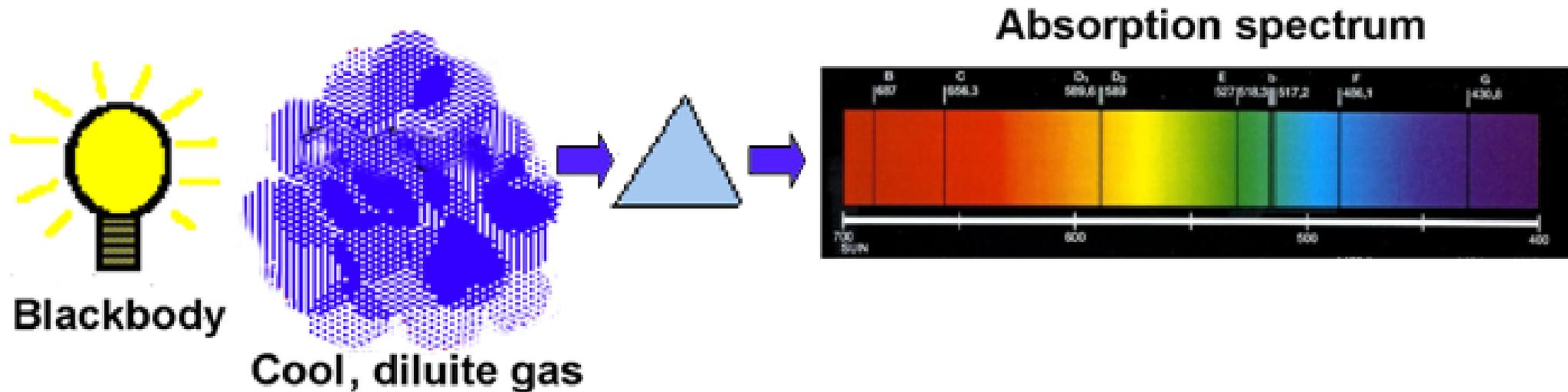


Sono emessi da gas caldi a basse pressioni costituiti da molecole semplici.

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

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.

NEBULOSE – Classificazione spettrale

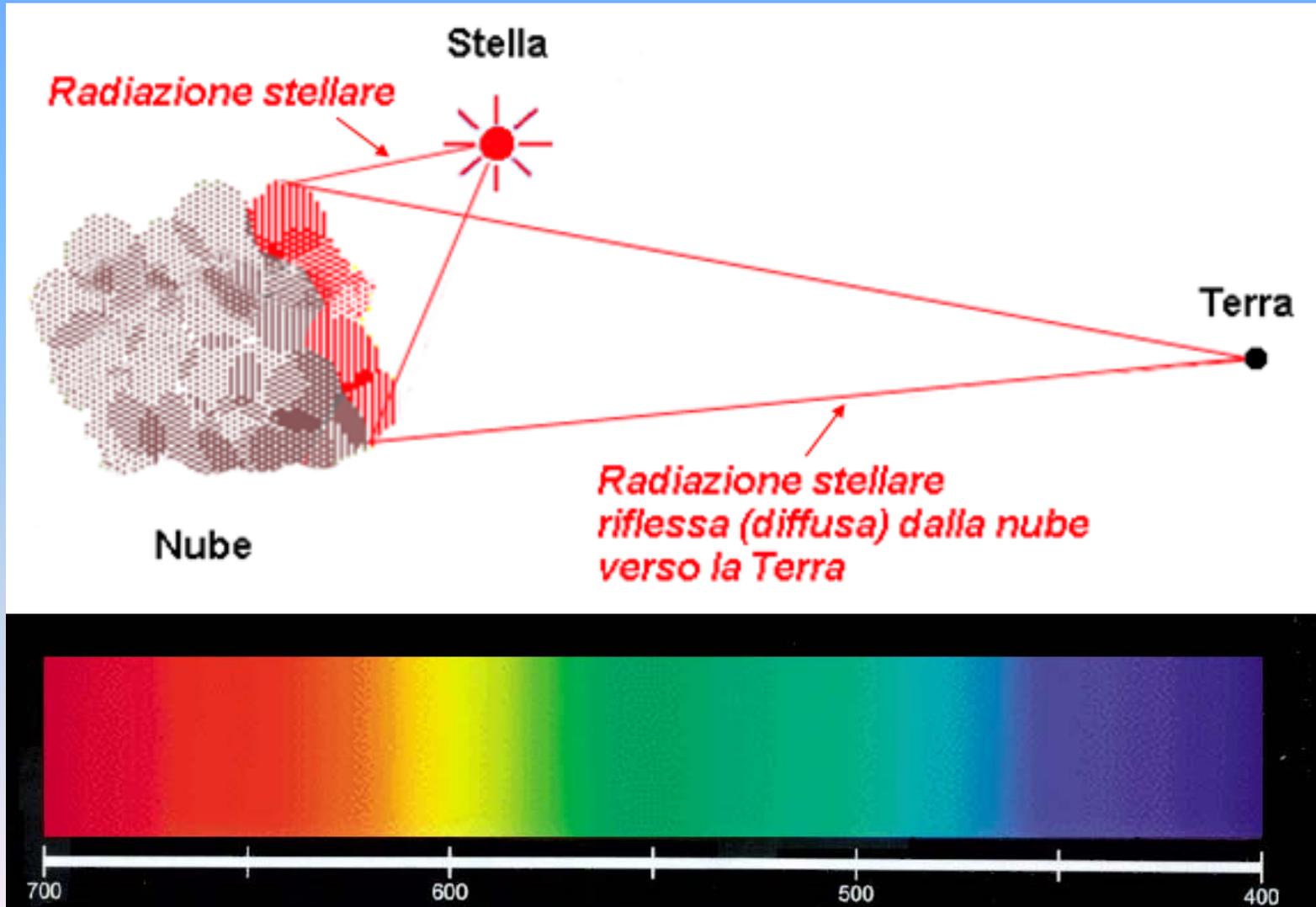
A seconda del modo in cui si rendono visibili, si dividono in:

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



Nebulosa Laguna (M8) nel Sagittario

a) Nebulose in riflessione

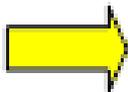
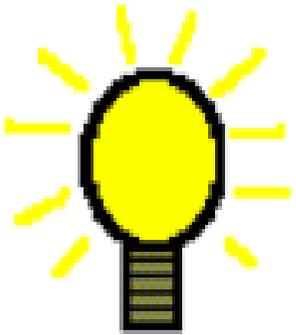


SPETTROSCOPIA – Spettri di emissione (1)

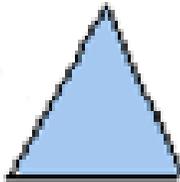
Gli spettri di emissione possono essere di due tipi: *continui* e *a righe* (oppure *a bande*).

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

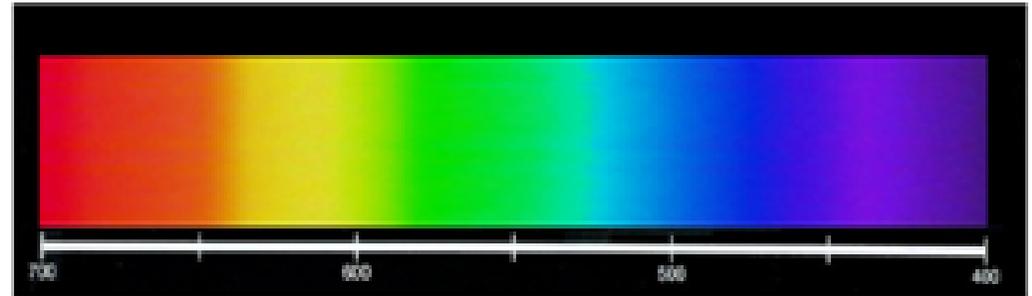
Blackbody



Prism



Emission continuum spectrum



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

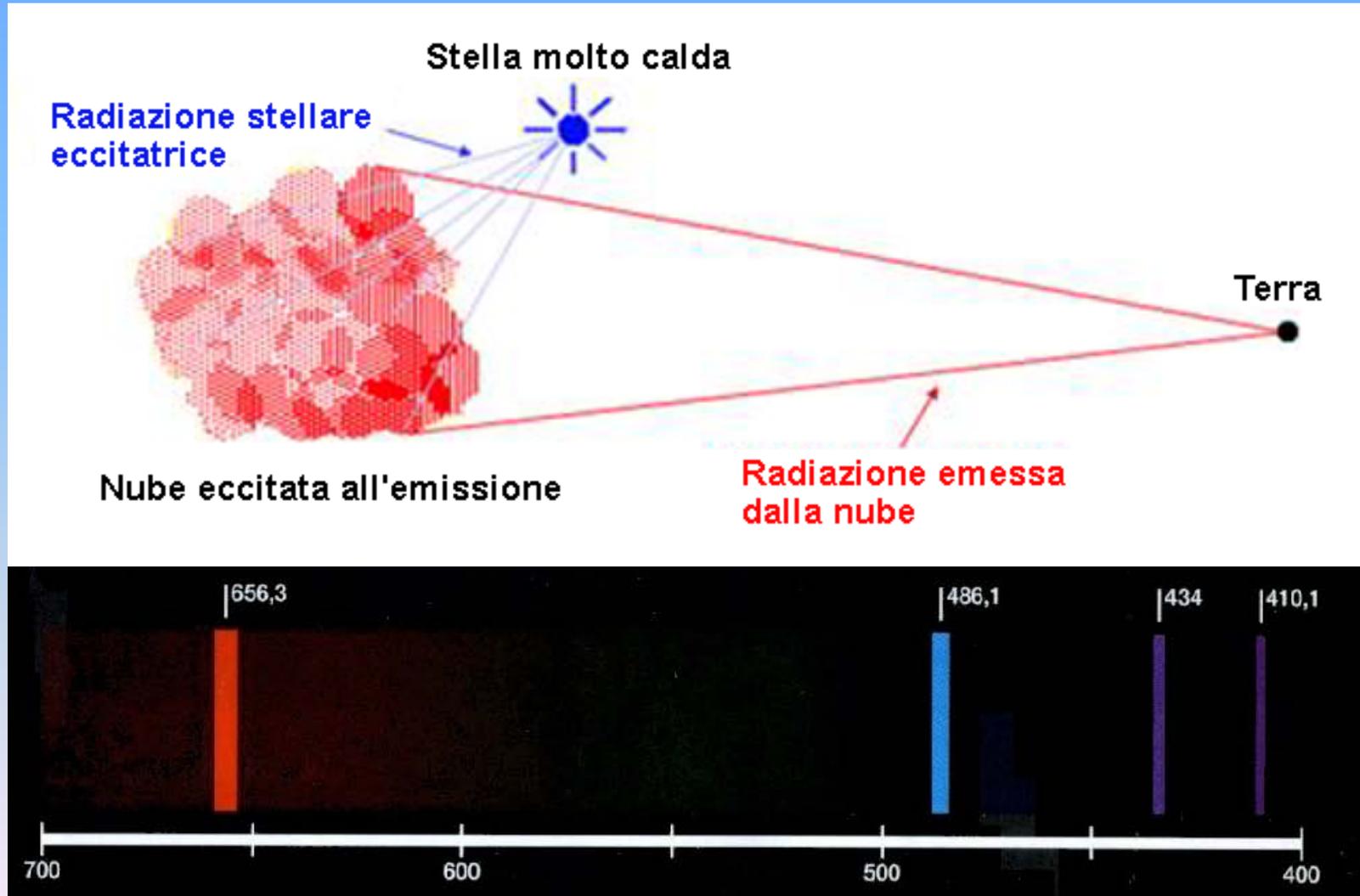


M78 in Orione

Nebulosa delle Pleiadi (M45) nel Toro

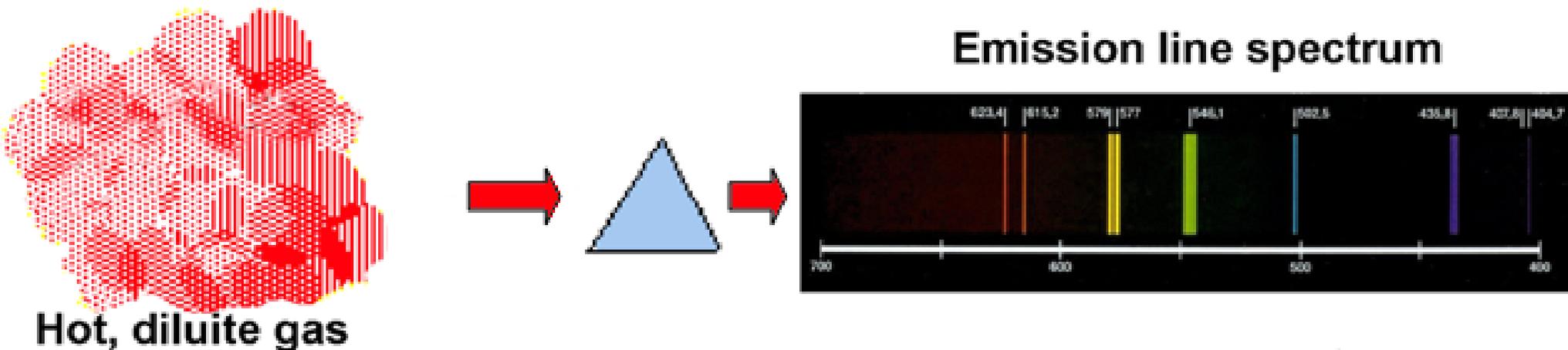


b) Nebulose in emissione



SPETTROSCOPIA – Spettri di emissione (2)

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



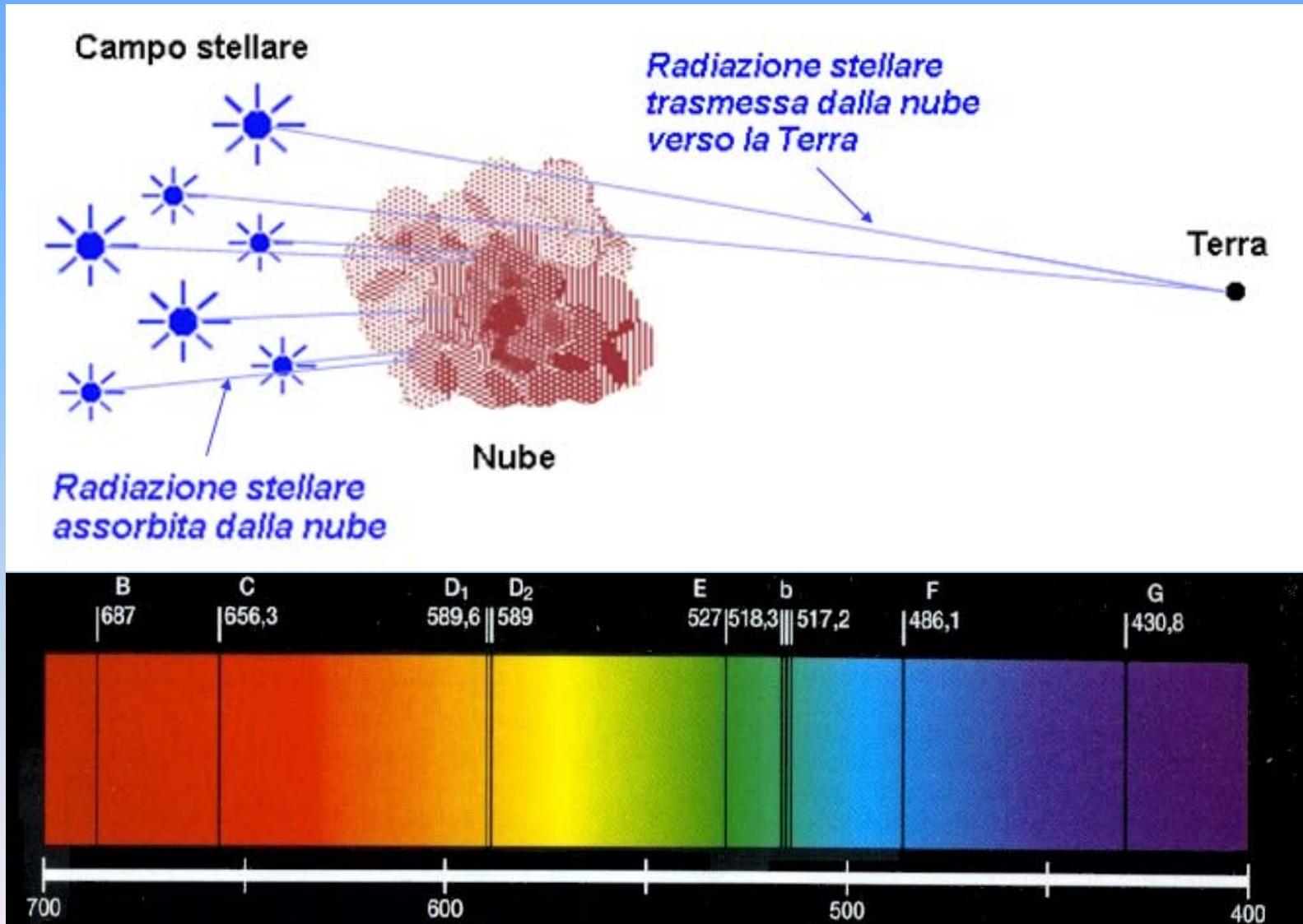
Sono emessi da gas caldi a basse pressioni costituiti da molecole semplici.

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



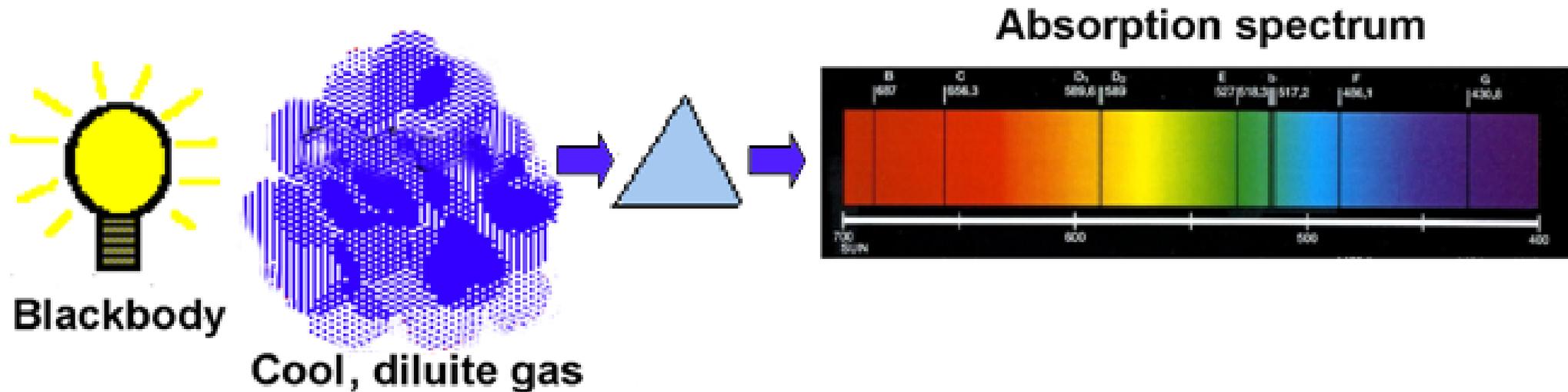
Nebulosa Trifida (M20) nel Sagittario

c) Nebulose oscure



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.



HH 46/47 nelle Vele

Nebulose complesse

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

NGC 1977 in Orione

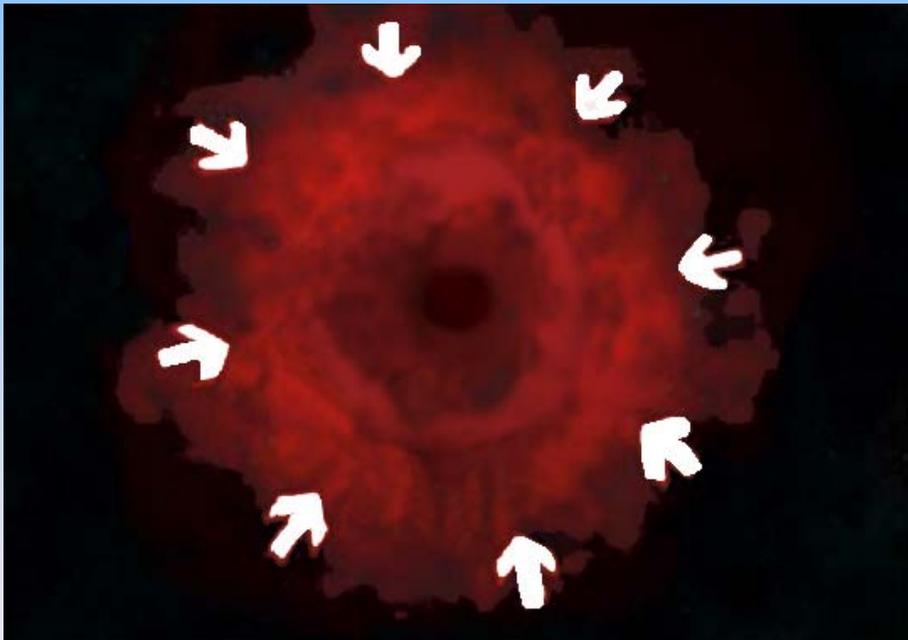




IC 434 in Orione

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.

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!

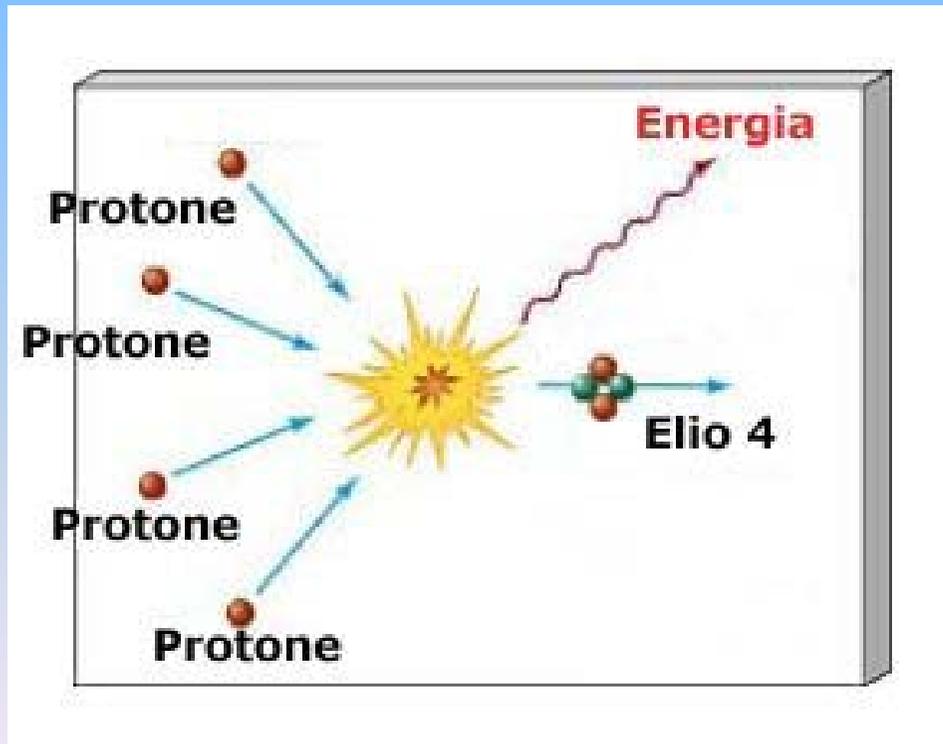
Da un'unica nube possono formarsi molte stelle, che all'inizio sono oscurate dai residui del frammento da cui sono nate.



Esempi di stelle appena formatesi

REAZIONI TEMONUCLEARI (1)

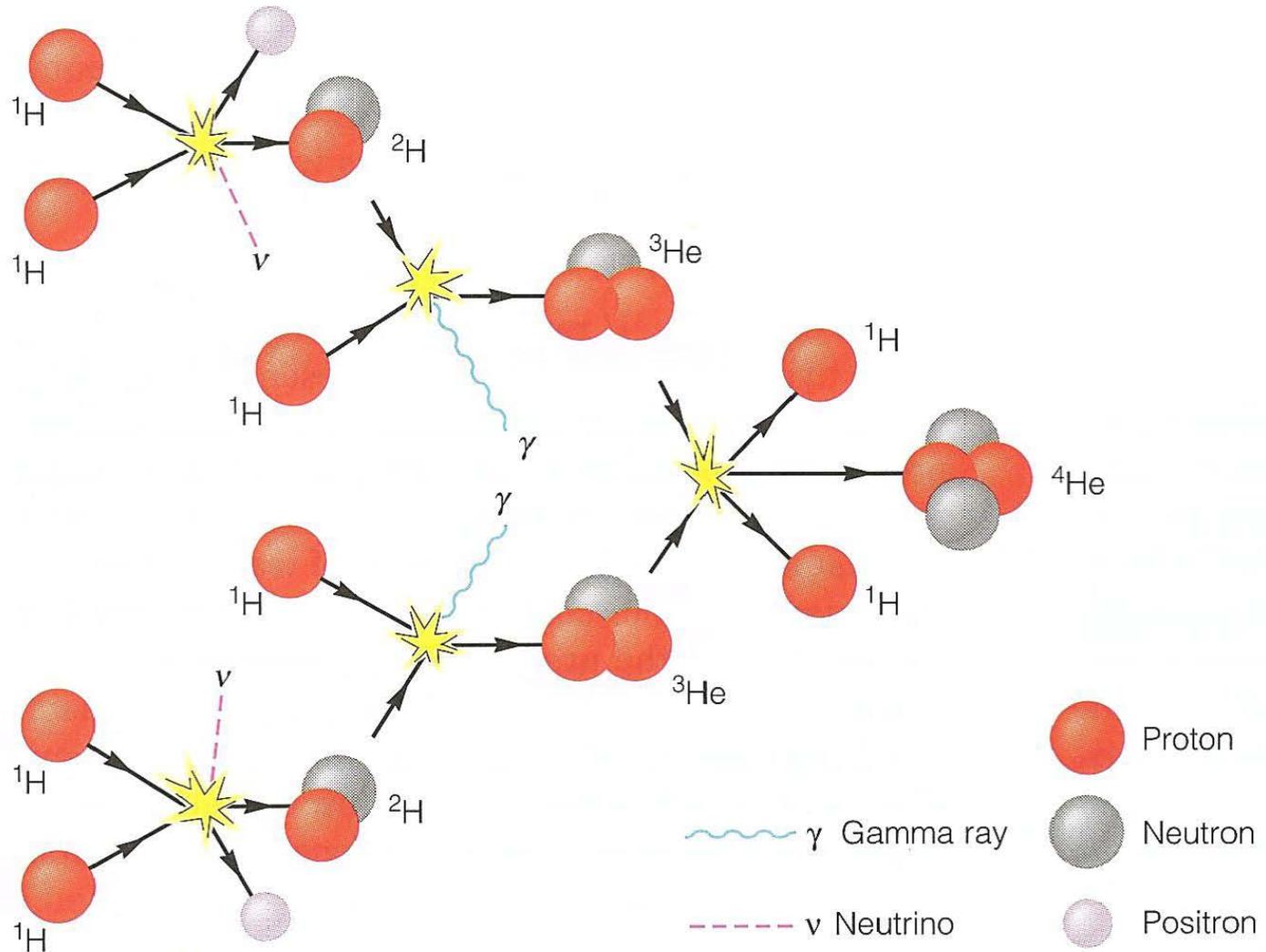
Nelle zone centrali (*nucleo*) di stelle come il Sole quattro nuclei di idrogeno (protoni) si fondono per formare un nucleo di elio secondo una catena di reazioni nucleari detta *ciclo protone-protone*.



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.

REAZIONI TEMONUCLEARI (2)

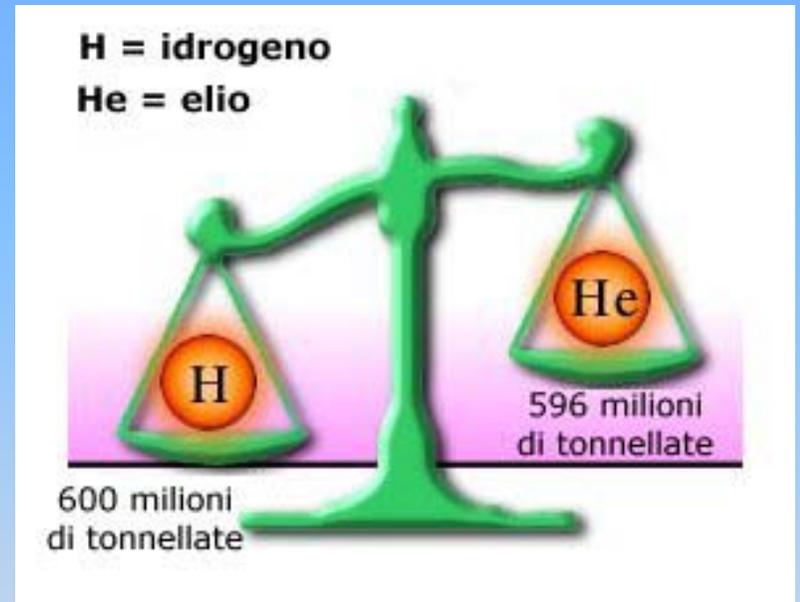


REAZIONI TEMONUCLEARI (3)

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.

REAZIONI TEMONUCLEARI (4)

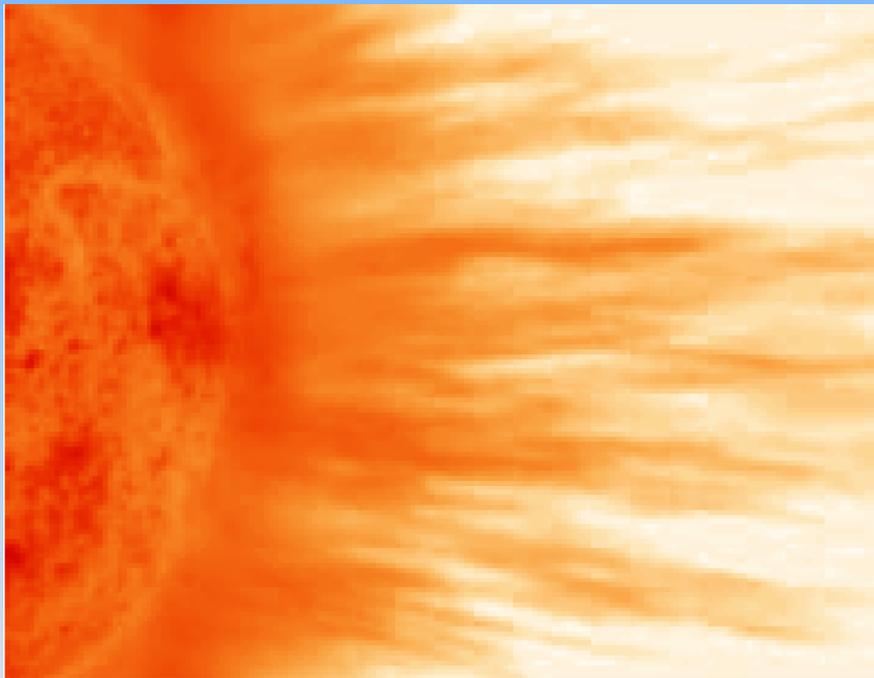
Nel nucleo di stelle più massicce del Sole la fusione di quattro nuclei di protoni, che dà luogo ad un nucleo di elio, avviene secondo un altro processo più complicato (*ciclo carbonio-azoto*).

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.

REAZIONI TEMONUCLEARI (4)

L'energia prodotta nel nucleo sotto forma di radiazione gamma emerge in superficie (dopo milioni di anni!) sotto forma di luce.



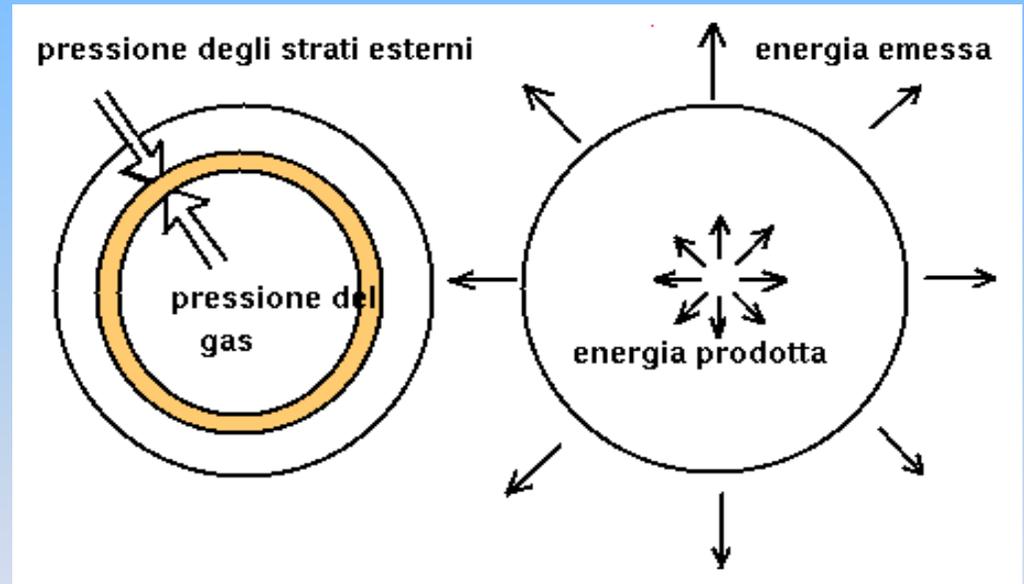
Data l'elevata temperatura superficiale (migliaia di gradi), alcune particelle sfuggono alla stella e sono emesse nello spazio circostante. Il flusso di queste particelle viene chiamato *vento stellare*.

Il vento stellare spazza via il materiale residuo che ancora avvolge la stella: questa diventa pertanto completamente visibile.

EQUILIBRIO IDROSTATICO

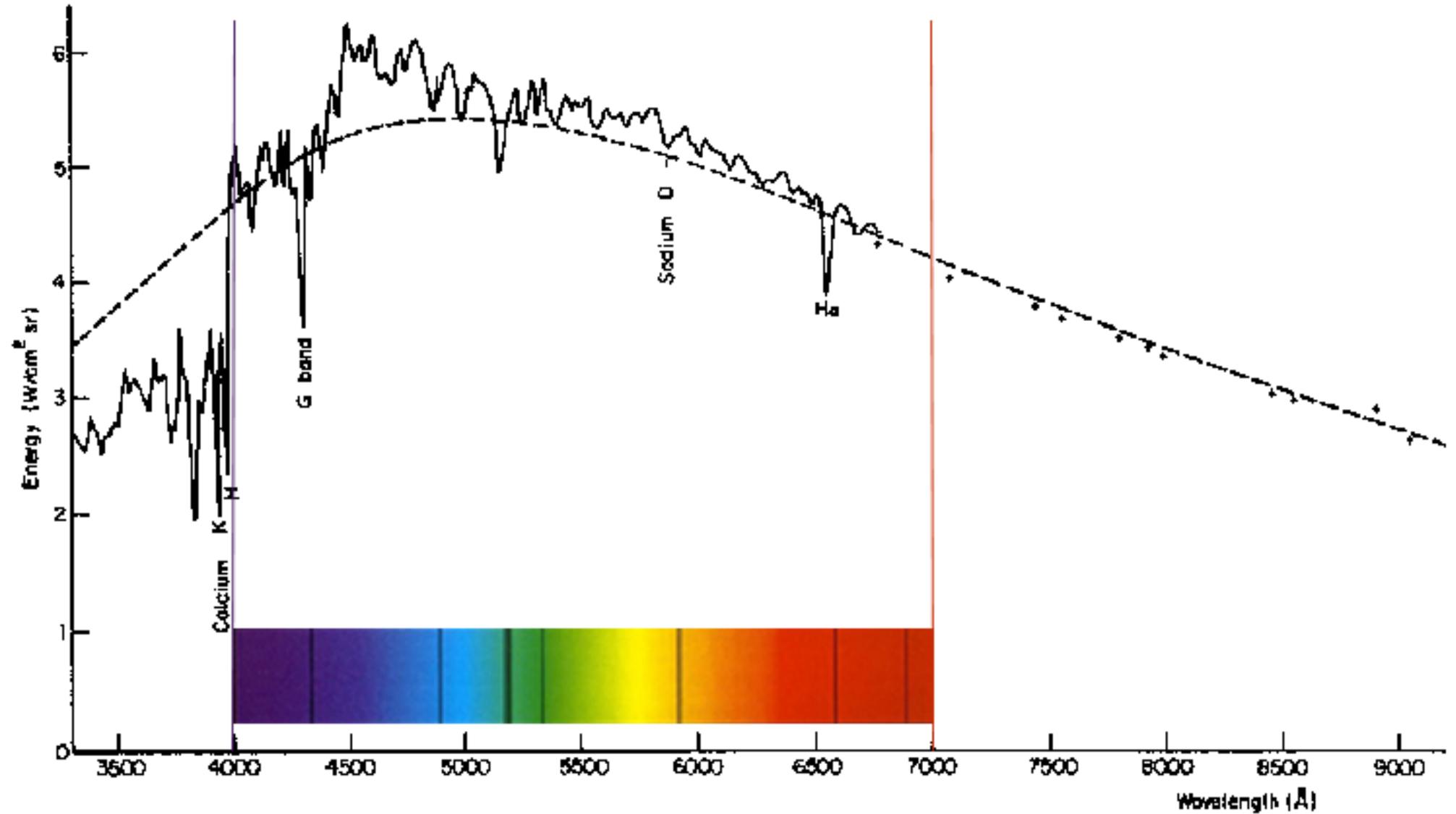
L'energia prodotta (sotto forma di raggi γ) nel nucleo riscalda gli strati più esterni ed aumenta la pressione, generando una forza di espansione che bilancia la forza di gravità che tende a far continuare il collasso.

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



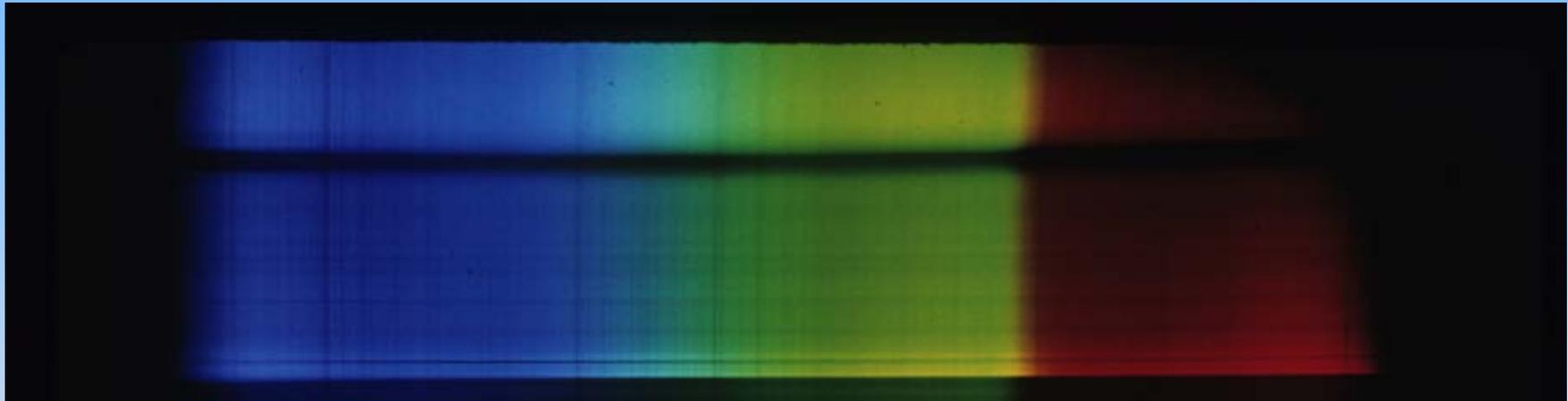
Con il raggiungimento dell'equilibrio idrostatico la stella entra nel suo periodo di maturità.

SPETTRO DI UNA STELLA



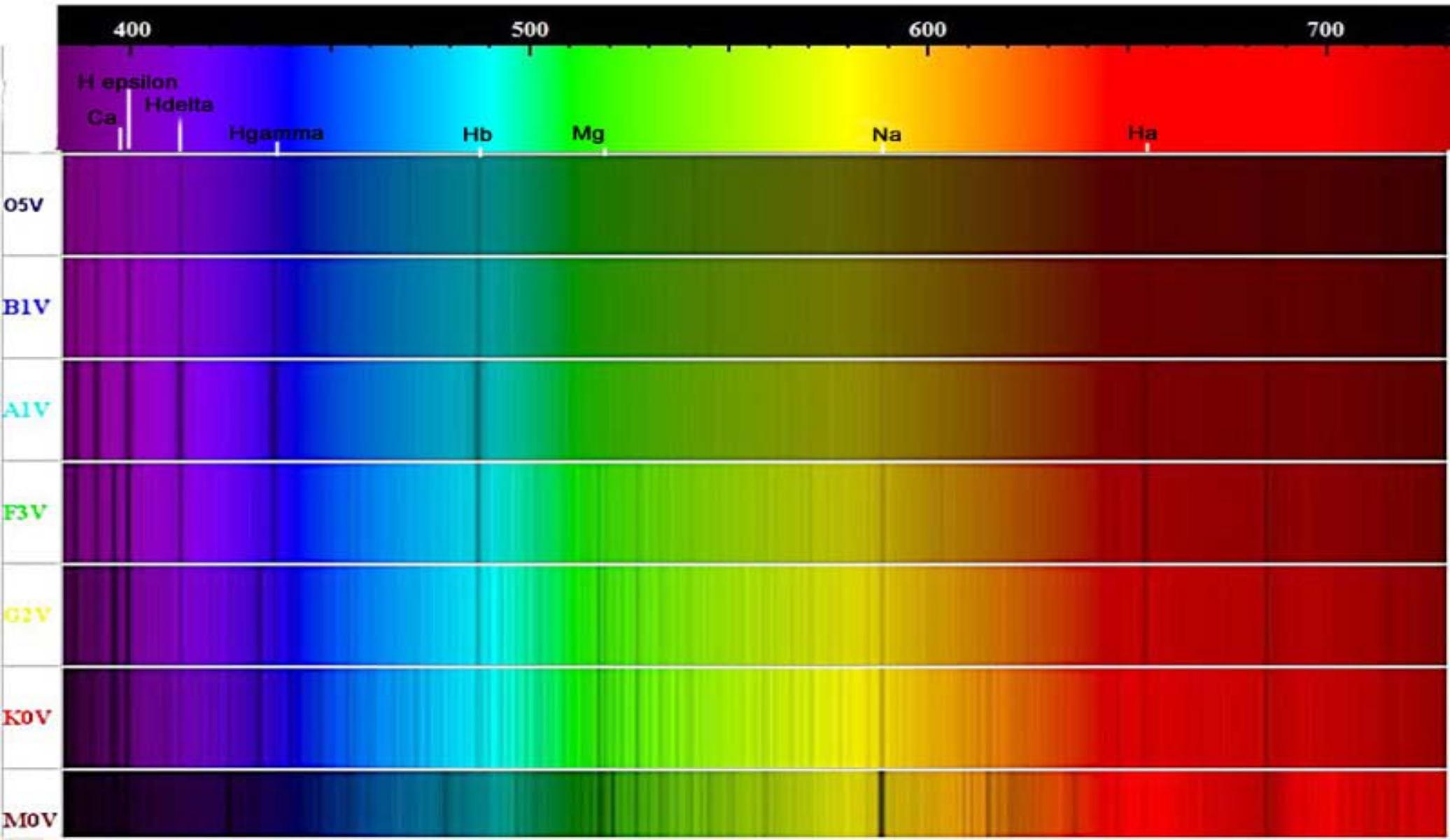
CLASSIFICAZIONE SPETTRALE (1)

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)



CLASSIFICAZIONE SPETTRALE (3)

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 (4)

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

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



Sirio

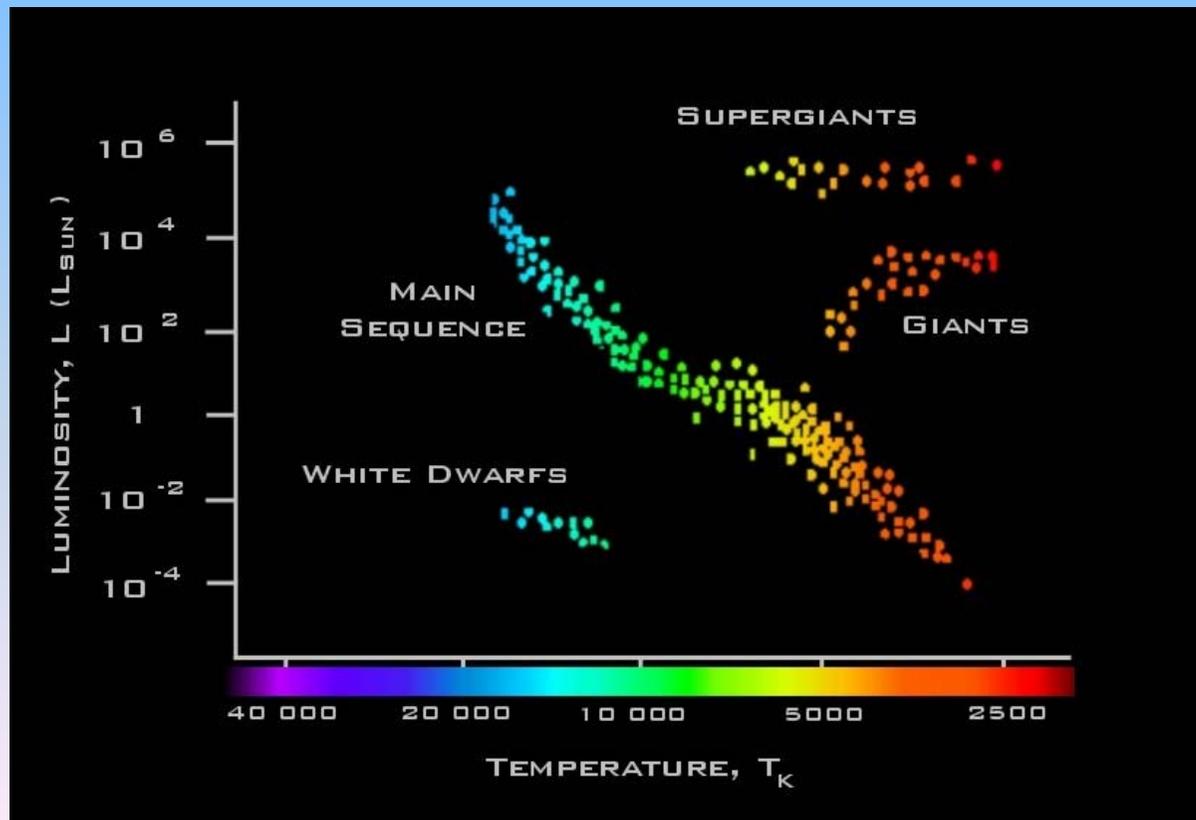


Betelgeuse

ESO/ESA

DIAGRAMMA H-R (1)

Se si costruisce un grafico temperatura-luminosità delle varie stelle (*diagramma di Hertzsprung-Russell* o *diagramma H-R*) si vede che queste non si dispongono “a caso” ma si raggruppano in zone ben definite lasciando vuote molte altre zone.



La maggior parte delle stelle cade in una fascia ben definita chiamata *Sequenza Principale* (S.P.).

DIAGRAMMA H-R (2)

Posizione delle stelle più luminose sul Diagramma H-R

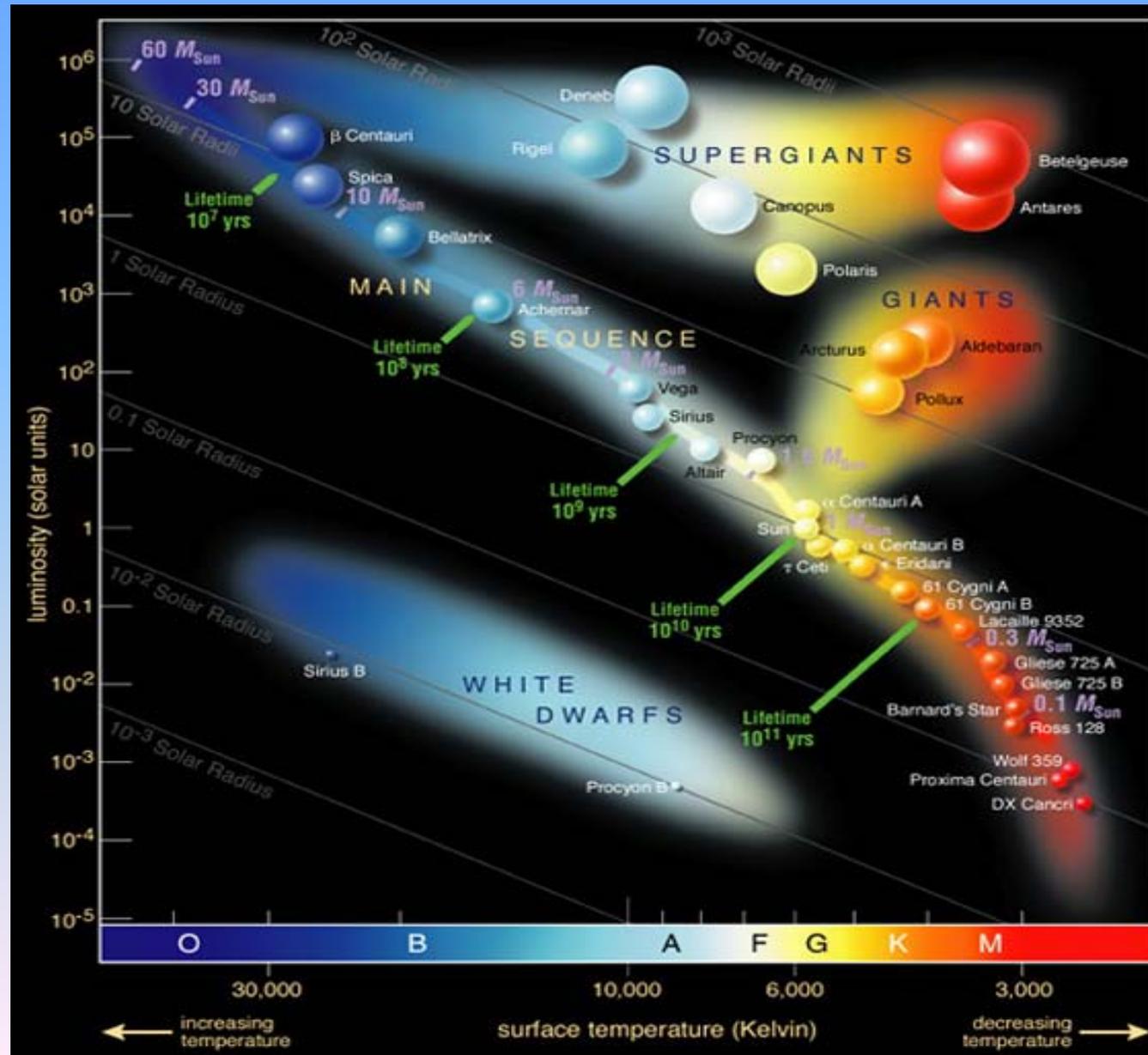


DIAGRAMMA H-R (3)

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.

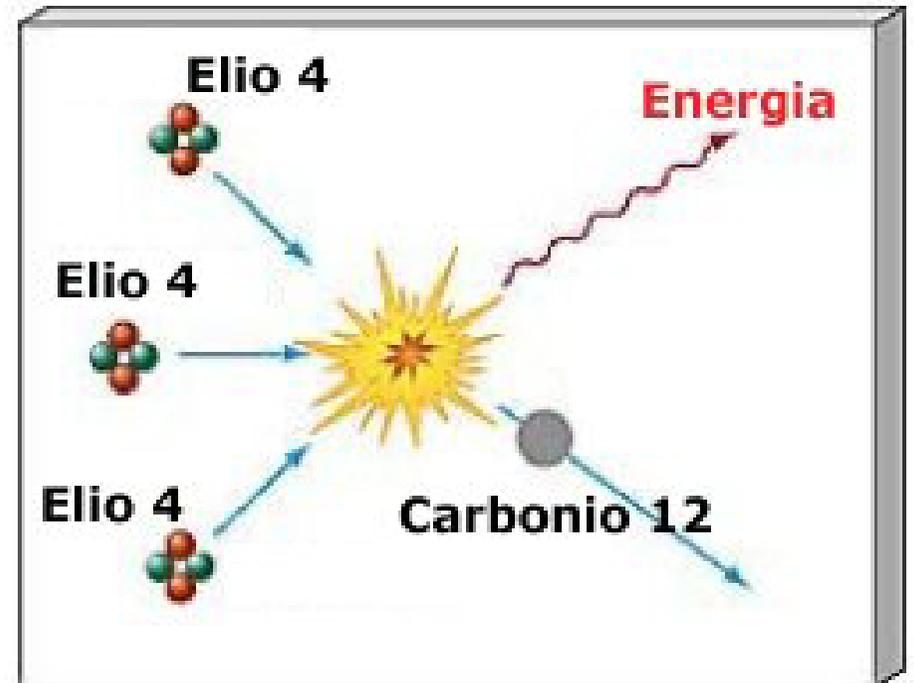
FASI EVOLUTIVE AVANZATE (1)

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.

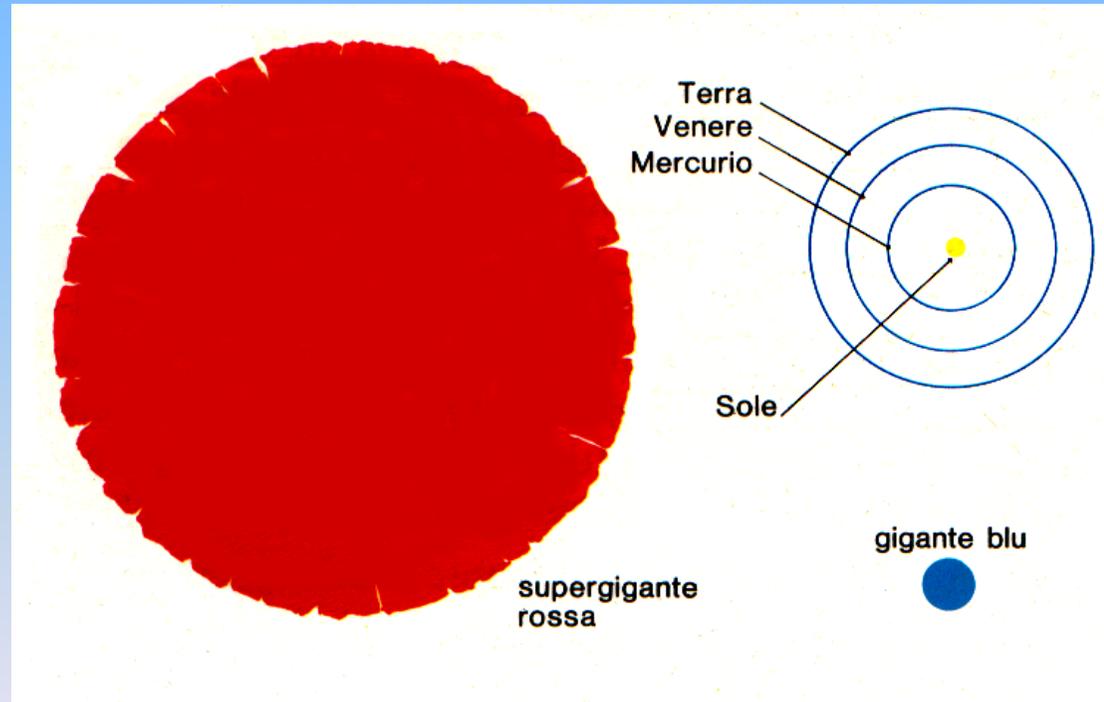


FASI EVOLUTIVE AVANZATE (2)

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.

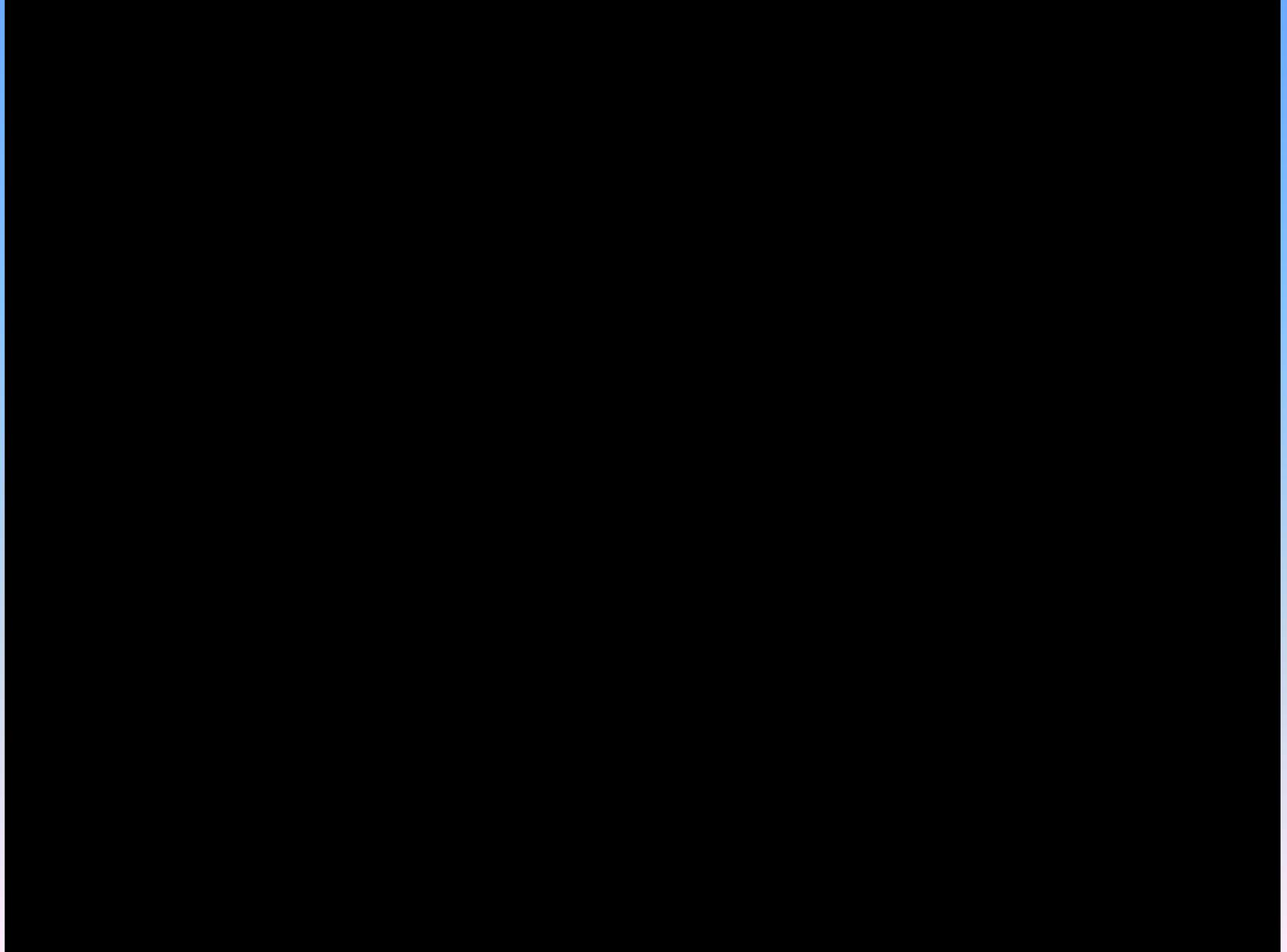
La stella si espande fino al raggiungimento di una nuova dimensione di equilibrio: diventa così una *gigante* (o *supergigante*) *rossa*.

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



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

DIMENSIONI DELLE STELLE



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 10'000 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



Nebulosa Elica nell'Acquario

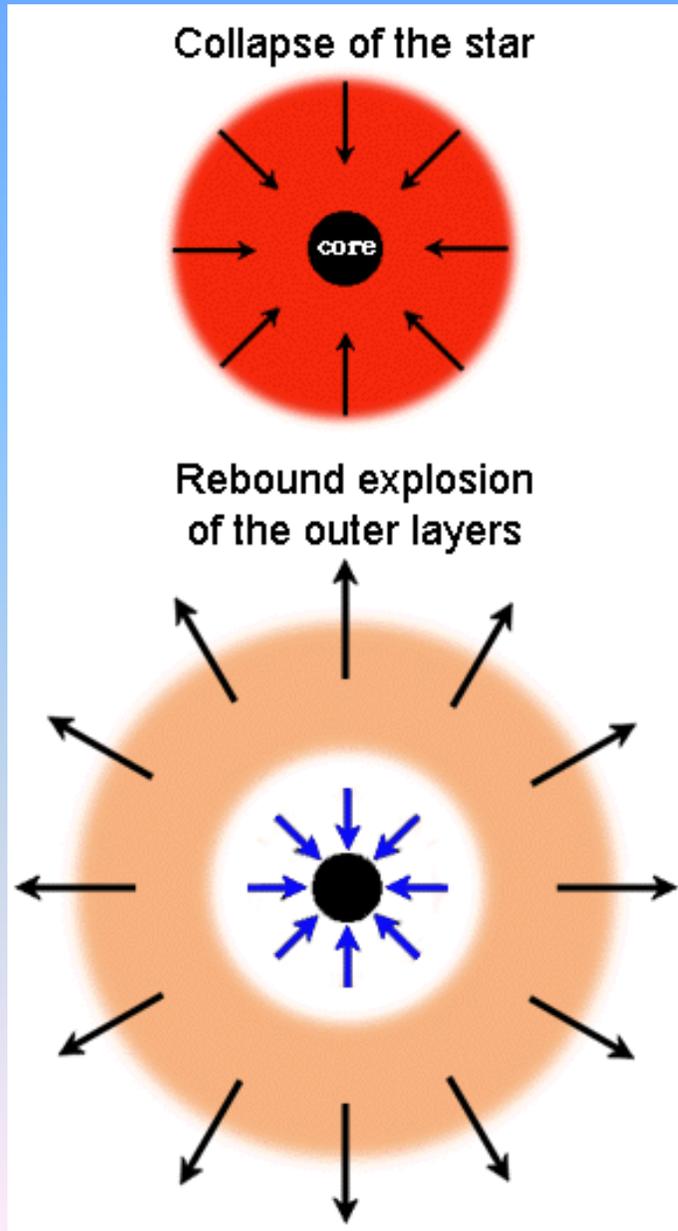
FASI FINALI – Stelle di grande massa: cicli contrazione-espansione e collasso finale

Per stelle di massa grande rispetto a quella del Sole ($M > 8 M_{\odot}$) la contrazione porta all'innescò 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

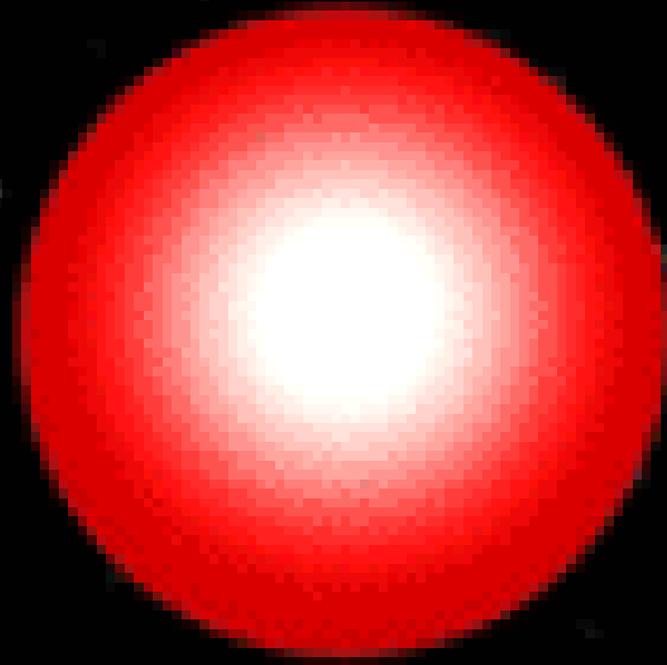


Gli strati esterni, che precipitano sul nucleo, “rimbalzano” su di esso, dando luogo ad una esplosione catastrofica: la stella diviene una *supernova*.

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.

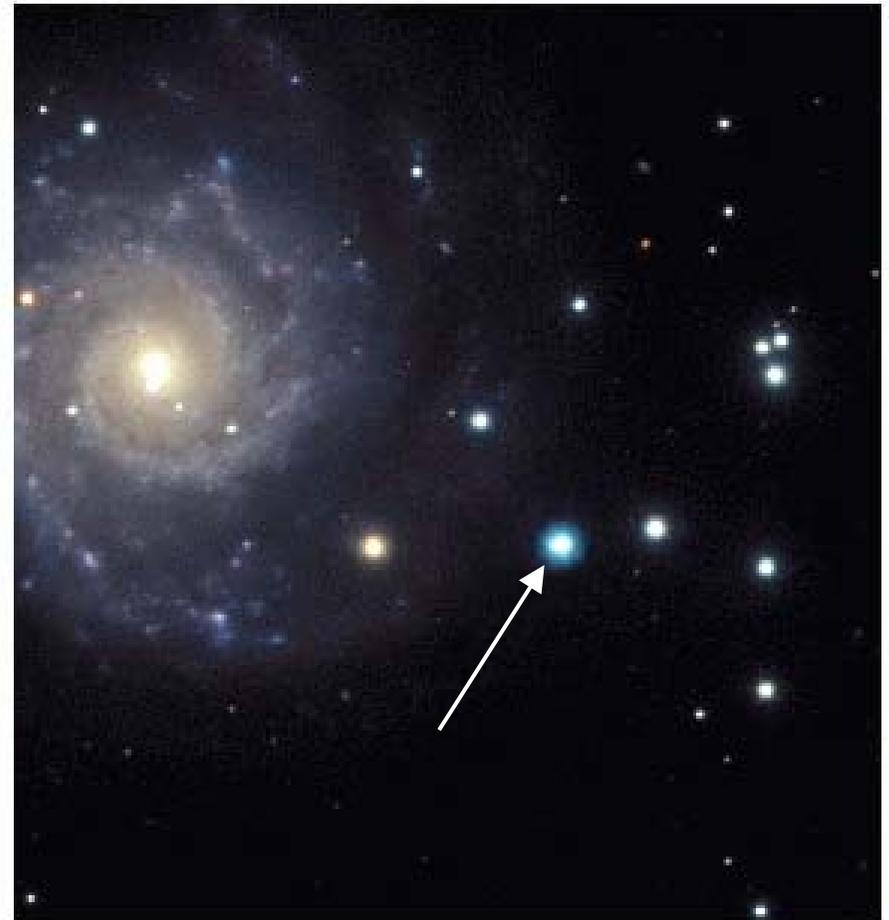
FASI FINALI – Stelle di grande massa: supernovae



**M74 - Digital Sky Survey
1990**



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



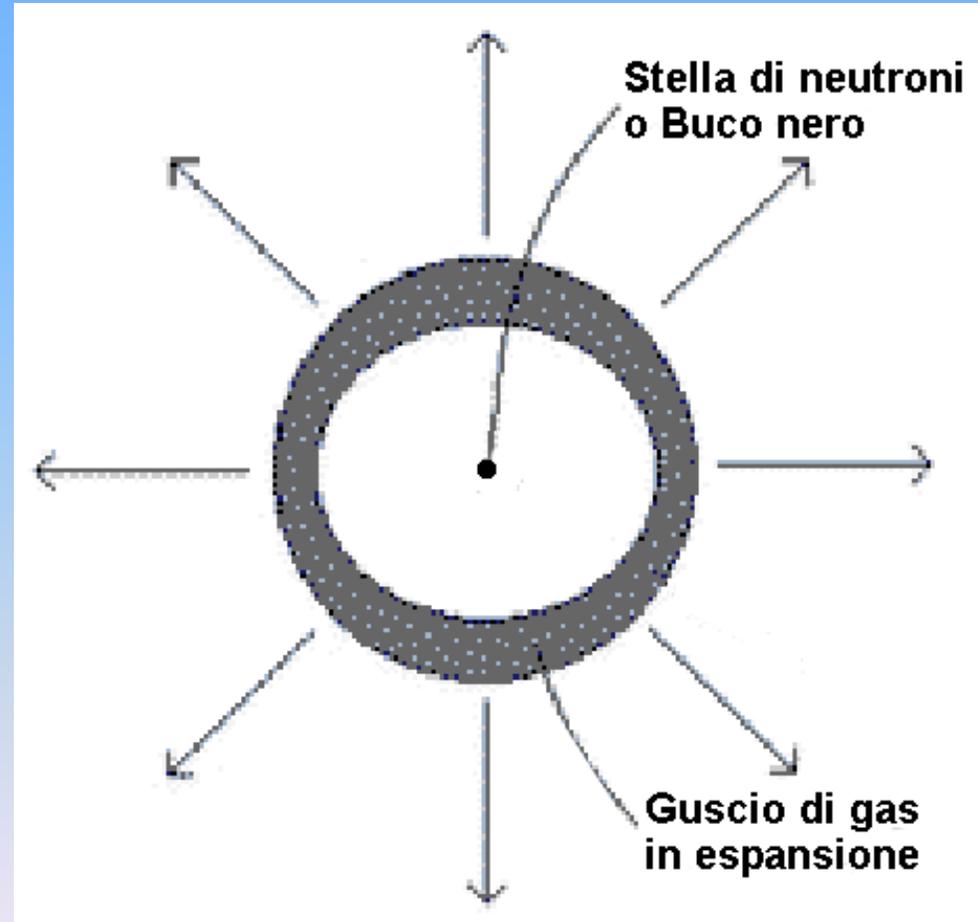
Esplosione di supernova nella galassia M74

Nebulosa Granchio
(M1) nel Toro

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.



FASI FINALI – Stelle di grande massa: buchi neri (1)

Nelle nane bianche e nelle stelle di neutroni il collasso gravitazionale del corpo è arrestato da forze di natura quantistica legate alla pressione dovuta al moto degli elettroni e dei neutroni all'interno della stella.

Se il residuo dell'esplosione di supernova è molto massiccio ($M > 2-3 M_{\odot}$), neanche queste forze sono in grado di bilanciare la forza di gravità ed il collasso continua indefinitamente: il corpo tende verso uno stato di volume nullo e densità infinita (*singolarità*).

FASI FINALI – Stelle di grande massa: buchi neri (2)

Quando il raggio del residuo in contrazione diventa pari al cosiddetto *raggio di Schwarzschild* :

$$R_s = \frac{2G}{c} M$$

(G : costante di gravitazione universale
 c : velocità della luce nel vuoto)

l'attrazione gravitazionale alla superficie diventa tanto forte che nulla, nemmeno la luce, può sfuggirvi.

Al posto della stella rimane nello spazio una regione del diametro di una decina di km che, non potendo inviare luce verso l'esterno, appare nera.

FASI FINALI – Stelle di grande massa: buchi neri (3)

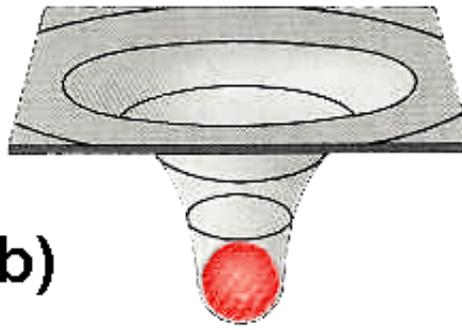
Pur essendo questi oggetti invisibili, sono individuabili per la loro azione gravitazionale.

“Se qualche corpo luminifero dovesse orbitare intorno ad essi noi potremmo, forse, dal moto di questi corpi orbitanti inferire l’esistenza dei corpi centrali” (J. Michell, 1783).

Vengono detti *buchi*, a causa di una proprietà caratteristica dello spazio-tempo in prossimità del raggio di Schwarzschild: l’incurvamento sempre più forte dello spazio che circonda un oggetto massiccio in contrazione.



a)



b)



c)

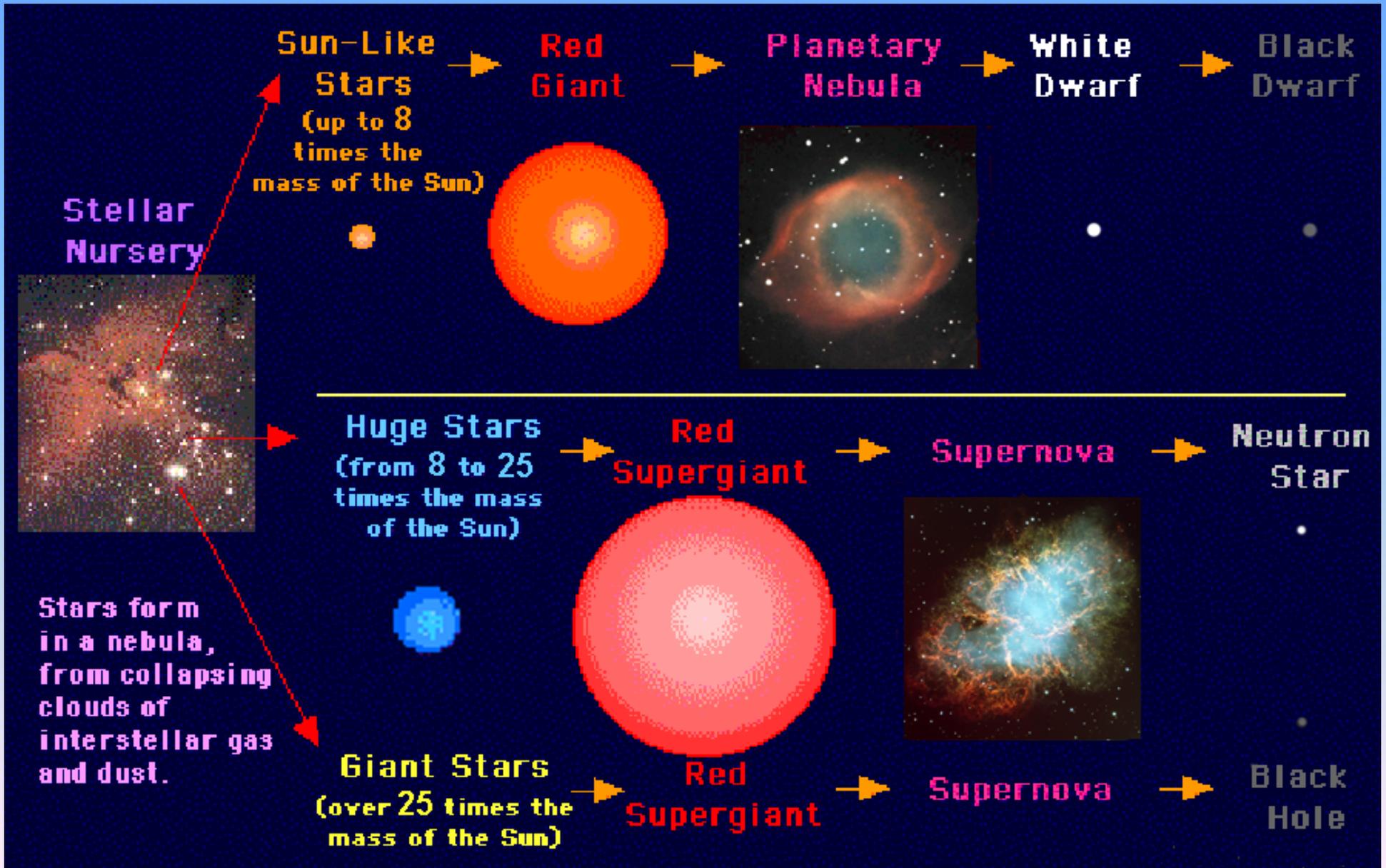
Uno spazio bidimensionale piano in assenza di massa, rappresentato in (a) da un foglio di gomma, si incurva in (b) a causa della presenza di una massa non troppo concentrata, fino a diventare in (c) una specie di imbuto quando la stessa massa assume una elevata densità.

Man mano che la massa si concentra, le pareti che la sovrastano tendono a diventare parallele, formando un *buco* attraverso cui la materia “esce” dal nostro Universo.

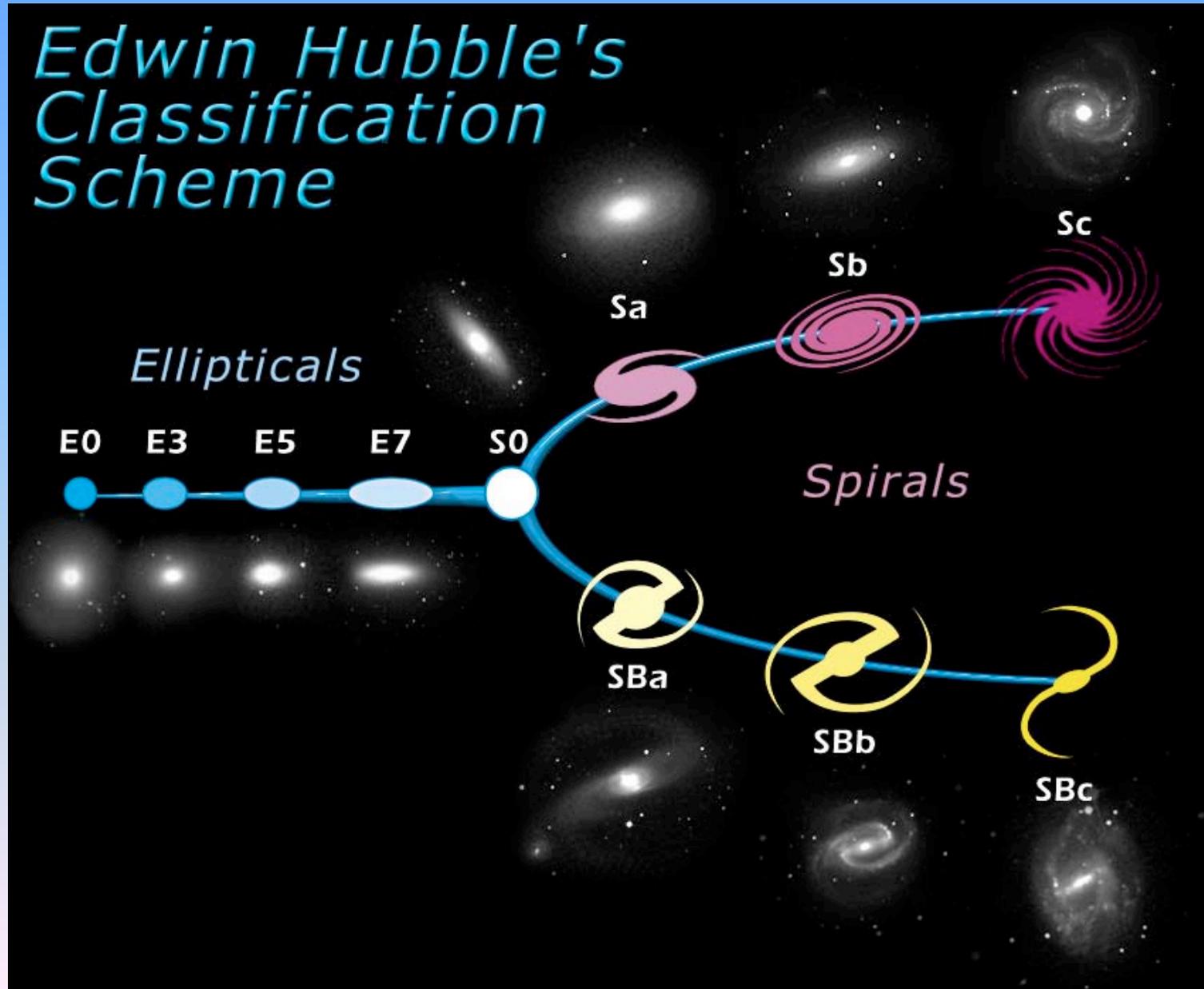


Un buco nero isolato risulterebbe individuabile per un ipotetico osservatore solo se quest'ultimo gli fosse molto vicino.

EVOLUZIONE STELLARE – Riepilogo



GALASSIE – Classificazione



GALASSIE – Galassie a spirale (1)

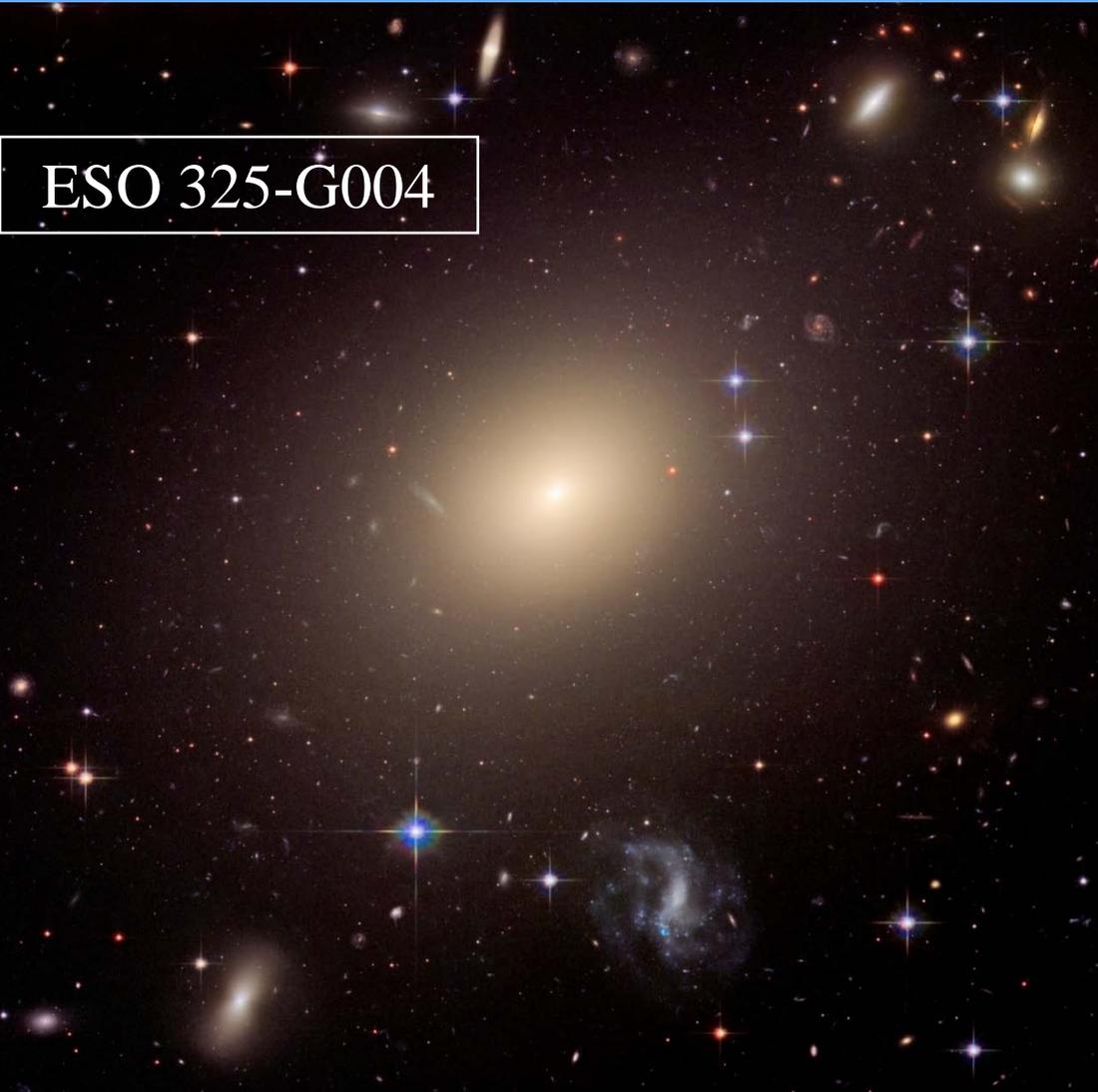


GALASSIE – Galassie a spirale (2)



Galassia di Andromeda (M31)

GALASSIE – Galassie ellittiche



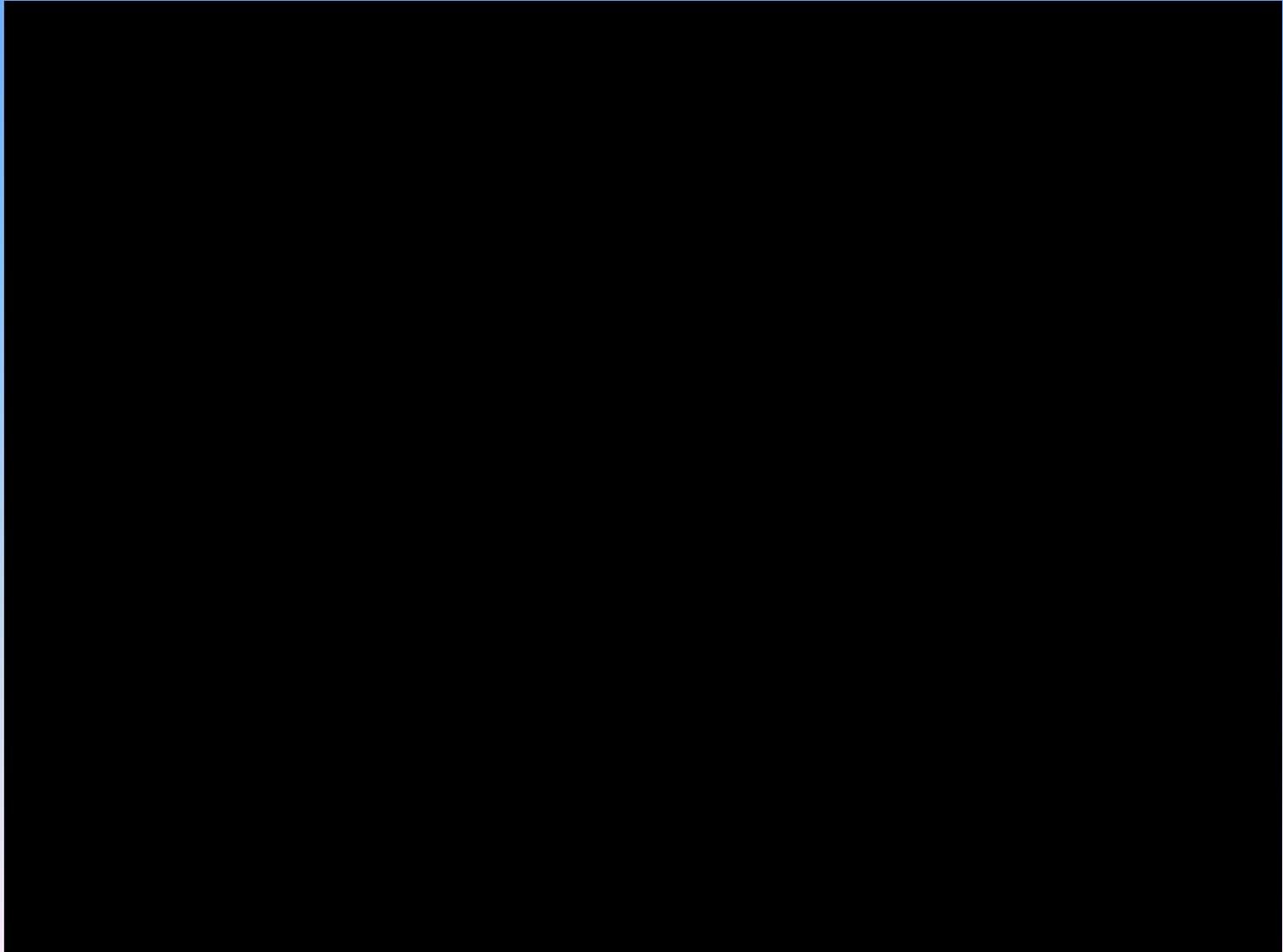
ESO 325-G004

© Anglo-Australian Observatory

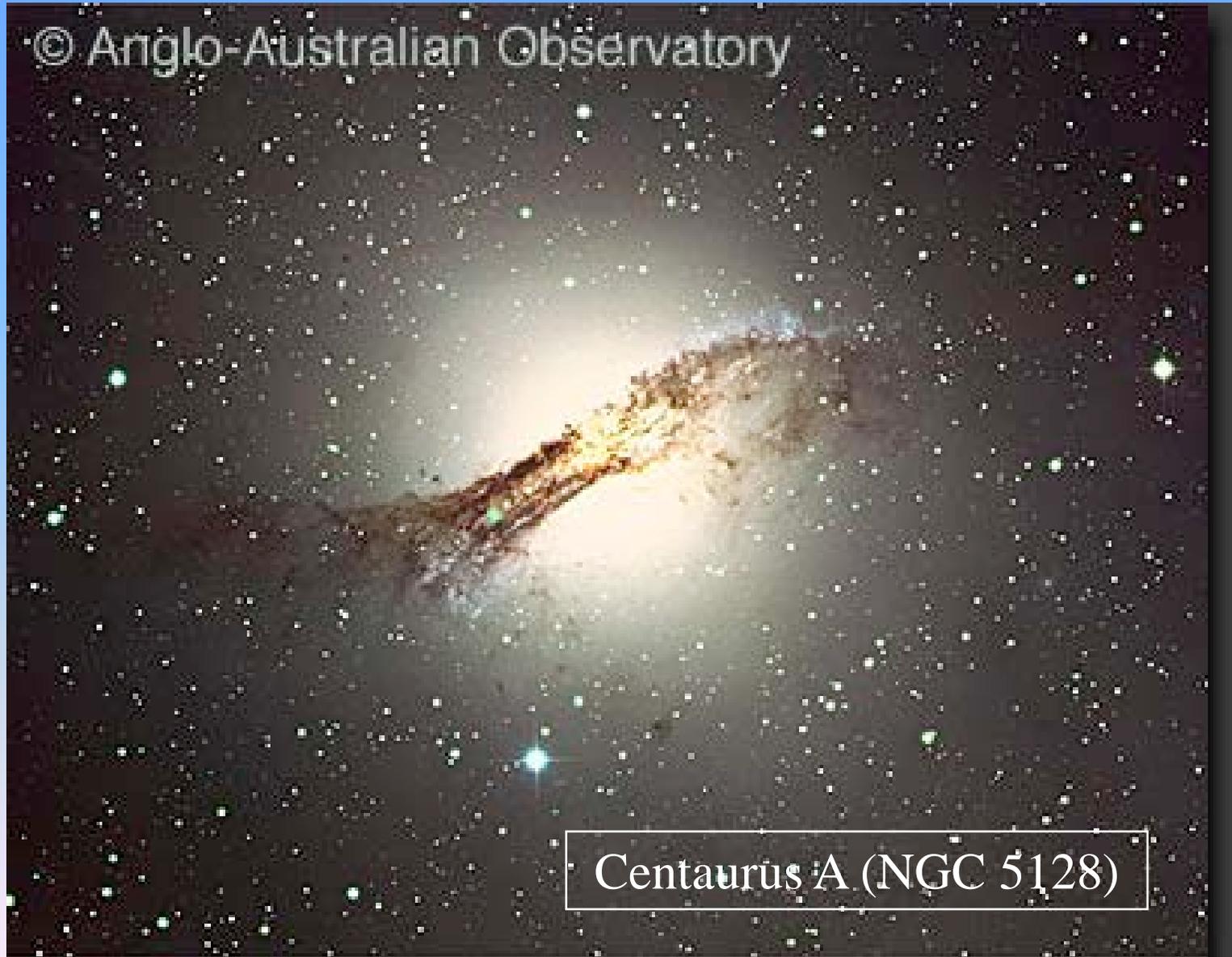


M 87

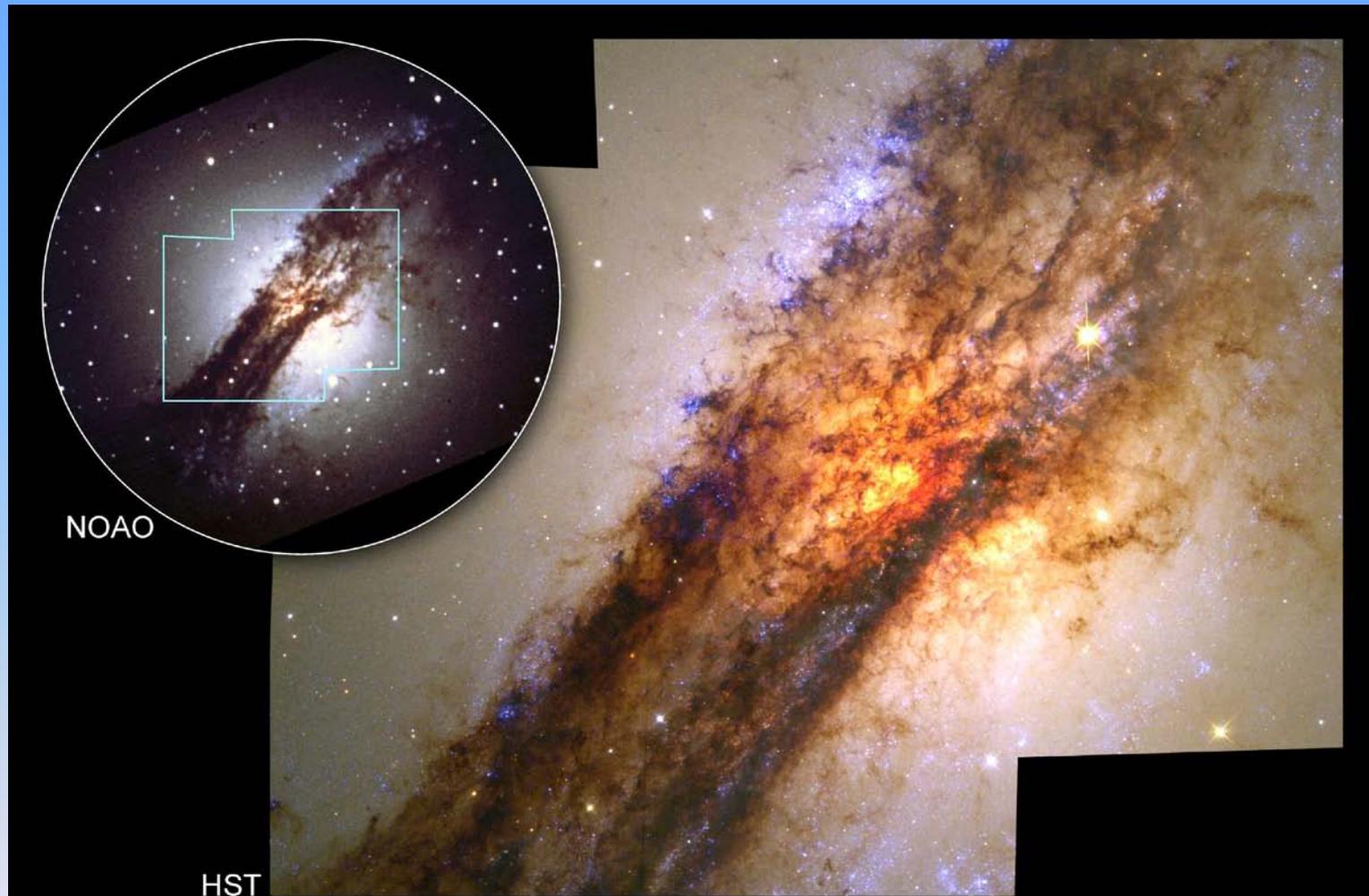
GALASSIE – Coalescenza (*Merging*) di galassie



GALASSIE – Cannibalismo galattico (1)



GALASSIE – Cannibalismo galattico (2)



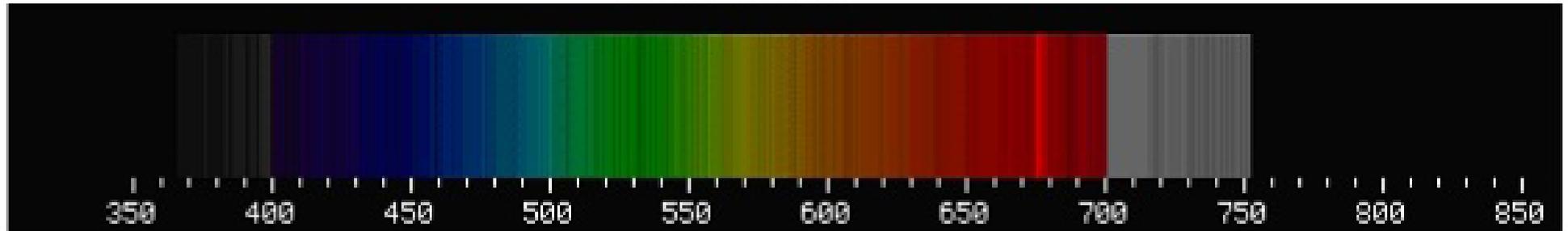
NOAO

HST

Active Galaxy Centaurus A
Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

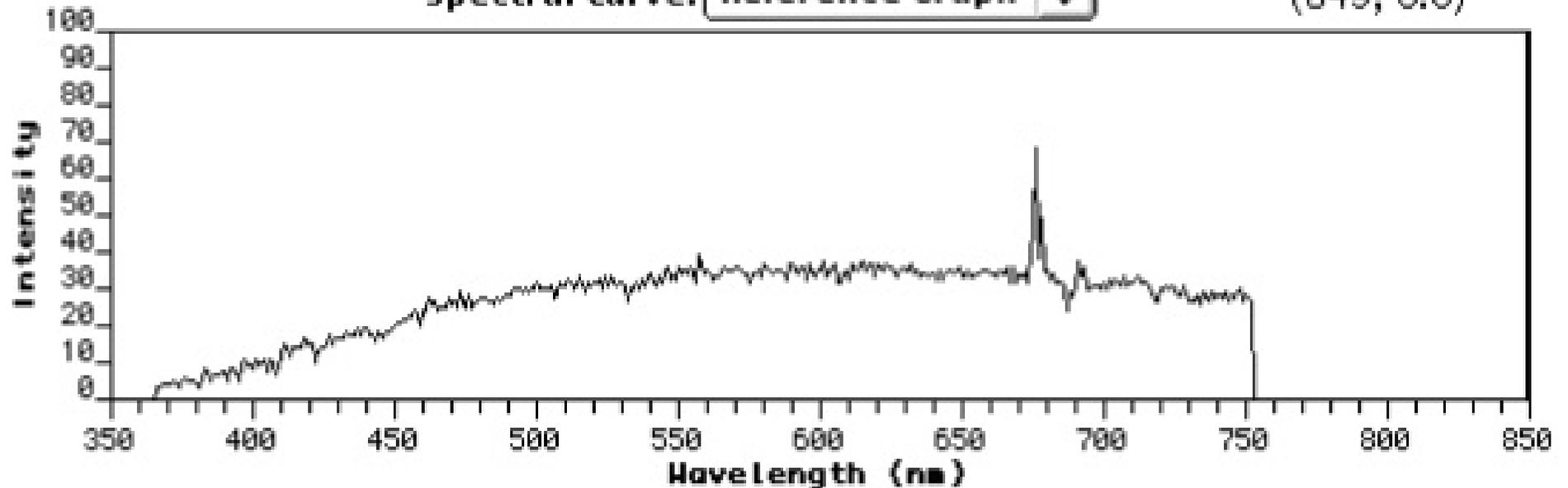
GALASSIE – Spettro tipico

Spectroscope



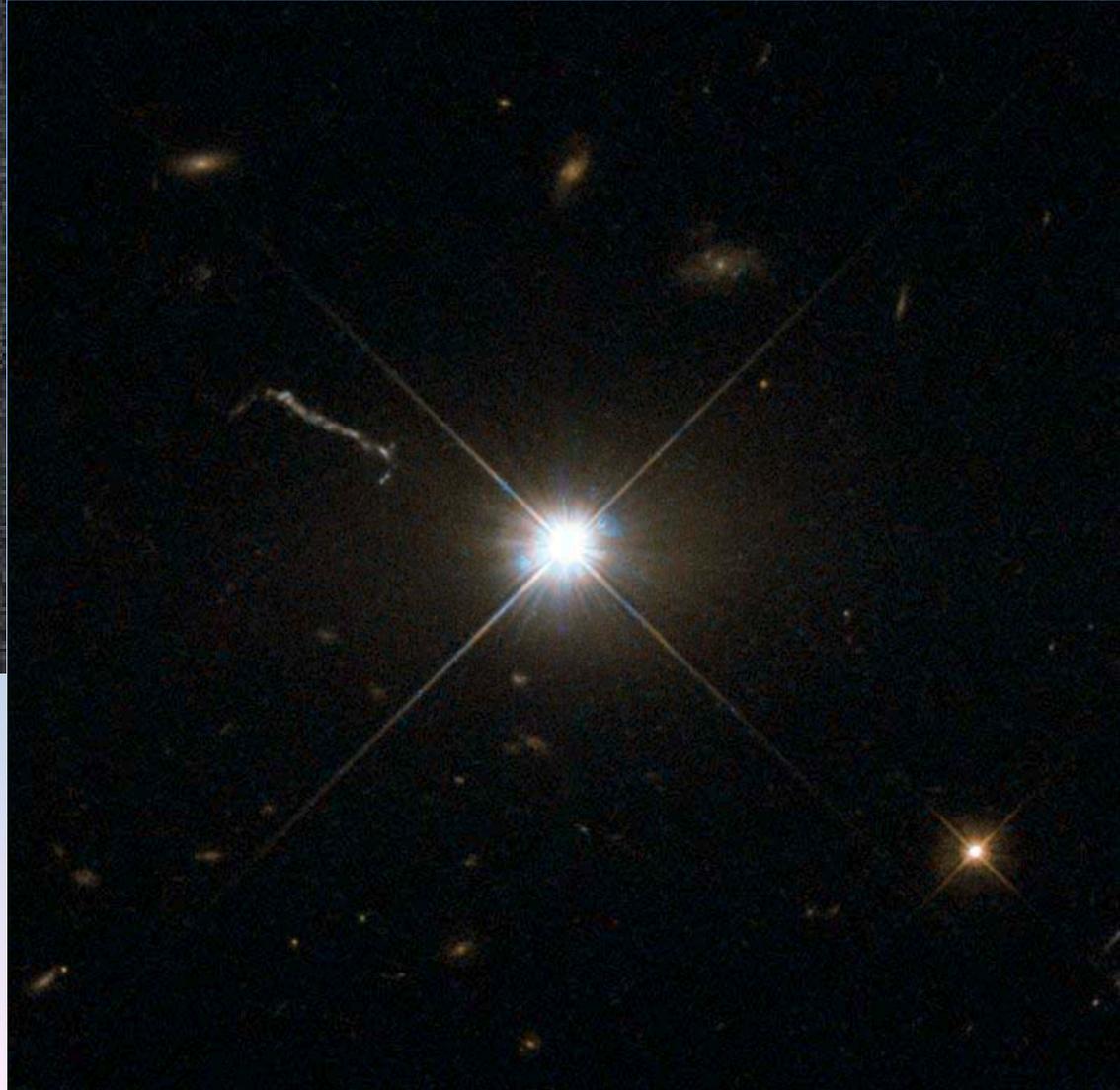
Spectral Curve: Reference Graph

(849, 0.0)



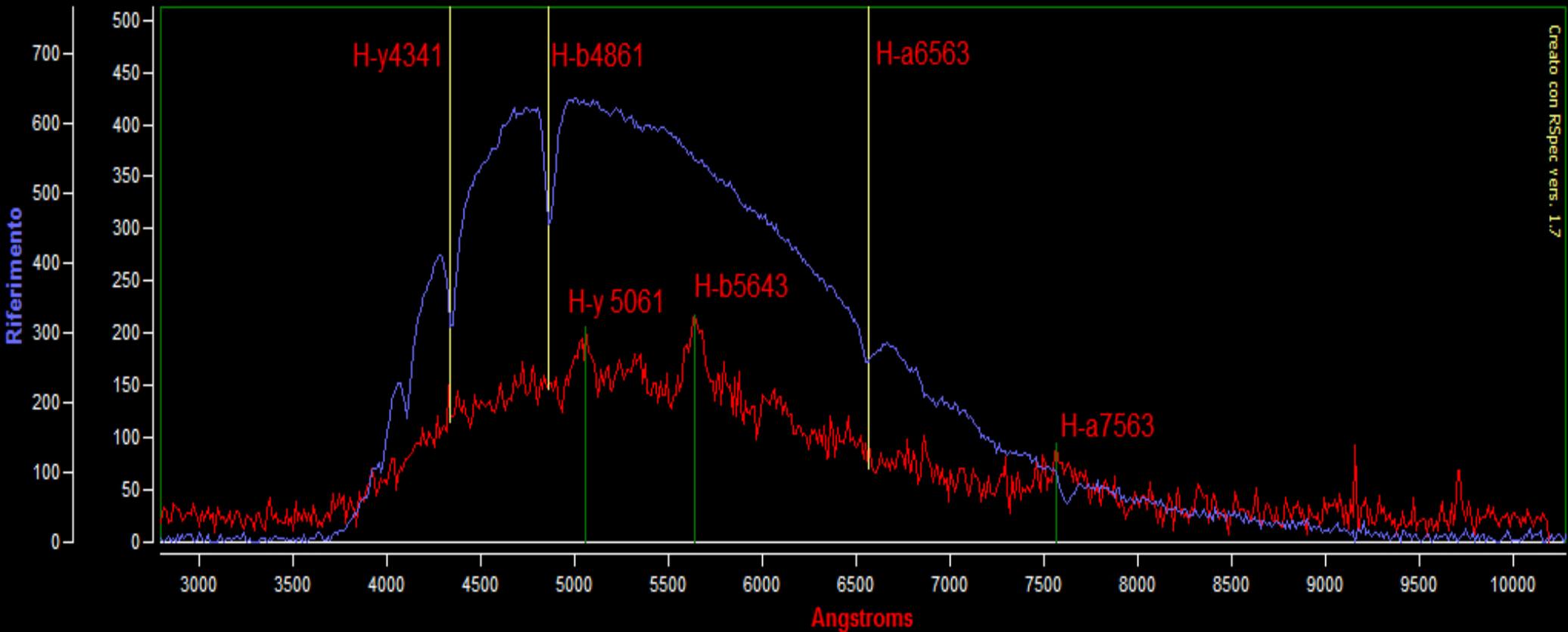
Electromagnetic Spectrum

QUASAR – Morfologia tipica



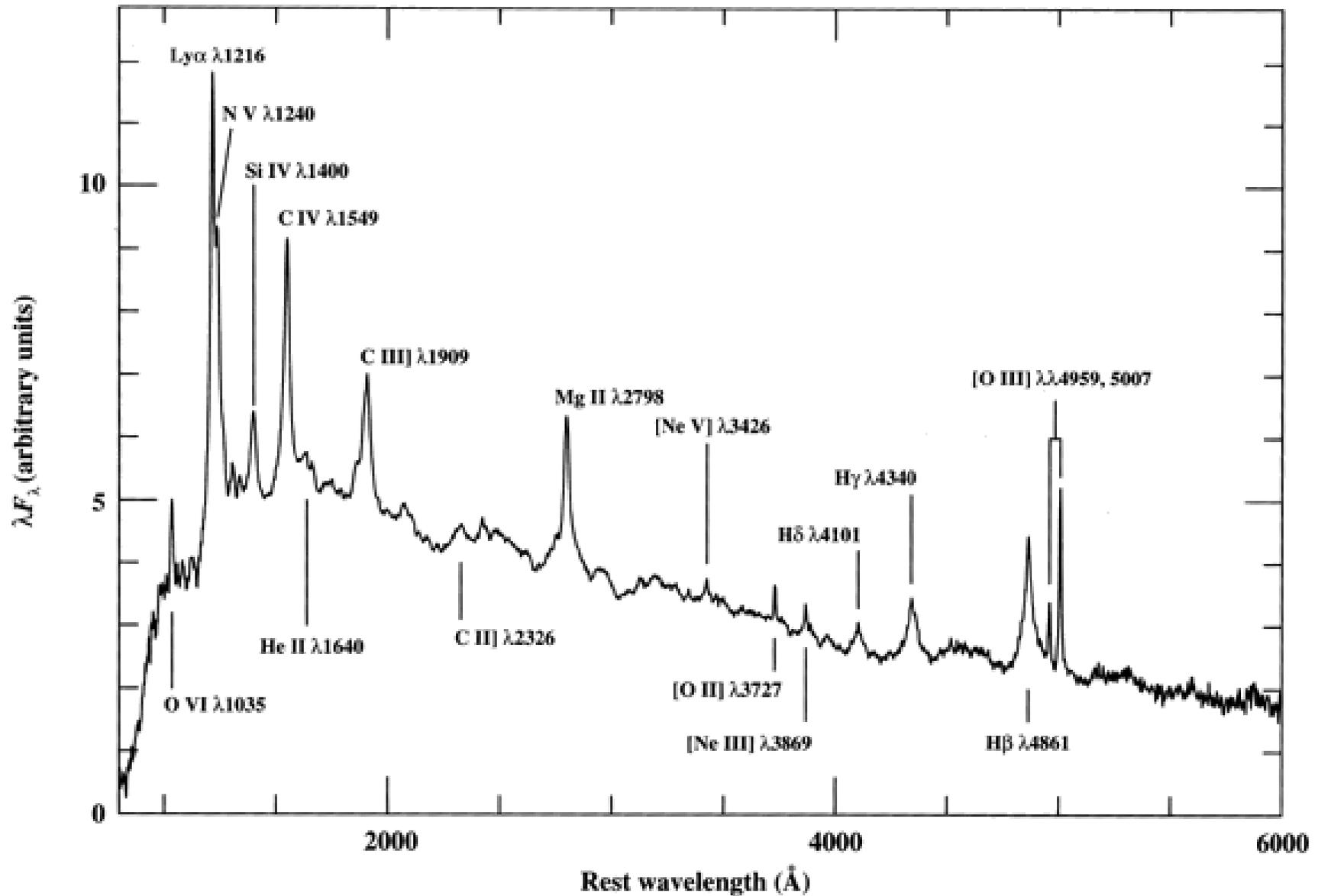
QUASAR – Spettro (1)

Quasar 3C 273

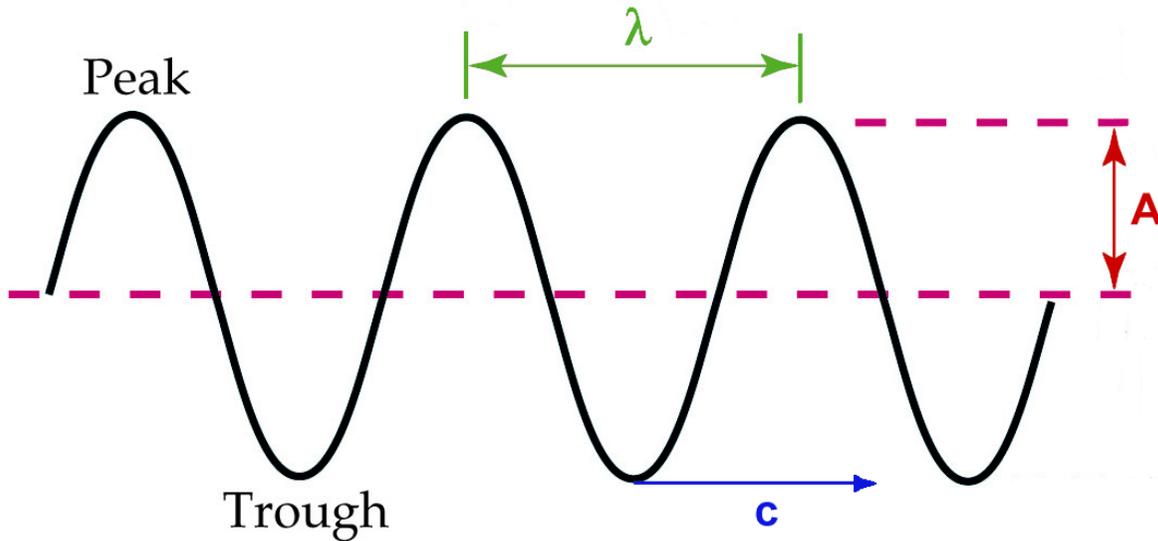


Creato con RSpec vers. 1.7

QUASAR – Spettro (2)



EFFETTO DOPPLER – Richiami sulla lunghezza d'onda

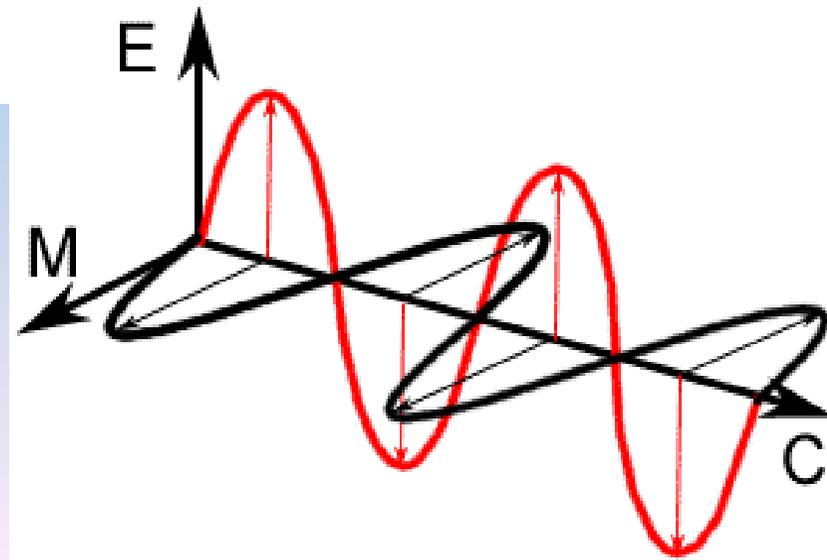


A : ampiezza

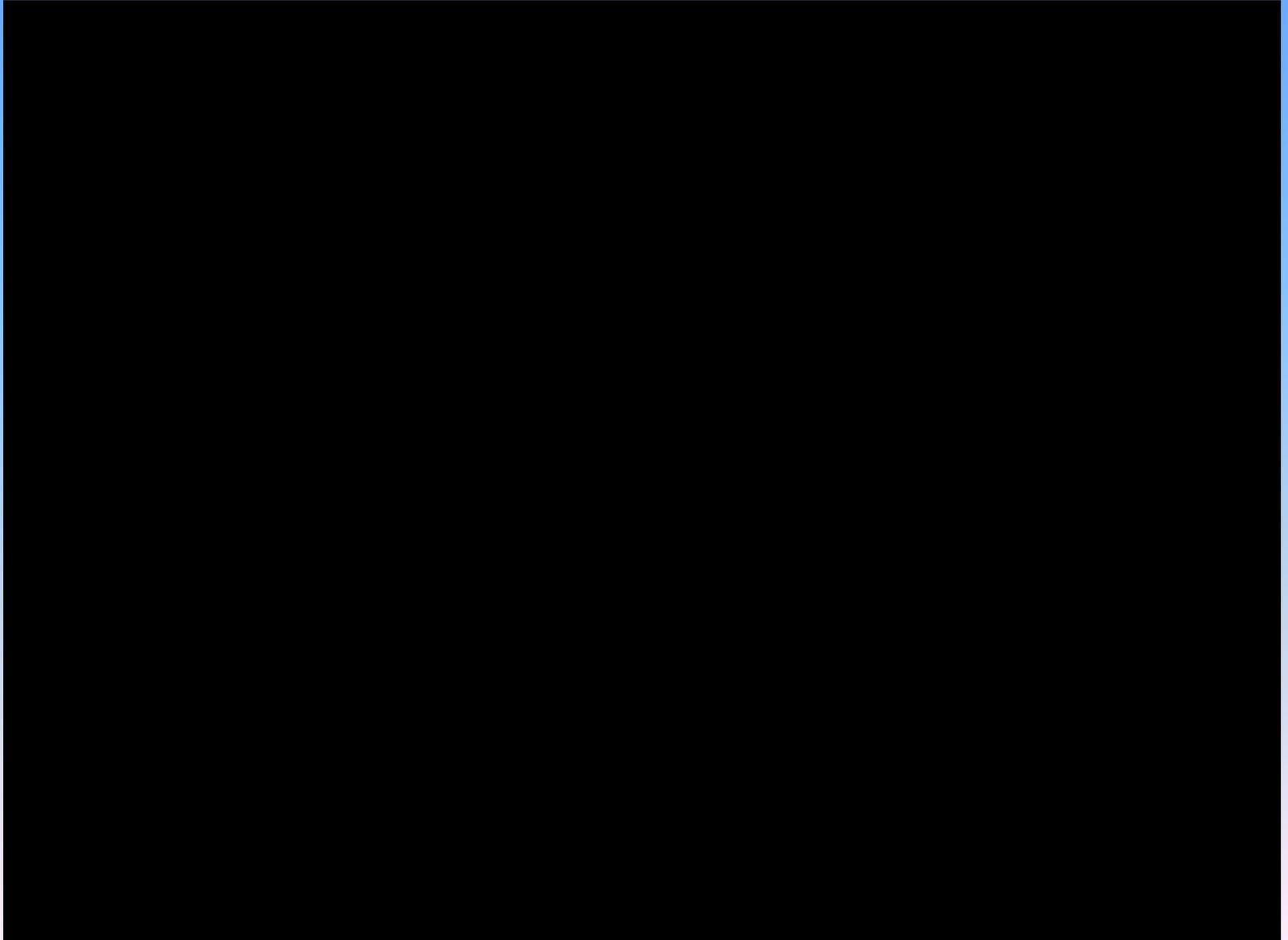
λ : lunghezza d'onda

c : velocità ($c \cong 300\cdot000$ km/s)

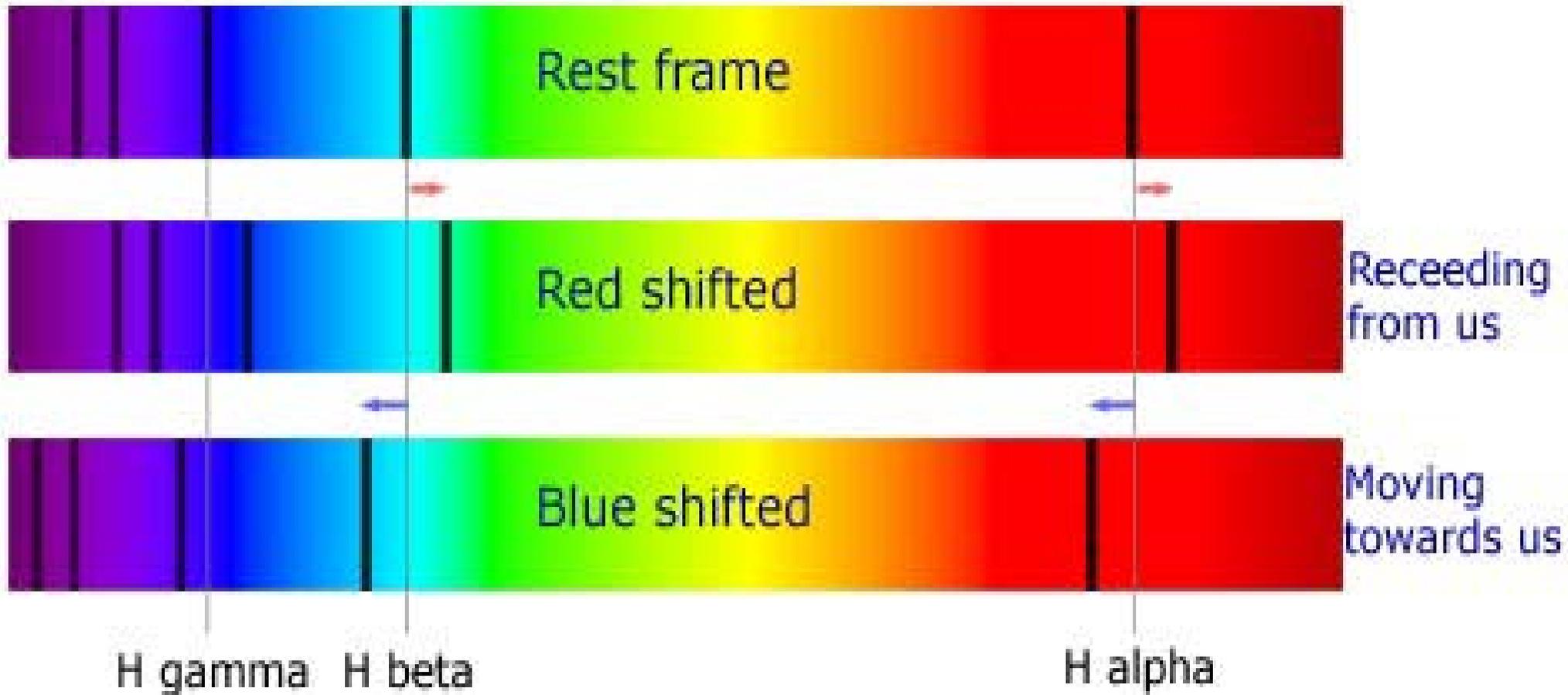
ν : frequenza ($\nu = c/\lambda$)



EFFETTO DOPPLER – Spiegazione



RED SHIFT & BLUE SHIFT



RED SHIFT E BIG BANG

