

# EVOLUZIONE STELLARE

dalla polvere...

...ai Buchi Neri

Giant Sequence

Sub-Giant Sequence

Planetary Nebula Sequence

T-Tauri Sequence

AGB Star Sequence

White Dwarf Sequence



# DEFINIZIONE DI STELLA

La definizione che più si avvicina al nostro scopo è che una **stella** è un «**corpo celeste che si trova in equilibrio idrostatico che emette luce propria**».

# Ingredienti concettuali

## Massa

- «quantità di materia contenuta in un corpo»;
- $E=mc^2$



**Conseguenza**

«spinta» verso l'esterno



**Equilibrio Idrostatico**

## Pressione

- quantità di forza che viene applicata ad una superficie;
- All'interno delle stelle la pressione è principalmente dovuta alla Forza di gravità che tende a comprimere la materia, in pratica «spinge» verso l'interno.



**Conseguenza**

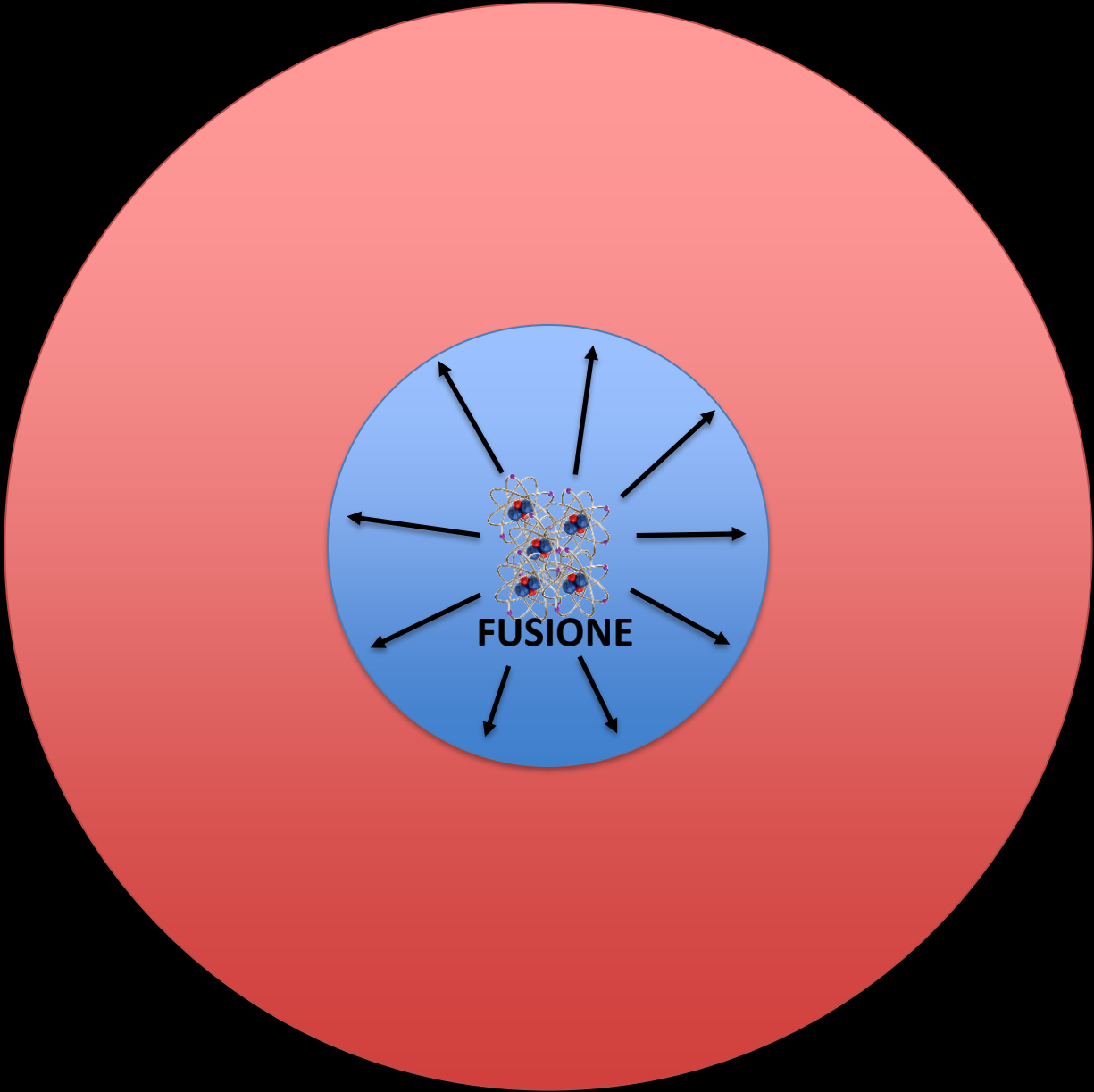
«spinta» verso l'interno



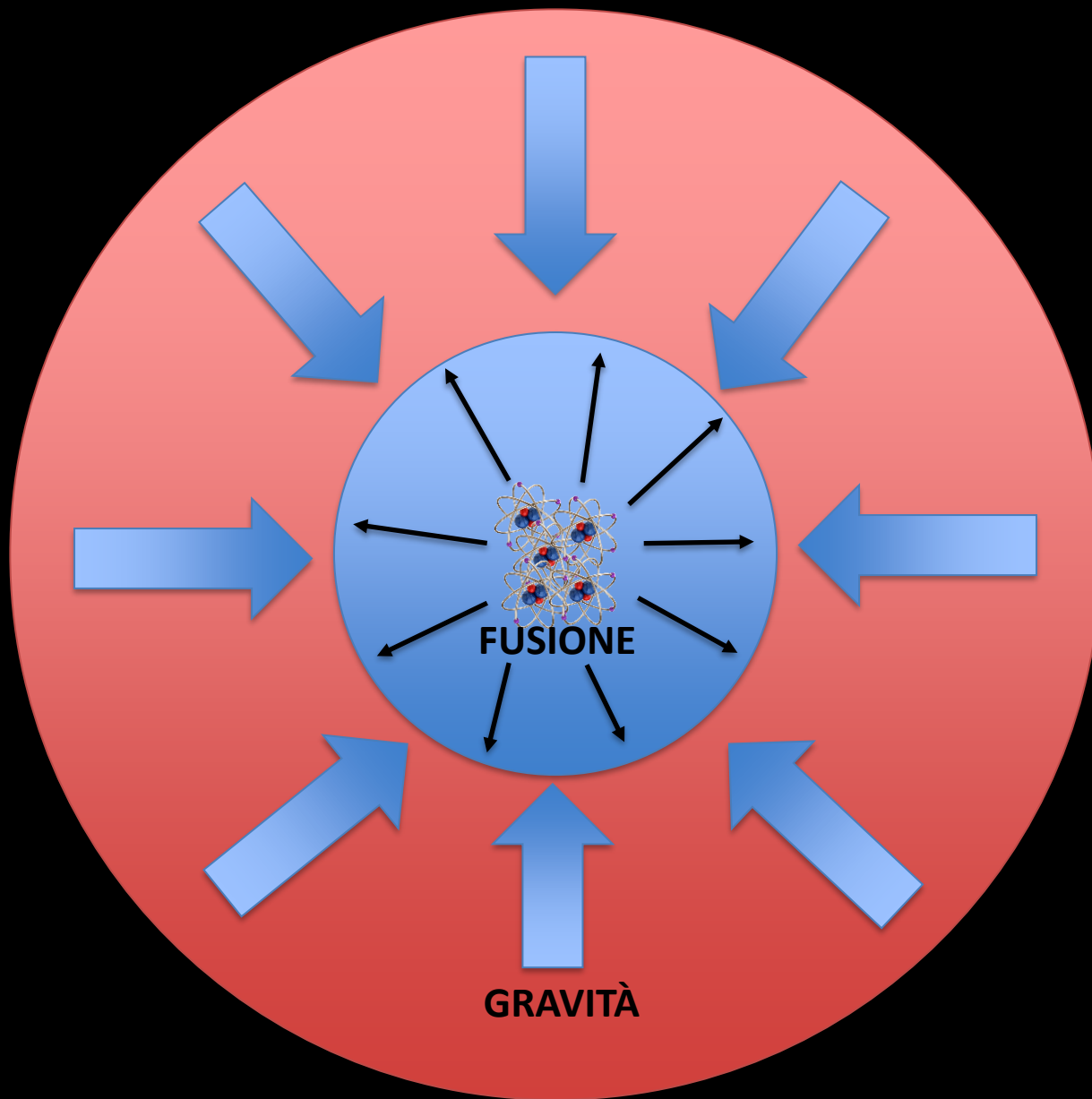
## Materia

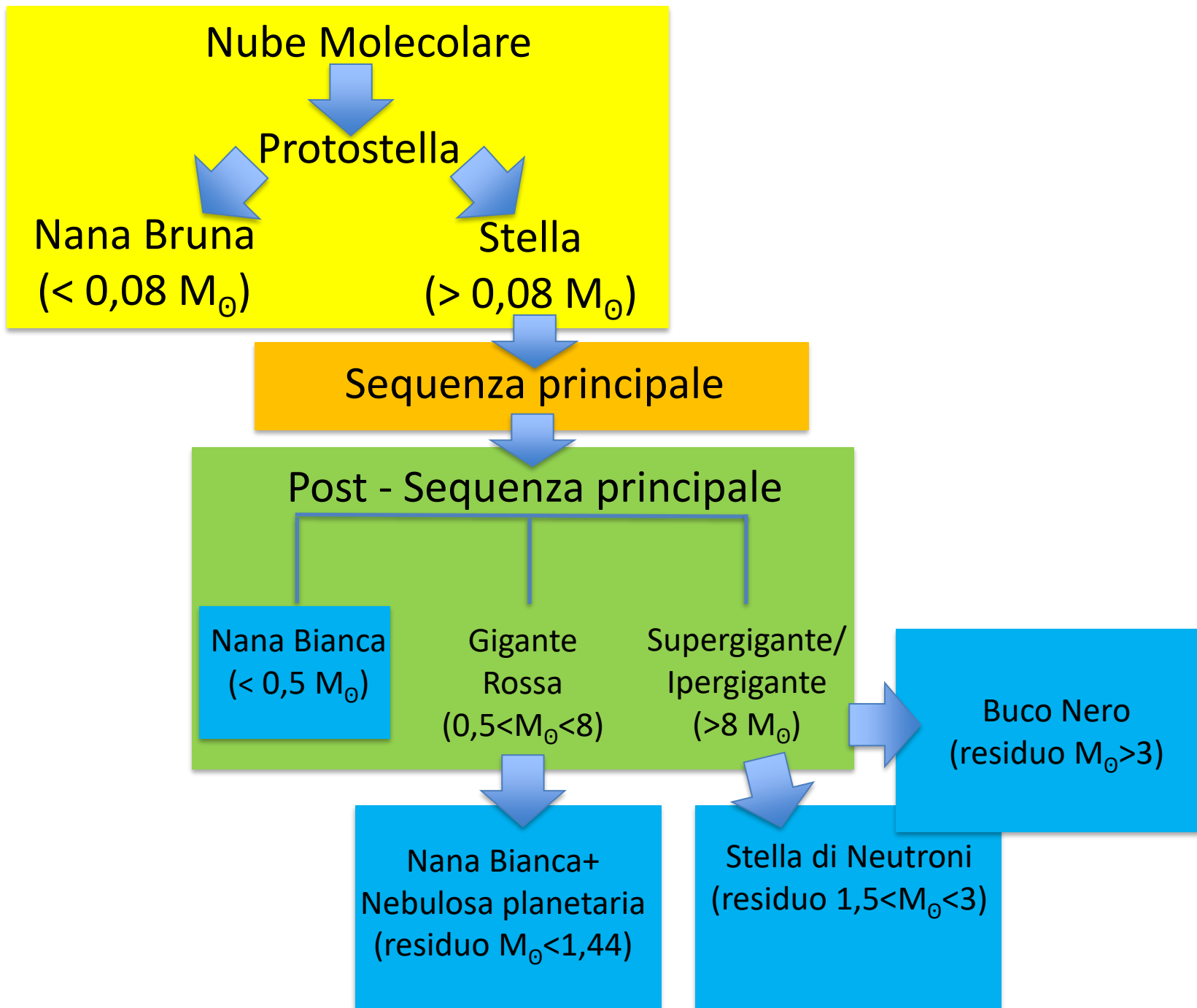
## degenerare

- Stato di profonda alterazione della materia;
- Meccanica Quantistica.



FUSIONE



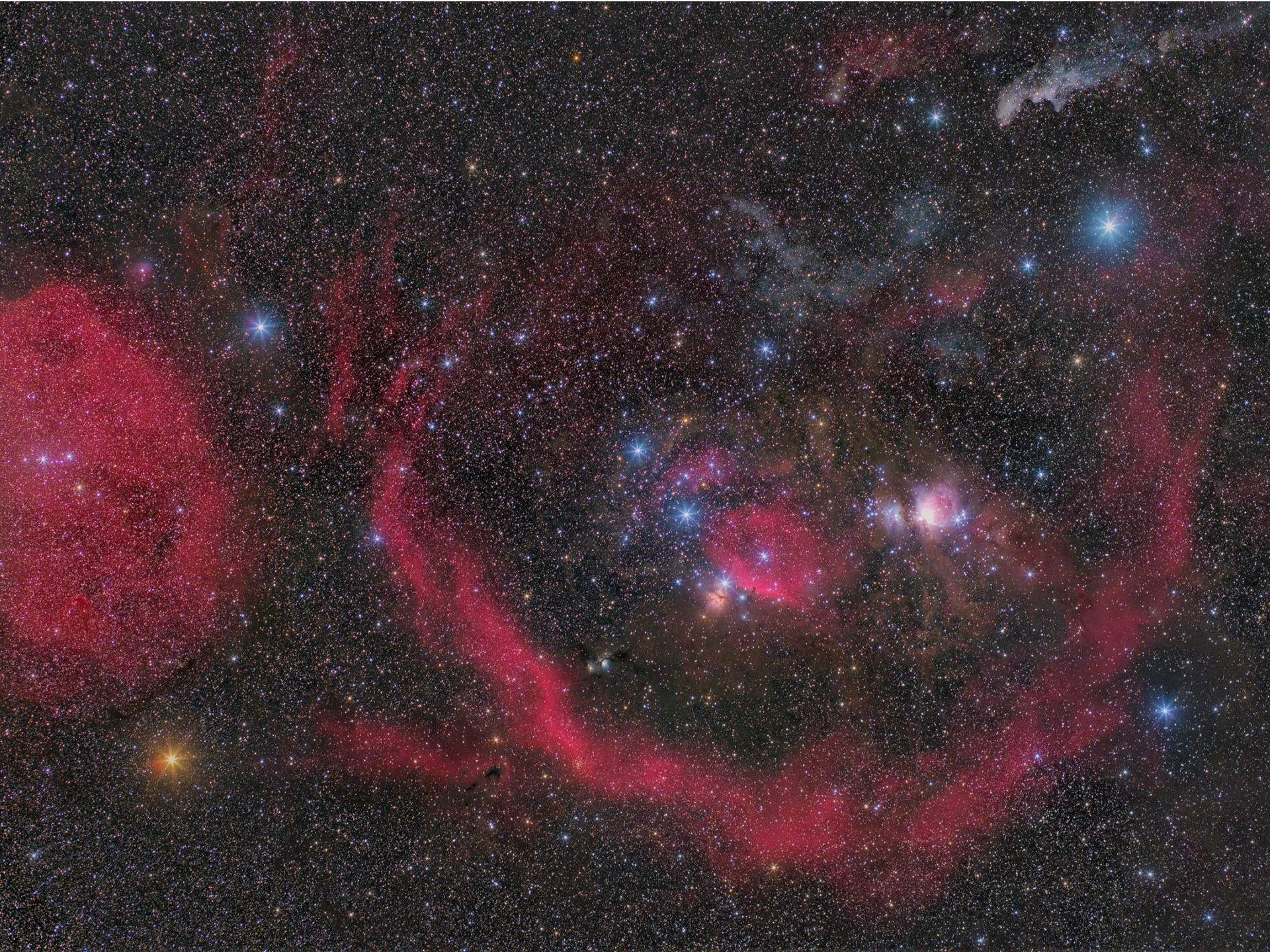


# 1° passaggio: DALLA NUBE MOLECOLARE ALLA STELLA

Una molecola è un insieme di 2 o più atomi di uno stesso elemento o di elementi diversi.

**Nube molecolare = Idrogeno + Elio**  
spesso «arricchita» con altri elementi più pesanti

La sua temperatura, nelle fasi iniziali, è molto bassa, di poco al di sopra dello 0 assoluto ( $0\text{ K} = -273,15\text{ °C}$ ).



# Sottopassaggio 1: aggregazione nube molecolare

- Gravità (in questo caso si parla di nube «autogravitante») (tener presente che la materia in una nube molecolare non è disposta in modo uniforme!!);
- onda d'urto generata da una supernova;
- vento stellare generato da stelle giovani. (es. nebulosa Rosetta);
- scontro tra due nubi all'interno della galassia.



La nube inizia lentamente a collassare su se stessa e questo processo dura da migliaia di anni (meno di 100.000 anni per stelle di circa  $15 M_{\odot}$ ) a centinaia di milioni di anni (circa 150 milioni per stelle di  $0,5 M_{\odot}$ ) a seconda della massa della nube stessa.

### Durata della fase di Pre-Sequenza principale (PMS)

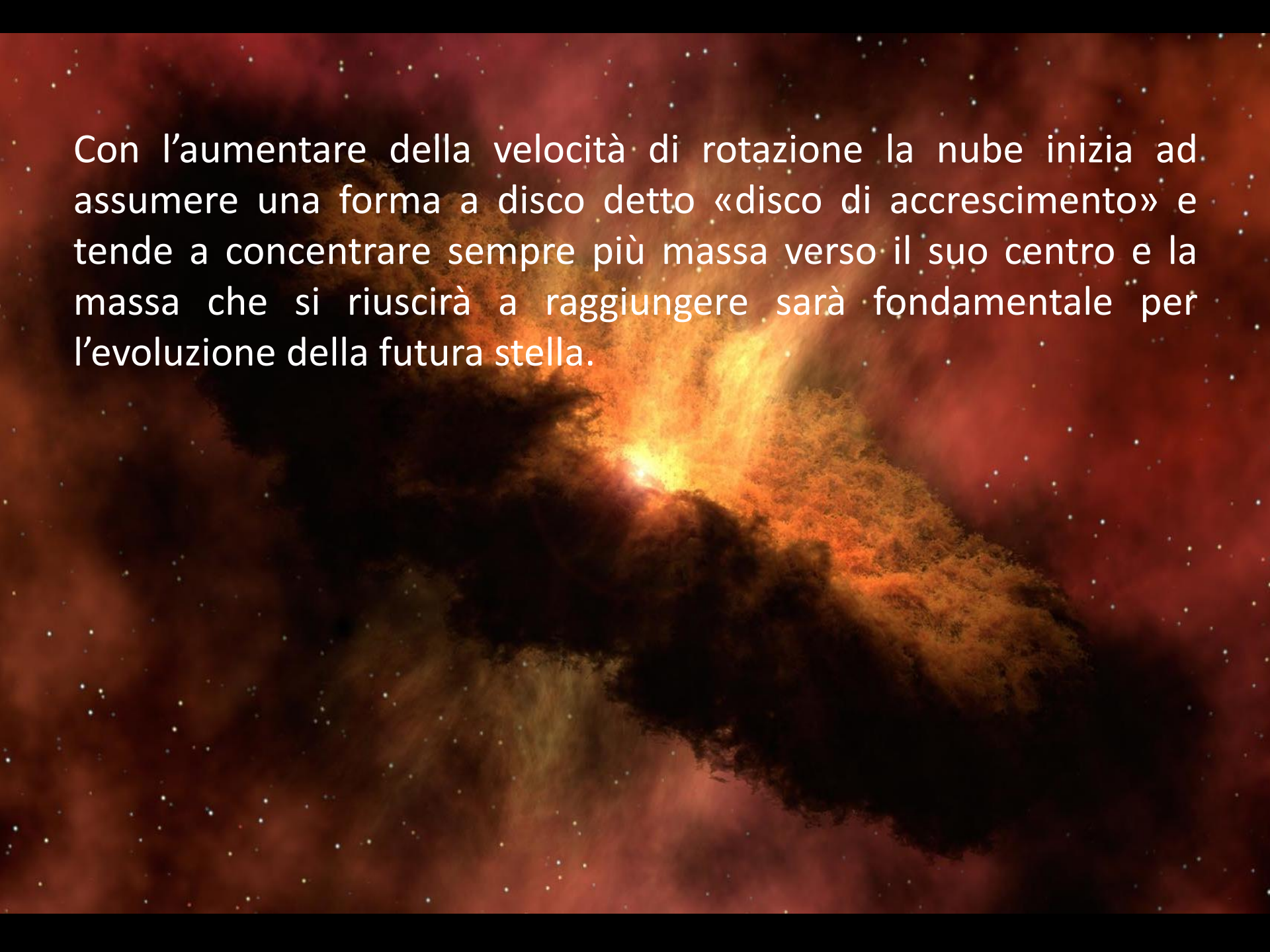
$M_{\odot}$	15	5	3	1	0,5
Durata (milioni di anni)	0,06 (60.000 anni)	0,6 (600.000 anni)	2,5	50	150

## Sottopassaggio 2: comportamento nube molecolare

A seguito della compressione di gas e polveri, quale che sia l'origine di questa compressione, iniziano a intervenire due processi:

- Riscaldamento della nube (che passa da pochi K a migliaia/milioni di K);
- Rotazione della nube (a causa della conservazione del momento angolare).

Con l'aumentare della velocità di rotazione la nube inizia ad assumere una forma a disco detto «disco di accrescimento» e tende a concentrare sempre più massa verso il suo centro e la massa che si riuscirà a raggiungere sarà fondamentale per l'evoluzione della futura stella.



# Sottopassaggio 3:

## Protostelle

- Una Protostella è un «oggetto» che non ha ancora raggiunto la temperatura necessaria a innescare i processi di fusione nucleare.
- La temperatura necessaria all'inizio del processo di fusione dell'Idrogeno in Elio è di circa 15.000.000 di gradi. Quando i processi di fusione iniziano la stella si «accende».

Il processo di fusione di un elemento in un altro viene definito «bruciamento» (quindi si parlerà di bruciamento dell'Idrogeno, dell'Elio, ecc.).

Se tutto è andato per il verso giusto e la protostella ha raggiunto la massa necessaria (almeno  $0,08 M_{\odot}$ ) a innescare i processi di bruciamento dell'Idrogeno, allora la protostella si «accende» e raggiunge la condizione di equilibrio idrostatico

**È nata una STELLA**

# 2° passaggio: LE STELLE E LA FASE DI SEQUENZA PRINCIPALE (MS)

I processi di fusione generano 2 effetti:

1. trasformano l'Idrogeno in Elio;
2. liberano energia che, contrastando la pressione indotta dalla gravità, conduce la stella ad uno stato di equilibrio idrostatico.

# Classificazione delle Stelle

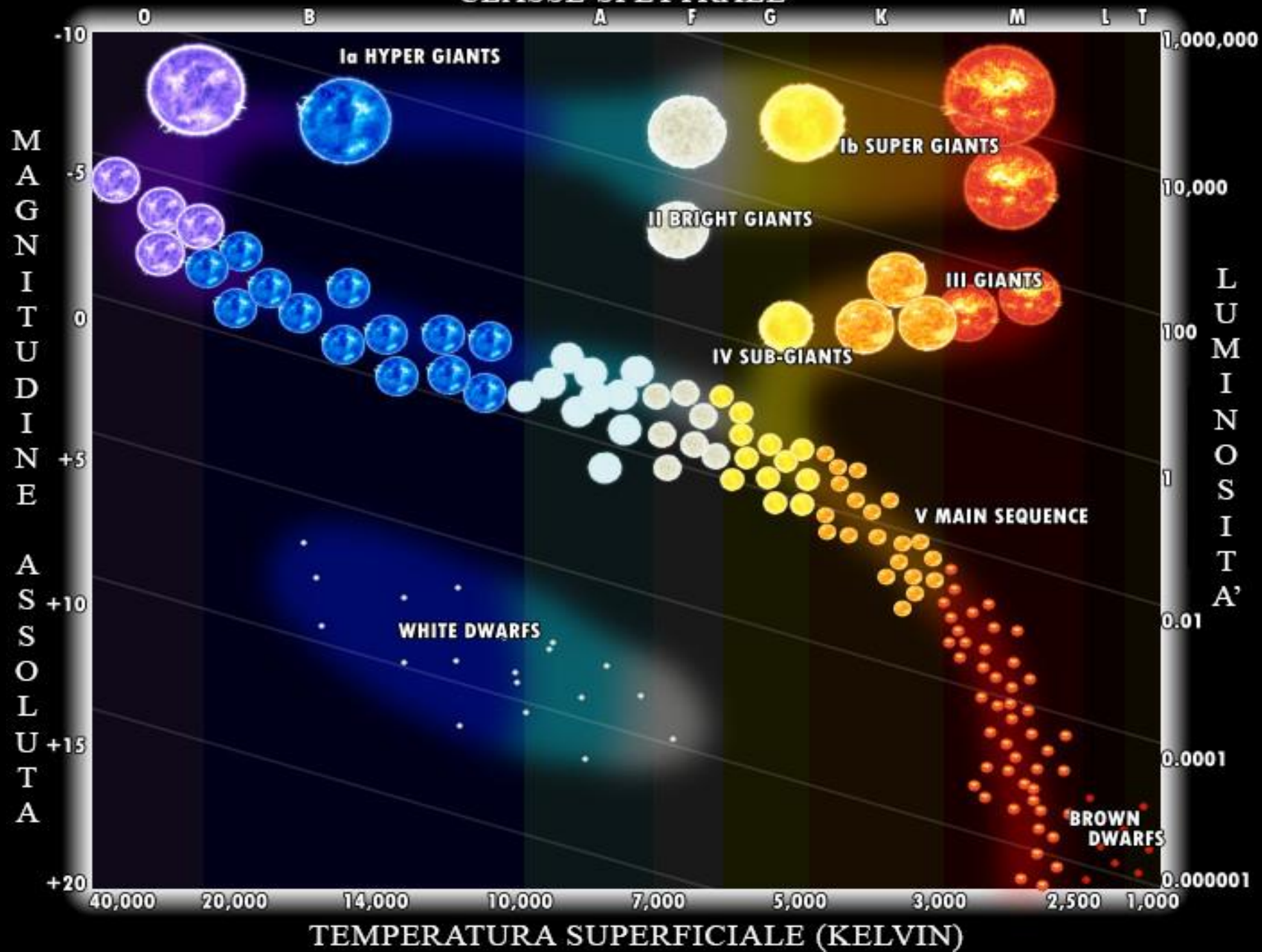
**magnitudine assoluta  
(luminosità)**

**classe spettrale  
(temperatura)**



**diagramma di Hertzsprung-Russel**

# CLASSE SPETTRALE

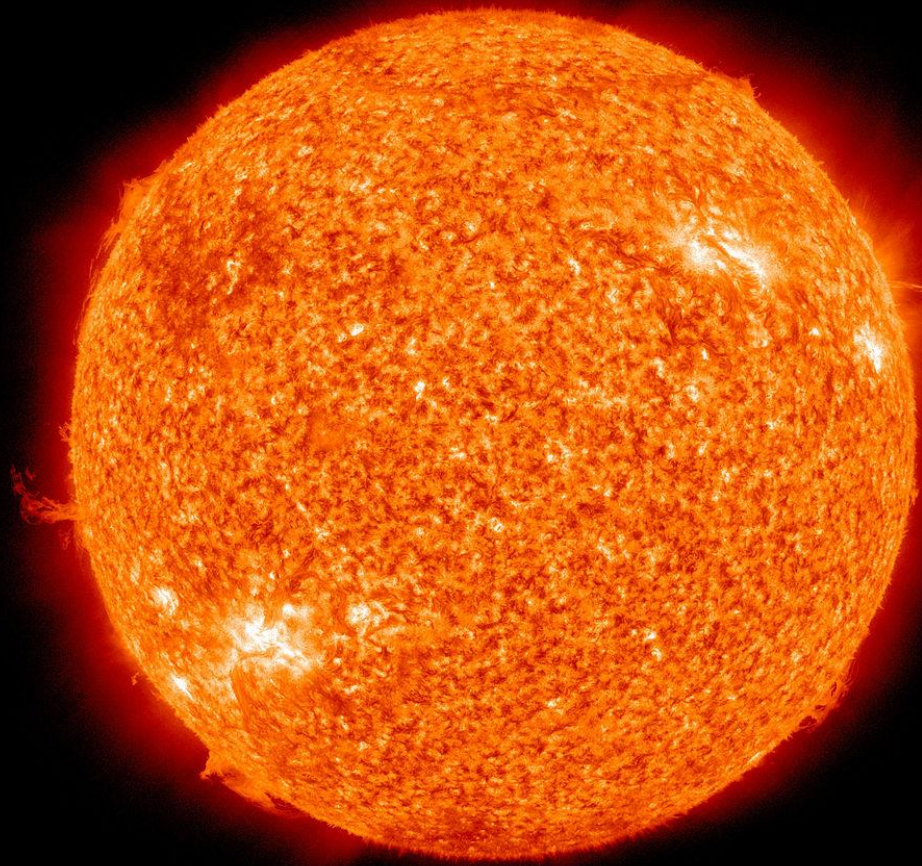


## Durata fase di Sequenza Principale

Classe spettrale	$M_{\odot}$	Durata approssimativa in anni
<b>O5</b>	<b>40</b>	<b>1 milione</b>
<b>B0</b>	<b>15</b>	<b>11 milioni</b>
<b>A0</b>	<b>3.5</b>	<b>440 milioni</b>
<b>F0</b>	<b>1.7</b>	<b>3 miliardi</b>
<b>G0</b>	<b>1.1</b>	<b>8 miliardi</b>
<b>K0</b>	<b>0.8</b>	<b>17 miliardi</b>
<b>M0</b>	<b>0.5</b>	<b>56 miliardi</b>

# Confronto in scala tra la Terra e il Sole

Terra → ·



# 3° passaggio: DOPO LA MS

Quando la stella ha bruciato tutto l'Idrogeno contenuto nel nucleo subentrano dei processi che conducono a farle perdere lo stato di Equilibrio Idrostatico a favore della Gravità.

Quando ciò avviene la stella «esce» dalla MS per non favi più rientro...vi si potrà avvicinare, ma mai rientrarvi di nuovo!

Semplificando, cosa avviene?

Avviene che l'energia prodotta dal bruciamento dell'Idrogeno diminuisce drasticamente e si ha un sopravvento della pressione dovuta alla gravità che comprime il nucleo della stella.

La compressione del nucleo ne fa aumentare la densità e, di conseguenza, la temperatura che sale a circa 100 milioni K e «attiva» il bruciamento dell'Elio (dall'Elio si forma Carbonio).

I processi che intervengono nelle fasi Post-MS sono **molto complicati** e danno luogo a varie tipologie di fenomeni.

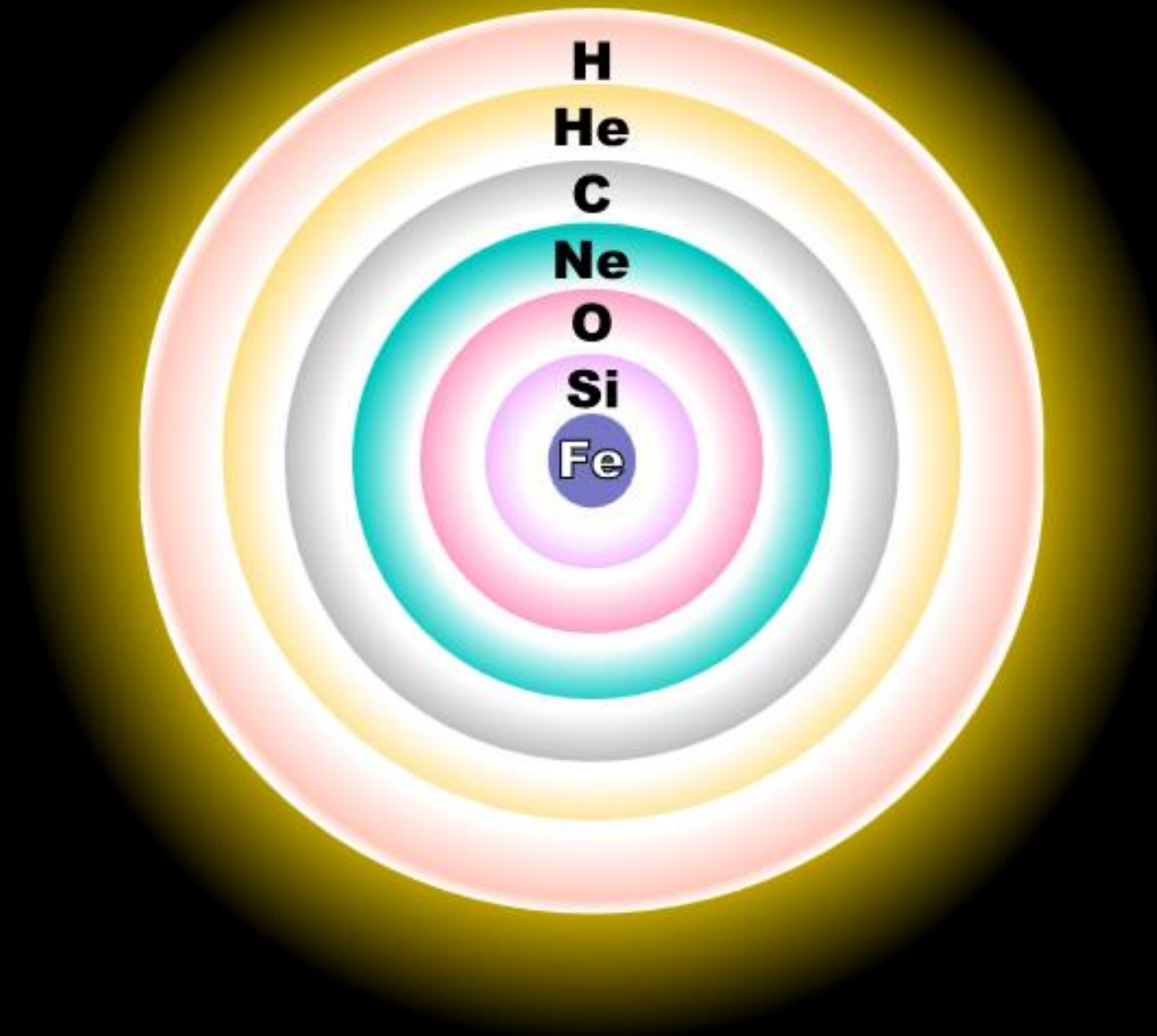
Per semplicità diremo solo che stelle con  $M_{\odot} < 0,5$  non passano attraverso la fase di Gigante Rossa.

Stelle  $0,5 < M_{\odot} < 8$  attraverseranno la fase di Gigante Rossa.

Stelle con  $M_{\odot} > 8$  diventeranno Supergiganti o Ipergiganti (a seconda della loro massa) ma possono appartenere a differenti classi spettrali o anche avere variazioni di classe.

Le stelle massicce,  $M_{\odot} > 8$ , non si fermano al bruciamento dell'Elio ma proseguono con la produzione e il successivo bruciamento di altri elementi fino ad arrivare allo stadio finale, la produzione del Ferro (Fe), ultimo elemento stabile esistente in natura.

Queste stelle hanno una struttura a «cipolla» e i processi di fusione nel nucleo innescano le shell (strati) sovrastanti in una reazione a catena.



Il bruciamento di elementi sempre più pesanti richiede temperature (e quindi energia) sempre maggiori e le reazioni sono sempre meno efficienti nella produzione di energia. Fino alla produzione del Fe le reazioni sono «esoenergetiche» cioè «producono» energia (che mantiene l'equilibrio idrostatico) ma le reazioni di elementi più pesanti del Fe sono «endoenergetiche», cioè «richiedono» energia.

<b>Elemento</b>	<b>Temperatura di fusione</b>
<b>H (Idrogeno)</b>	<b>15 milioni K</b>
<b>He (Elio)</b>	<b>100 milioni K</b>
<b>C (Carbonio)</b>	<b>900 milioni K</b>
<b>Ne (Neon)</b>	<b>1,2 miliardi K</b>
<b>O (Ossigeno)</b>	<b>1,5 miliardi K</b>
<b>Si (Silicio)</b>	<b>4-5 miliardi K</b>
<b>Fe (Ferro)</b>	<b>/</b>

# sottopassaggio:

Quale sarà lo «stato» finale è determinato dalla massa che il nucleo sarà riuscito a raggiungere dopo la lunga e complicata serie di trasformazioni che abbiamo visto.

Ma prima di giungere allo stadio finale occorre fare un piccolo passo indietro e tornare a parlare della perdita di massa che le stelle, soprattutto quelle di massa  $< 8 M_{\odot}$ , subiscono durante la fase di Gigante Rossa e che danno vita a una tipologia di oggetti tra i più belli dell'Universo,

## **le Nebulose Planetarie**

$M < 0,3 M_{\odot} \longrightarrow \text{H} \longrightarrow \text{He}.$

$0,3 < M_{\odot} < 0,5 = \text{He} + \text{H non processato}.$

No Gigante Rossa



Nana Bianca

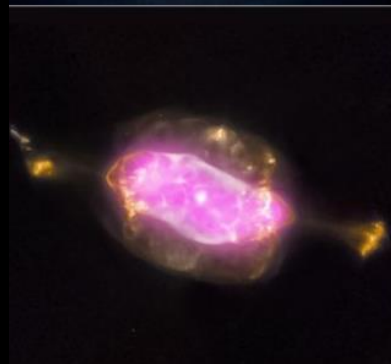
$0,5 < M_{\odot} < 8$  perdono parte della propria massa. Gli strati esterni, allontanandosi da quel che resta della stella, andranno a formare una Nebulosa Planetaria, una sorta di «bolla» di gas in rapidissimo allontanamento dalla stella.



CAT'S EYE



NGC 7682



# 4° passaggio (termine): NANE BIANCHE

Se la massa di ciò che resta della stella è  $<1,44 M_{\odot}$  (limite di Chandrasekhar) l'oggetto che resterà sarà una «Nana Bianca» (una stella dove non avviene più alcun tipo di processo di fusione nucleare) composto completamente di materia degenera.

Si crea una pressione di «degenerazione» che si oppone alla gravità ed è data dal fatto che gli elettroni degli atomi si «avvicinano» ai nuclei atomici ma senza compenetrarsi con essi.

Si viene a formare un «gas degenera di elettroni».

Una nana bianca è grande, mediamente, quanto la Terra.

1 cm<sup>3</sup> di materia peserebbe (sulla Terra) tra 1 e 10 T e la temperatura media è tra 8.000 e 40.000 K

# SPECTRAL CLASS

O B A F G K M L T

ABSOLUTE MAGNITUDE

-10  
-5  
0  
+5  
+10  
+15  
+20

1,000,000  
10,000  
100  
1  
0.01  
0.0001  
0.000001

SURFACE TEMPERATURE (DEGREES KELVIN)

40,000 20,000 14,000 10,000 7,000 5,000 3,000 2,500 1,000

Ia HYPER GIANTS

Ib SUPER GIANTS

II BRIGHT GIANTS

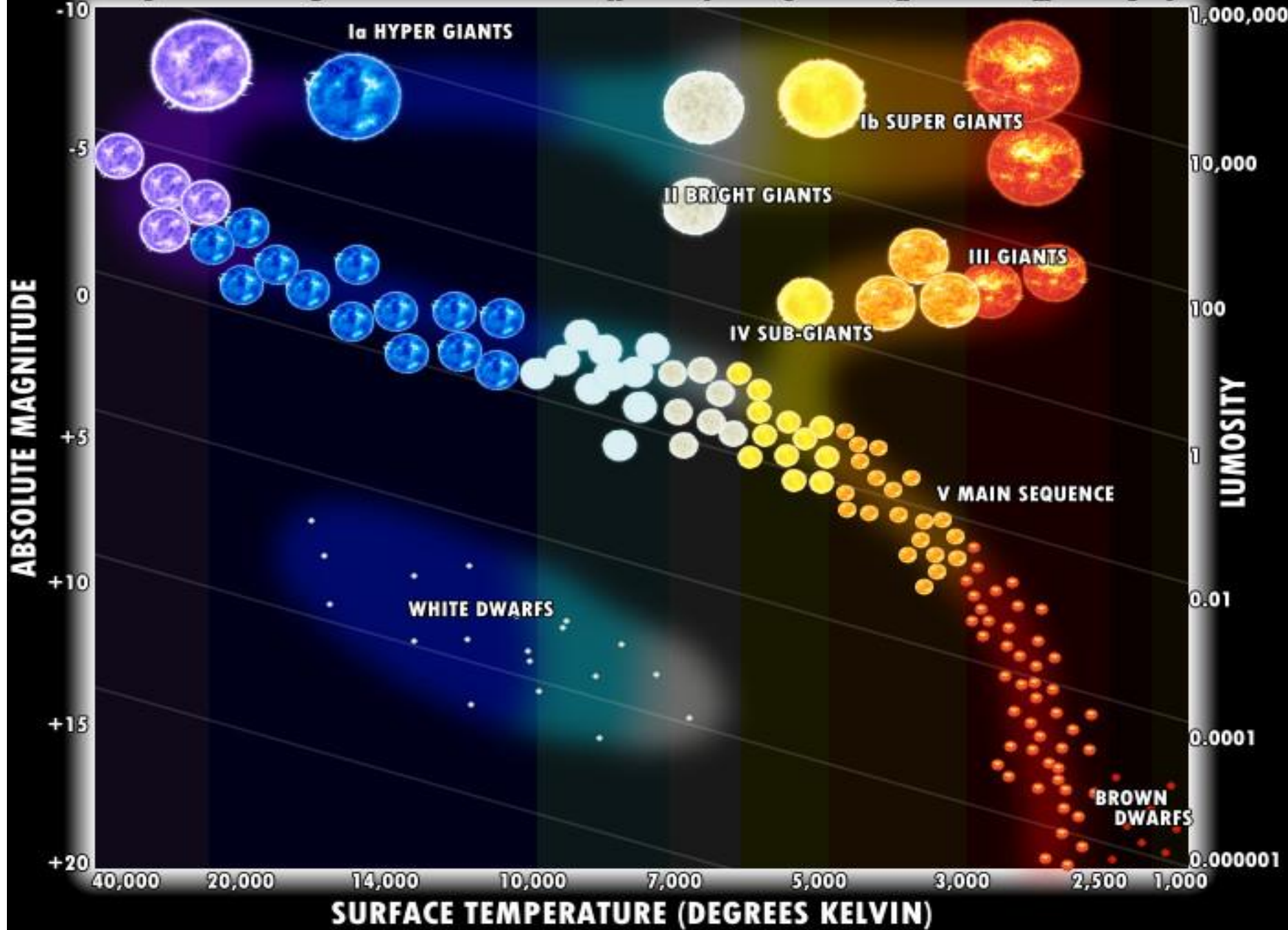
III GIANTS

IV SUB-GIANTS

V MAIN SEQUENCE

WHITE DWARFS

BROWN DWARFS



Abbiamo visto, in modo abbastanza generico, cosa avviene a una stella avente una massa  $< 8 M_{\odot}$  e che abbia un «residuo»  $< 1,44 M_{\odot}$

Per le stelle con massa  $> 8M_{\odot}$  la cosa si complica un po'. Abbiamo visto che tali stelle arrivano a sintetizzare, nel nucleo, il Ferro come ultimo elemento e a questo punto si interrompe la produzione di energia che contrasta la gravità.

Il nucleo subisce un collasso gravitazionale e rilascia una grandissima energia.

Se questa energia viene «assorbita» dagli strati sovrastanti (ricordiamoci la struttura a «cipolla») questi subiscono un improvviso e fortissimo riscaldamento esplosivo.

Tali processi sono così veloci che la stella non ha il tempo neppure di «provare» a reagire a tali fenomeni.

Oltre al riscaldamento «esplosivo» intervengono però anche altri fenomeni.

È stato teorizzato che durante il collasso gravitazionale, gli strati «superiori» rimbaltano su quelli inferiori (che sono più densi) e che, inoltre, a partire dall'interno della stella si creino delle onde d'urto che si propagano verso l'esterno. Questi fenomeni in qualche modo di «sommano» e fanno sì che la stella subisca una vera e propria «esplosione» di potenza inimmaginabile rilasciando una quantità di energia enorme e raggiungendo altissimi livelli di luminosità.

Questo è il fenomeno noto come

## **SUPERNOVA** (di tipo II)



# Step 8: STELLE DI NEUTRONI

Una stella che ha una massa  $> 8 M_{\odot}$  è molto probabile che, dopo la fase di Supernova, lasci un residuo di massa  $> 1,44 M_{\odot}$ . A questo punto entra in gioco un altro limite che è pari a circa  $3 M_{\odot}$  (limite di Oppenheimer – Volkoff).

Superando il limite di  $1,44 M_{\odot}$  la stella non riesce ad opporsi alla forza di gravità e accade ciò che era accaduto per la Nana Bianca, cioè si comprime...

...in questo caso, però, la gravità è molto superiore e quindi gli elettroni si avvicineranno così tanto al nucleo da «fondersi» con i protoni creando così dei neutroni.

Ma ancora una volta la stella raggiunge uno stato di equilibrio idrostatico perché la gravità non riesce a superare la forza repulsiva della materia degenere che si è creata.

L'oggetto risultante da questo processo sarà una

## **STELLA DI NEUTRONI**

I modelli teorici riportano che una stella di neutroni si forma quando il residuo della stella è compreso (circa) tra 1,5 e 3  $M_{\odot}$

Il diametro di una stella di neutroni è stato calcolato essere circa 15-20 km.

La densità calcolata sarebbe di circa  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup> che equivalgono a 100 milioni di tonnellate/cm<sup>3</sup> (peso «terrestre»), come dire che in una zolletta di zucchero è racchiusa la massa di 1000 portaerei (la più grande del mondo pesa 102.000 T)!

La densità è 100 mila miliardi di volte maggiore della densità dell'acqua.

Sono inoltre caratterizzate da un fortissimo campo magnetico e da una velocità di rotazione estremamente alta (una stella di neutroni può ruotare su se stessa anche centinaia di volte al secondo).

Dall'asse magnetico della stella , che può non coincidere con l'asse di rotazione, viene emessa energia elettromagnetica. Se la Terra rientra nel «cono» di emissione allora la stella di neutroni sarà a noi visibile come «Pulsar» (Pulsating radio source).

Un esempio di Pulsar è la stella al centro di M1 (Crab Nebula). La perdita di energia è rilevabile nelle Pulsar attraverso una diminuzione della velocità di rotazione.

Pulsar che ruota 1.4 volte al secondo

# STEP 9: BUCHI NERI

Ma cosa accade nel caso che il residuo di una stella superi il valore limite di  $3 M_{\odot}$  ???

Semplice...anche in questo caso accade quanto visto in precedenza, cioè la gravità ha il sopravvento.

Ma anche stavolta la stella riuscirà a contrapporsi al collasso e a raggiungere uno stato di equilibrio come avvenuto per le Nane Bianche e le stelle di Neutroni?

È difficile, se non impossibile, dare una risposta.

Il motivo è che, con l'inarrestabile contrazione gravitazionale di un oggetto di grande massa, si viene a formare uno degli oggetti più misteriosi dell'intero Universo, qualcosa che facciamo difficoltà anche solo a immaginare, teorizzato da Einstein nella sua Teoria della Relatività Generale:

## **UN BUCO NERO**

(abbreviato in BH – Black Hole)

In realtà, se ci pensiamo bene, non è difficile immaginare una regione dello spazio di forma sferica e di colore nero, il difficile è immaginare cosa **ACCADE DENTRO** a quella regione di spazio di colore nero!!

Ma...se un BH è nero...come si fa a vedere che esiste?

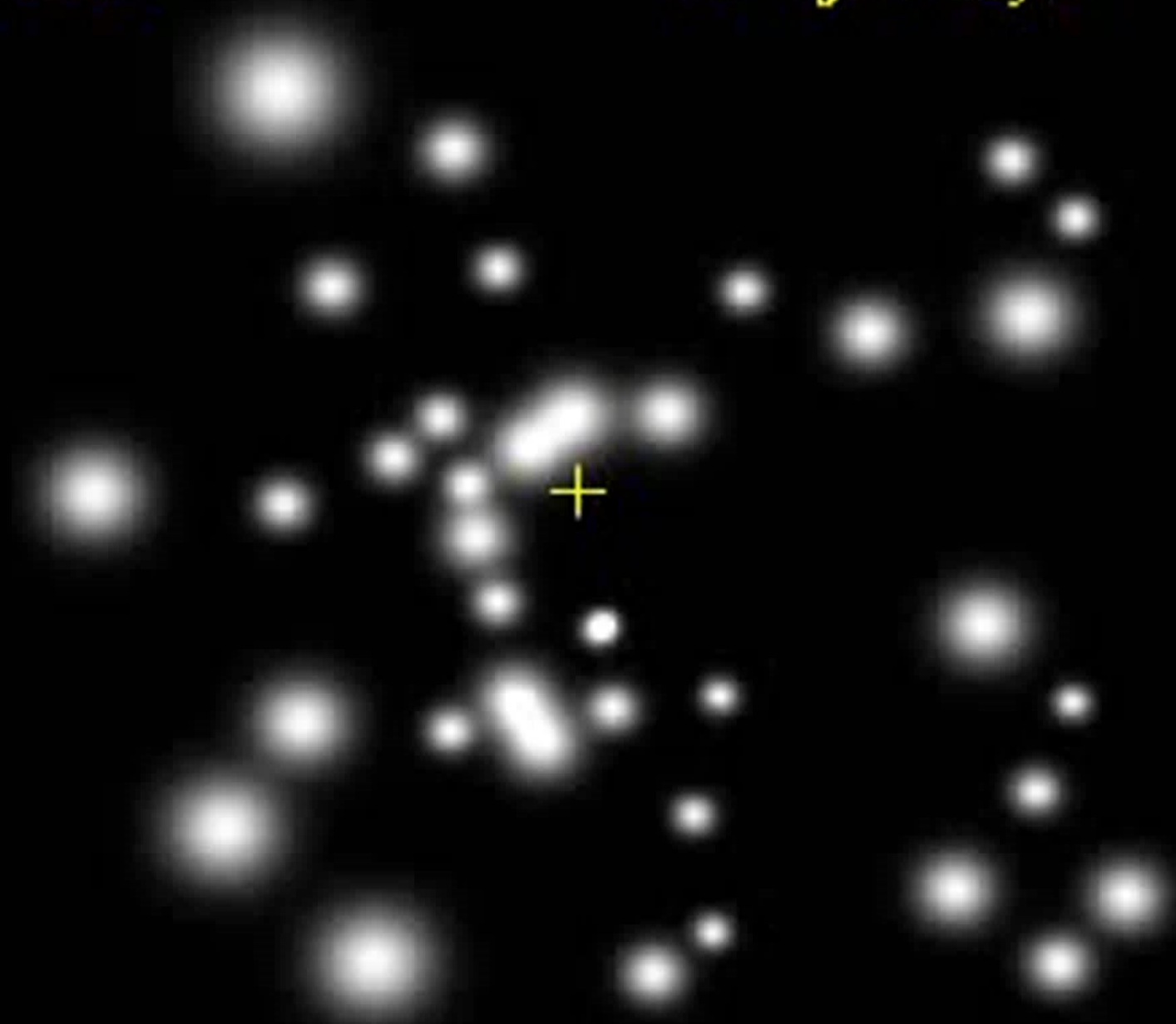
L'unico modo è studiarne gli effetti gravitazionali ed è, in realtà, ciò che fanno gli astronomi.

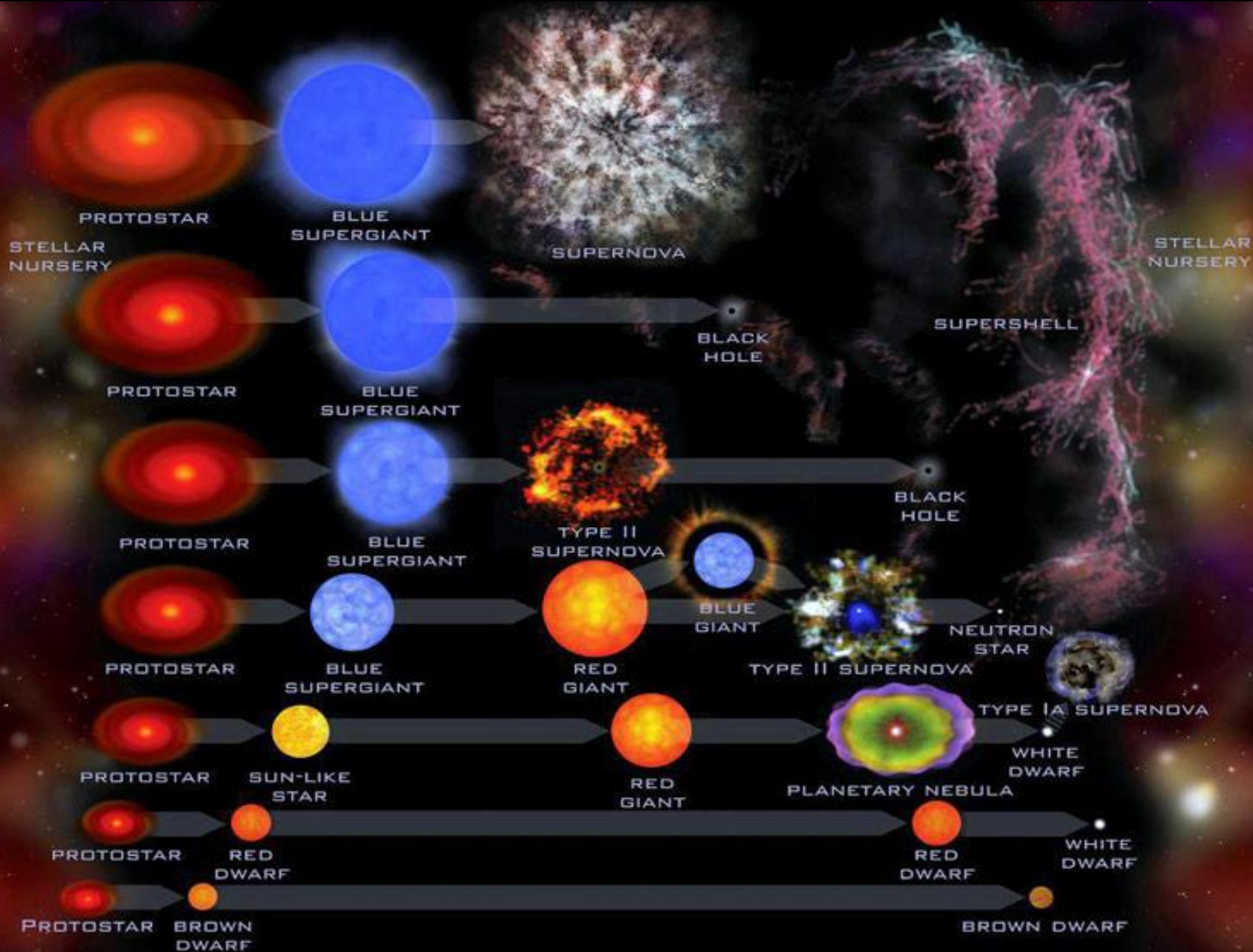
In base agli effetti gravitazionali si può stimare la massa dell'oggetto che dà vita al BH...con risultati in alcuni casi stupefacenti, si parla di BH aventi una massa di milioni di  $M_{\odot}$

Per semplicità guardiamo un brevissimo video.

1992

10 light days





Diamo ora un rapido accenno a due argomenti tra loro strettamente connessi:

- Le popolazioni stellari;
- La metallicità.

Già nel 1926 e, successivamente, nel 1943 fu osservato che in due galassie nane e nel nucleo della galassia di Andromeda esistevano due diversi tipi di stelle che vennero suddivise nelle due gradi categorie definite «Popolazione I» e «Popolazione II».

Le stelle di Popolazione II sono povere di elementi più pesanti dell'Idrogeno e dell'Elio (i primi due elementi della tavola periodica , quindi i più leggeri).

A questo punto occorre porre particolare attenzione al termine «metalli» in quanto in ambito astronomico TUTTI gli elementi più pesanti dell'Elio sono definiti «metalli».

Le stelle di Popolazione II sono povere di metalli perché «vecchie», si sono formate in un Universo nel quale erano stati sintetizzati pochi elementi più pesanti dell'Elio.

Il Sole è una stella di Popolazione I ma il metodo di classificazione non è rigido e, al fine di categorizzare meglio le stelle, sono state create 5 «popolazioni intermedie».

Si postula inoltre che, nelle fasi primordiali di formazione dell'Universo, siano esistite stelle supermassicce che si sono evolute in tempi brevissimi e sono esplose come Ipernovae e alle quali è stata assegnata la qualifica di stelle di «Popolazione III».

Le stelle di Popolazione II costituiscono la maggioranza di quelle presenti negli aloni galattici e negli ammassi stellari Globulari.

Gli elementi più pesanti del Ferro

# Fonti e bibliografia

- Piero Galeotti – Le stelle: fucine della vita. Dalla nascita delle stelle alla vita nell’Universo – ed. 2009 - Gruppo B Editore;
- Luigi Fontana – Stelle da record. La più vicina, la più luminosa, la più giovane, la più importante... - ed. 2014 – Gruppo B Editore;
- Attilio Ferrari – Stelle, galassie e universo. Fondamenti di astrofisica – ed. 2011 – Springer editore;
- Cesare Chiosi – Struttura ed evoluzione delle stelle – Università degli studi di Padova – Dipartimento di Astronomia;
- Atlante del Cosmo – National Geographic – RBA Italia.
- Articoli vari dell’Istituto Nazionale di Astrofisica reperibili sul web;
- Altre fonti reperibili sul web (articoli scientifici, siti astrofili nazionali e esteri, ecc.) inclusi i video e le immagini contenuti nella presentazione.