

# La nucleosintesi nelle stelle

---

Dr. Elizabeth Musacchio-González

# Nucleosintesi

L'origine degli elementi è uno dei temi fondamentali dell'**astrofisica** e della **cosmologia**.

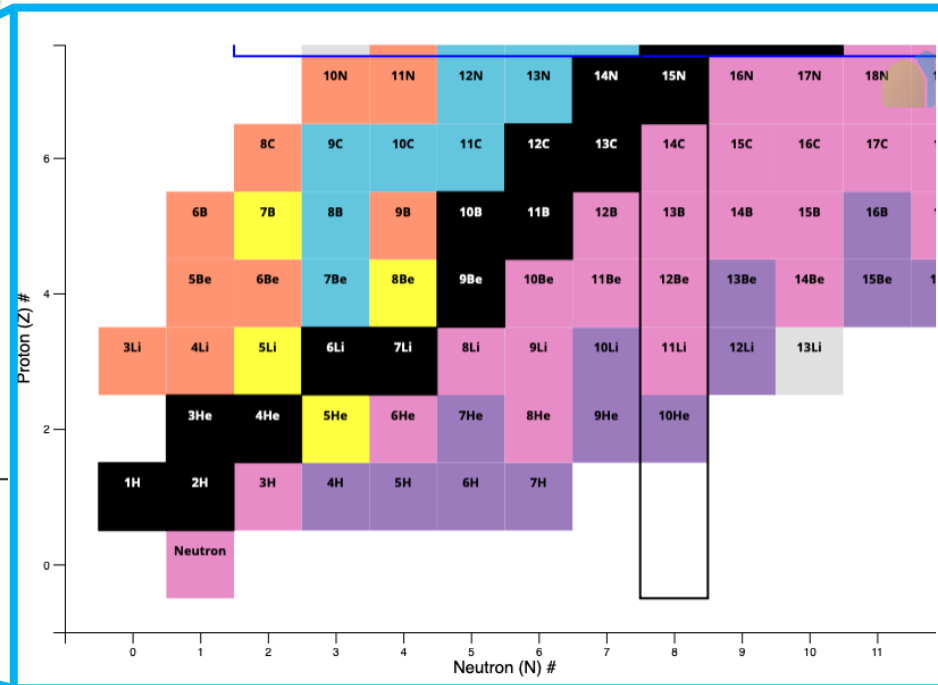
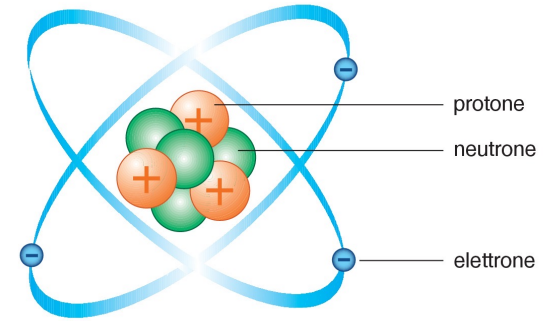
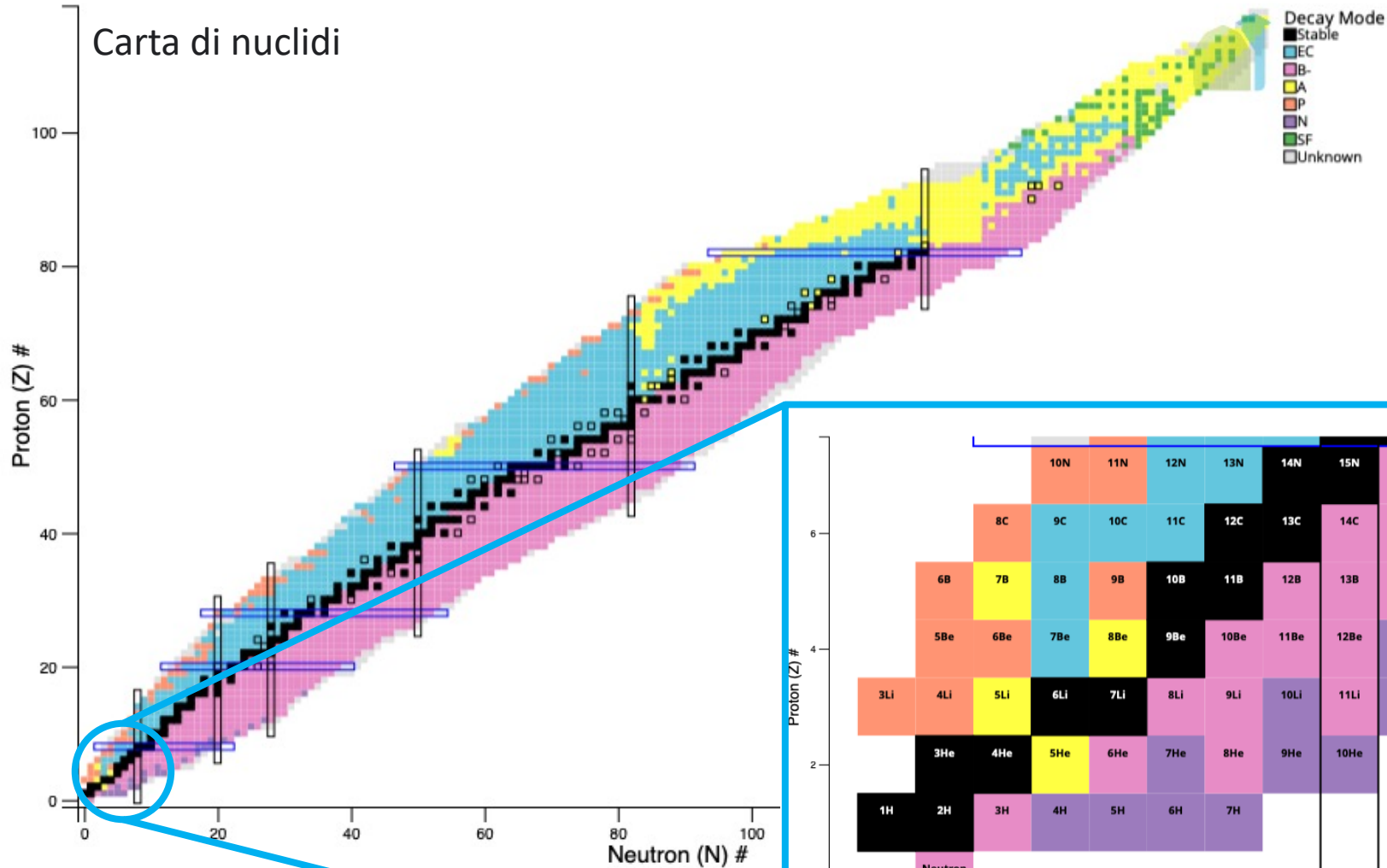
Gli elementi chimici che costituiscono la materia dell'universo sono stati formati attraverso vari processi nel corso della sua evoluzione.

**La nucleosintesi è il processo attraverso il quale gli elementi si formano nei nuclei stellari.**



# Alcuni elementi di Fisica Nucleare

Carta di nuclidi



La carta dei nuclidi è un diagramma bidimensionale che rappresenta i nuclidi attualmente esistenti.

Z: numero atomico e indica il numero di protoni all'interno del nucleo.

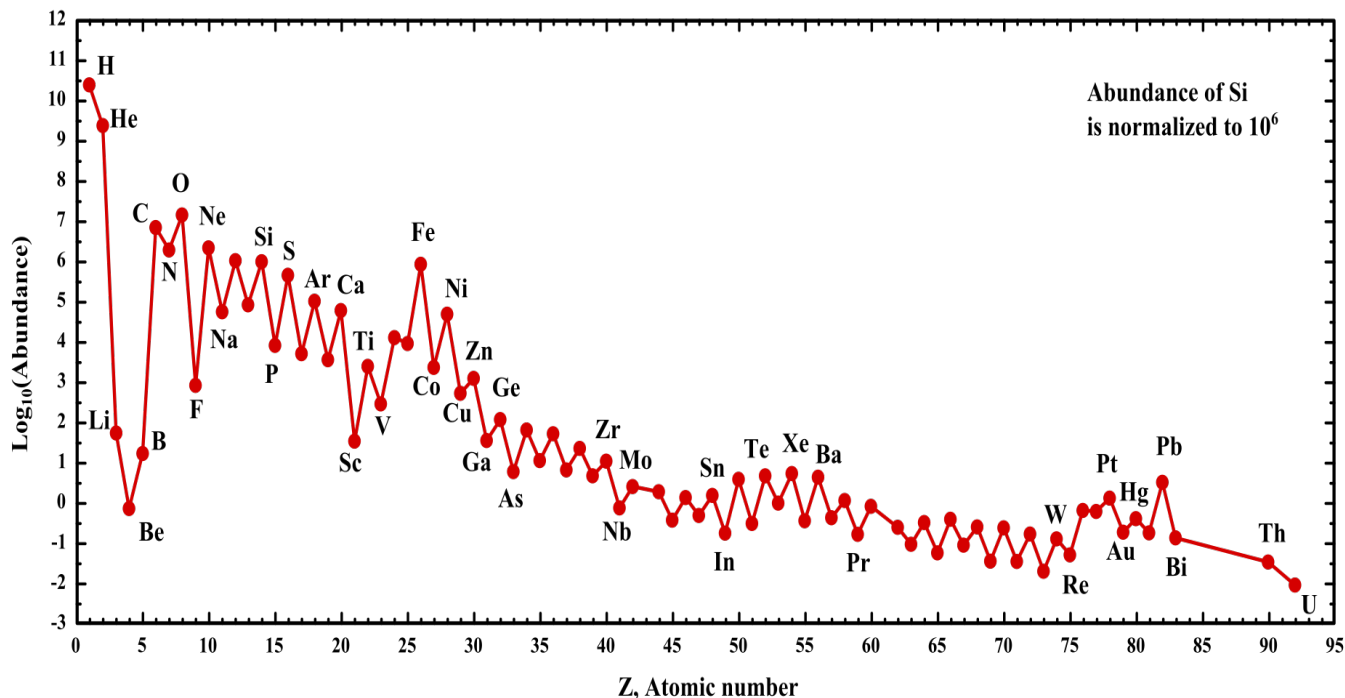
N: numero di neutroni all'interno del nucleo.

A: Il numero di massa A è definito dalla quantità  $A = Z + N$ .

Non ci sono nuclidi con  $A = 5$  o  $A = 8$ .

# Abbondanza degli Elementi nell'Universo

La teoria della nucleosintesi mira a spiegare la grande differenza nell'abbondanza degli elementi chimici e dei loro diversi isotopi dal punto di vista dei processi naturali.



- L'idrogeno è l'elemento di gran lunga più abbondante nel sistema solare e nel cosmo. (71.1%)
- Il secondo elemento in ordine di abbondanza è l'elio. (27.4%)
- Elementi oltre l'Elcio e prima del Carbonio (Li, Be, B) sono particolarmente soppressi.
- Le abbondanze relative in genere decrescono all'aumentare di Z.
- C'è un ulteriore picco intorno al Ferro.

Le abbondanze degli elementi che osserviamo nell'universo sono frutto di tre cucine cosmiche:



# Tipi di nucleosintesi

**Nucleosintesi  
Primordiale**

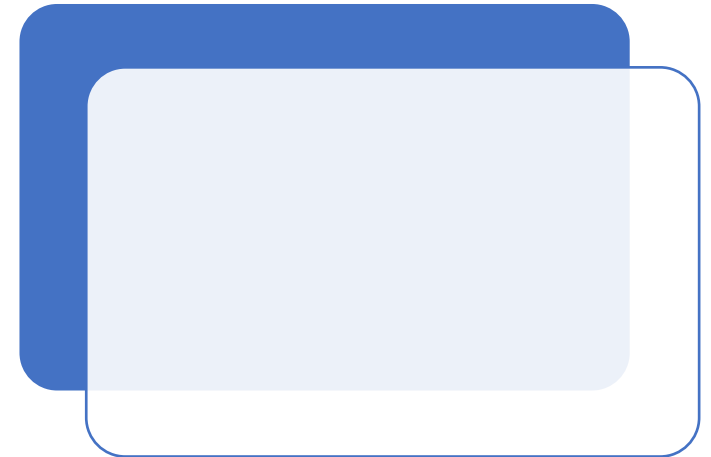
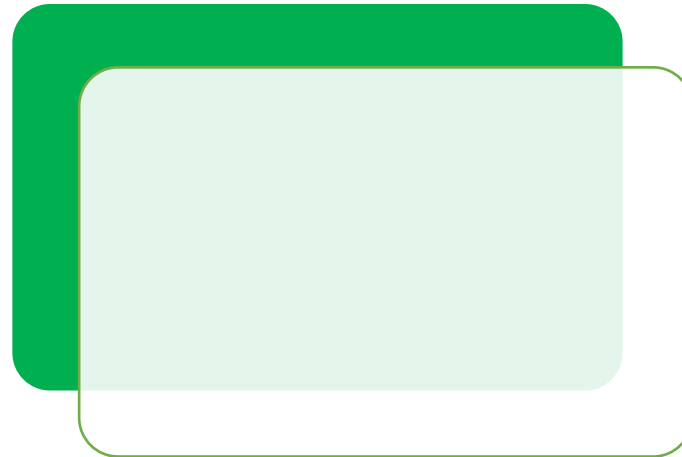
**Nucleosintesi  
Stellare**

**Nucleosintesi  
Elementi Pesanti**

# Tipi di nucleosintesi

## **Nucleosintesi Primordiale**

Formazione di elementi leggeri nei primi istanti dell'universo.





# Cosa c'era prima del Big Bang?

“NON LO SAPPIAMO”

Non sappiamo nemmeno come fosse effettivamente fatto quel primo punto con infinita densità che ha dato poi origine a tutto.

Tutto quello che precede i 13.8 miliardi di anni fa, se mai c'è stato, è in sostanza pura speculazione che al momento non ha alcun tipo di prova scientifica a supporto.



# La Teoria del Big Bang

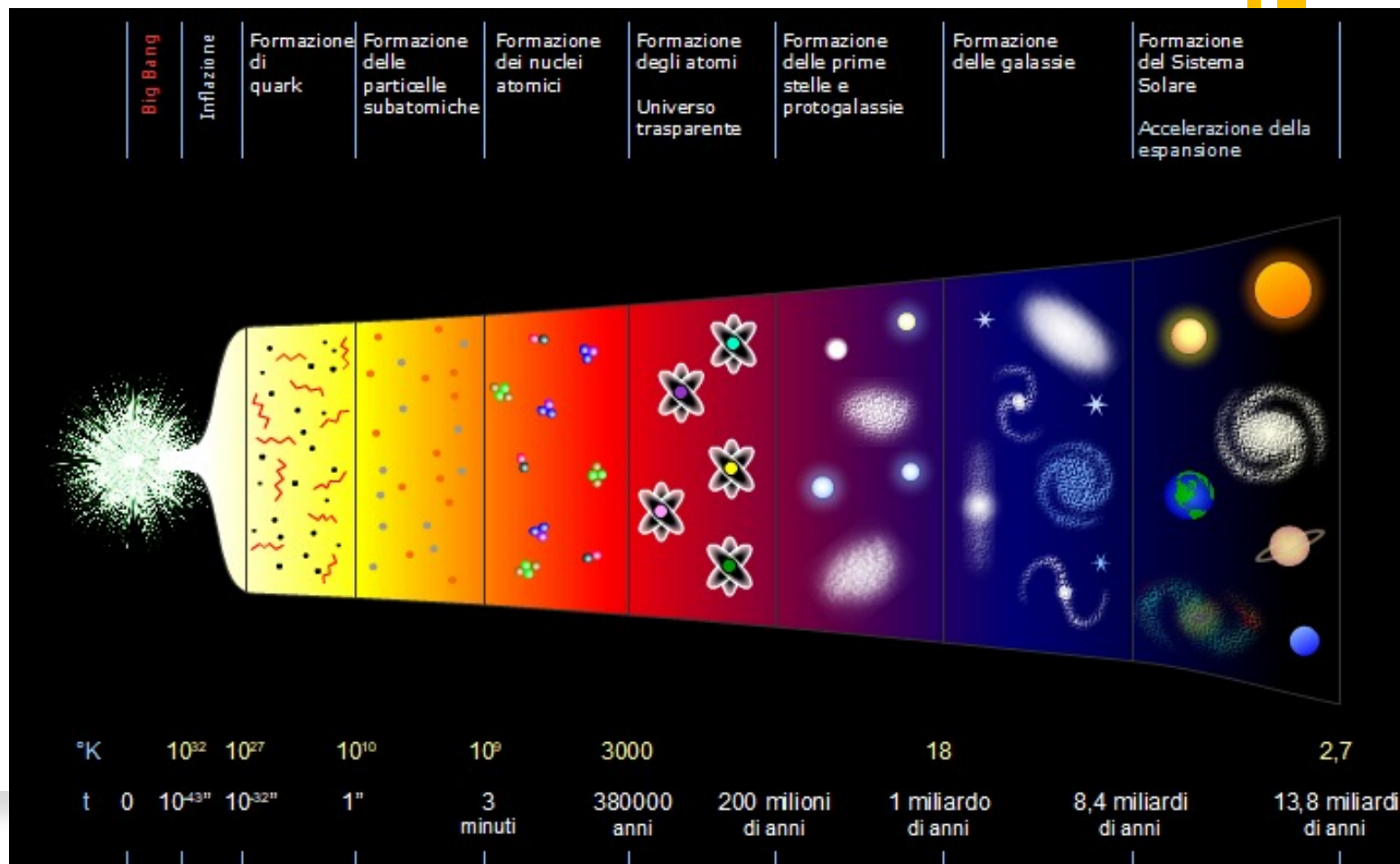
- Capire la nascita dell'universo!
- È il modello cosmologico prevalente che spiega l'origine e l'evoluzione del nostro universo.
- Propone che l'universo sia iniziato come una singolarità, un punto di densità e temperatura infinite, circa 13.8 miliardi di anni fa.
- Da questo punto singolare, l'universo si è espanso e raffreddato, dando origine alle galassie, stelle e pianeti che osserviamo oggi.



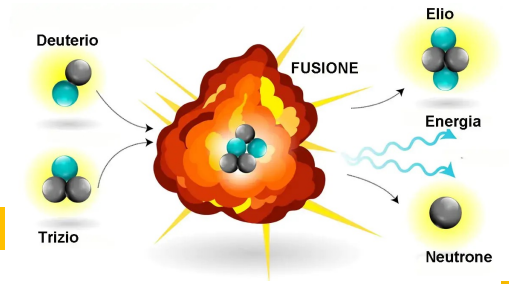
# Nucleosintesi primordiale

Ha dato origine alla formazione di elementi più leggeri, come idrogeno, elio e tracce di litio.

- Nelle prime fasi, mentre l'universo si espandeva rapidamente e si raffreddava, la densità e la temperatura diminuirono in modo significativo.
- Ciò ha permesso la formazione di protoni e neutroni attraverso le interazioni dei fotoni ad alta energia.



# Nucleosintesi primordiale

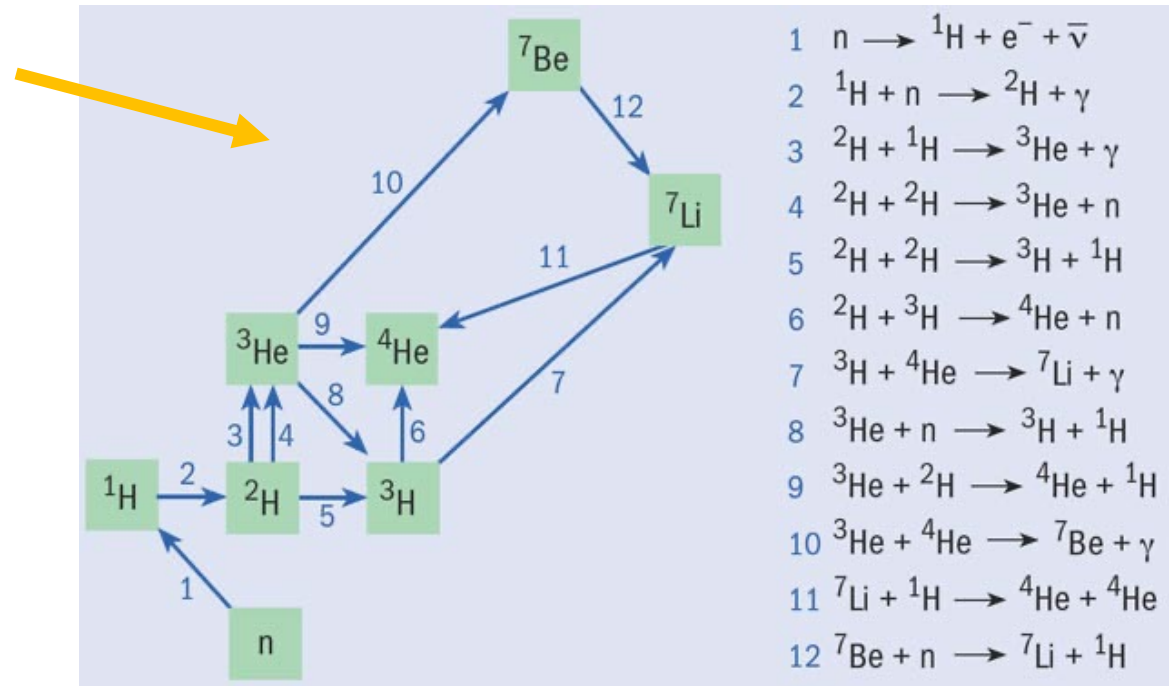


Varie reazioni e percorsi nucleari sono entrati in gioco durante la nucleosintesi primordiale, determinando le abbondanze relative di diversi elementi.

La serie di reazioni si ferma con  $4\text{He}$  perché per  $A=5$  non esistono sistemi legati sufficientemente stabili.

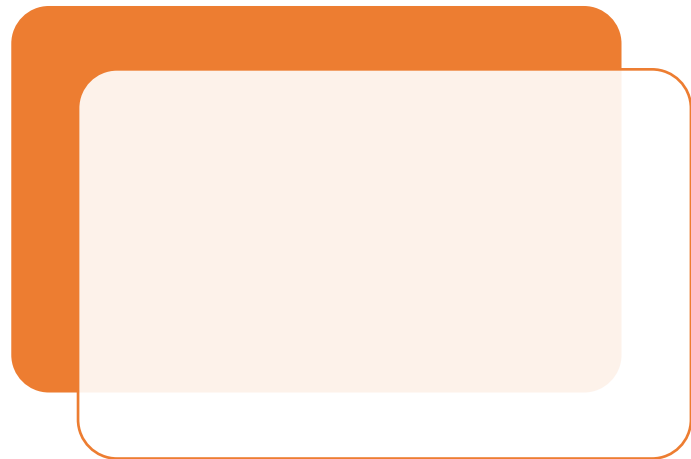
Si prevede che l'Universo era composto per:

- circa il **75% da Idrogeno**
- **25% da  $4\text{He}$**
- Piccole quantità di **D,  $3\text{He}$ ,  $7\text{Li}$  e  $6\text{Li}$** .
- Inoltre si sono formate quantità insignificanti di  **$3\text{H}$ ,  $7\text{Be}$  e  $8\text{Be}$** , ma queste sono instabili e vengono rapidamente perse.



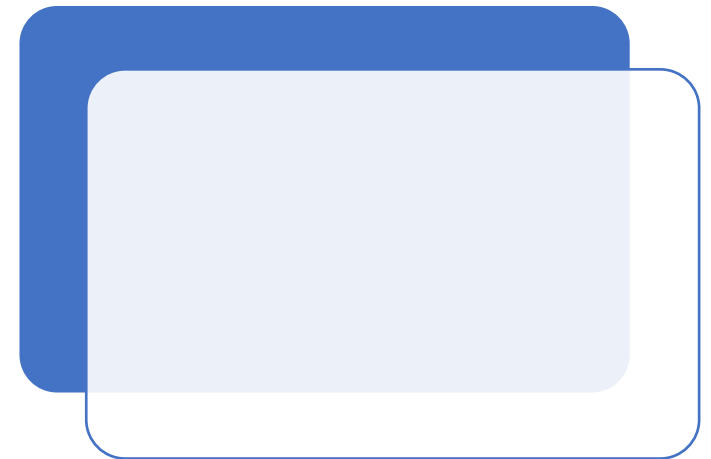


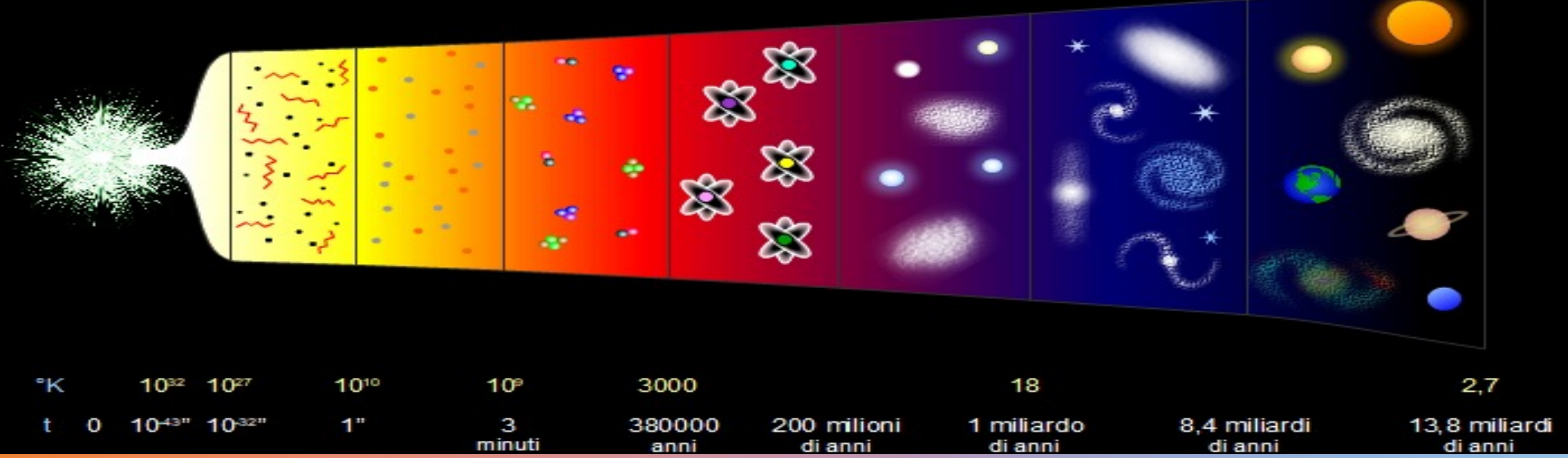
# Tipi di nucleosintesi



## **Nucleosintesi Stellare**

Formazione degli elementi all'interno delle stelle attraverso reazioni di fusione nucleare.





- Durante il periodo “Secolo Buio (Dark ages)”, la temperatura dell'Universo si abbassò a circa 60 °K. L'inizio della fine di questo periodo cominciò quando si formarono le prime stelle, note come stelle di **Popolazione III** (o **Pop III**), entro poche centinaia di milioni di anni dopo il Big Bang.
- Le stelle Pop III hanno lanciato l'evoluzione critica dell'Universo da un'entità omogenea e semplice a un'entità altamente strutturata e complessa.
- Le stelle di Pop III sono responsabili della trasformazione dei pochi elementi leggeri formati durante il Big Bang (idrogeno, elio e piccole quantità di litio) in molti elementi più pesanti.

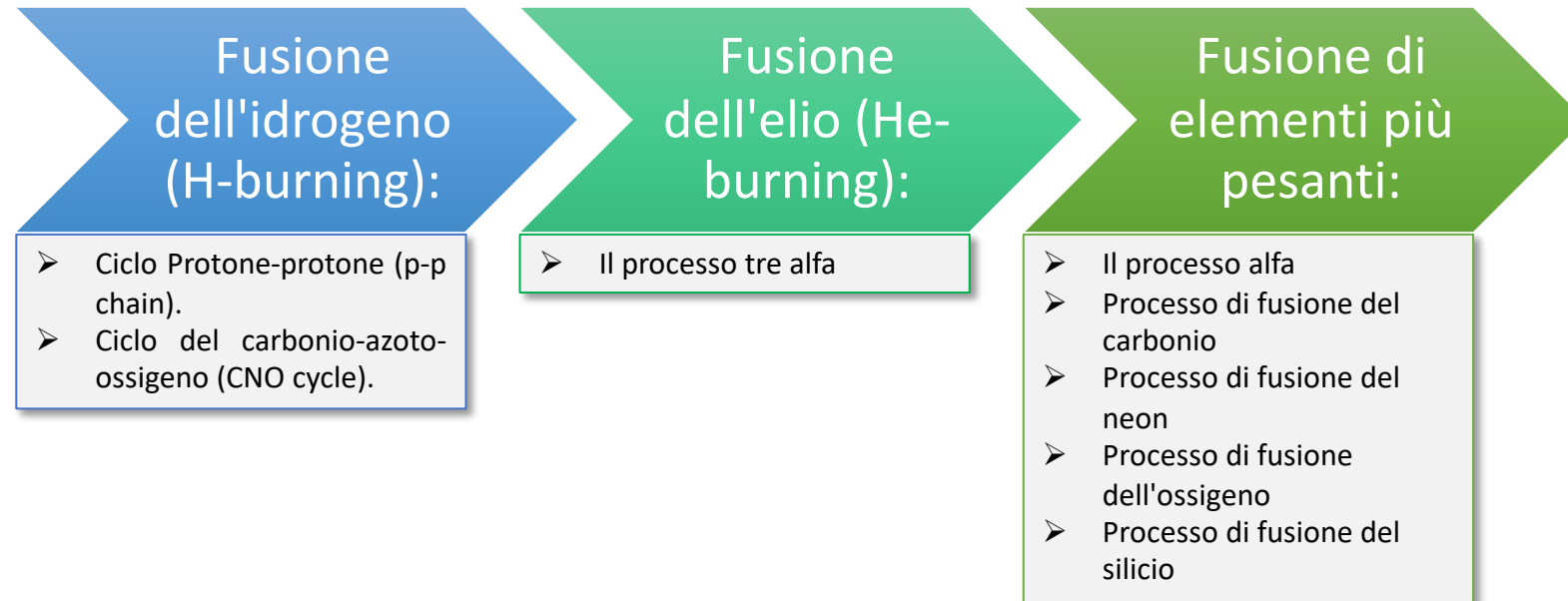
# Nucleosintesi stellare

- Tuttavia, non tutti gli elementi sono nati durante il Big Bang.
- Elementi più pesanti, come carbonio, ossigeno e ferro, sono sintetizzati attraverso il processo di nucleosintesi stellare, che si verifica all'interno dei nuclei di stelle massicce durante i loro cicli di vita.
- La nucleosintesi stellare comporta reazioni nucleari che si fondono insieme elementi più leggeri, costruendo gradualmente elementi più pesanti.



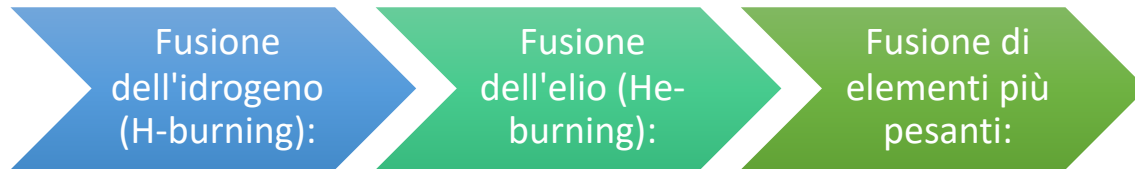
# Nucleosintesi stellare

Coinvolge diversi cicli di fusione nucleare che avvengono all'interno delle stelle, dove le alte temperature e le pressioni consentono la realizzazione di reazioni nucleari. Le reazioni più importanti sono:

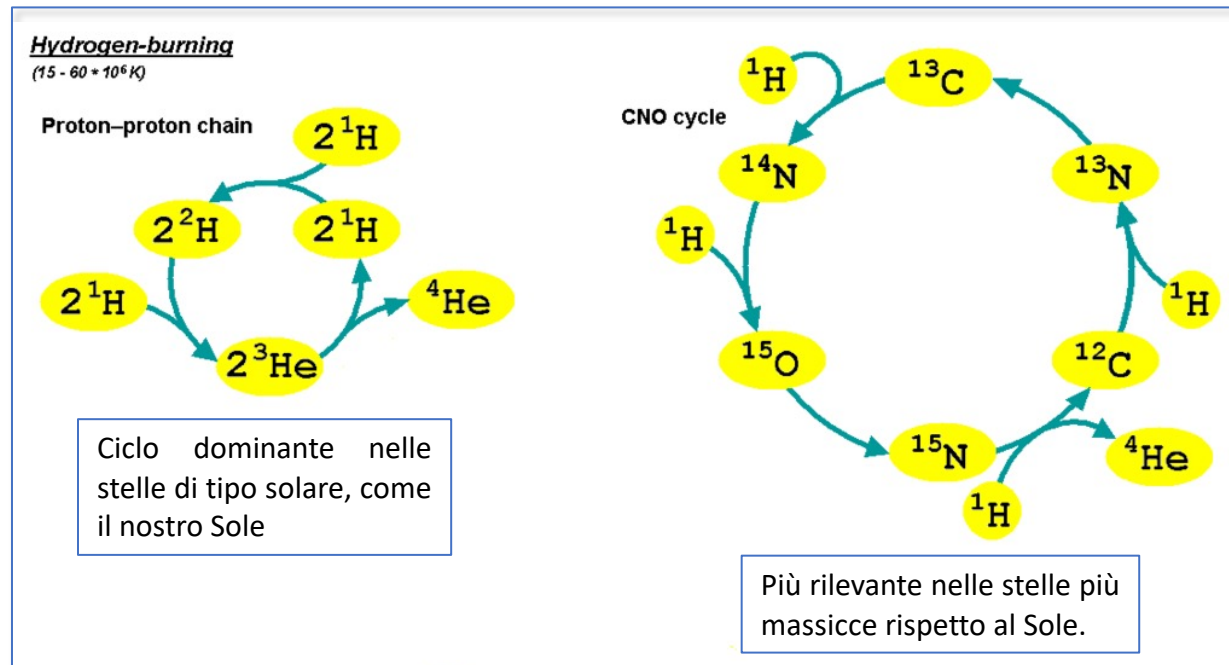


# Nucleosintesi stellare

Coinvolge diversi cicli di fusione nucleare che avvengono all'interno delle stelle, dove le alte temperature e le pressioni consentono la realizzazione di reazioni nucleari. Le reazioni più importanti sono:

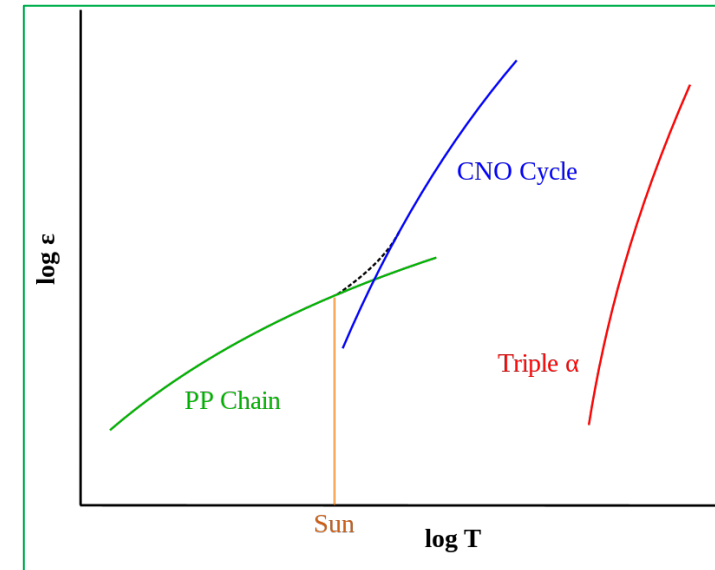
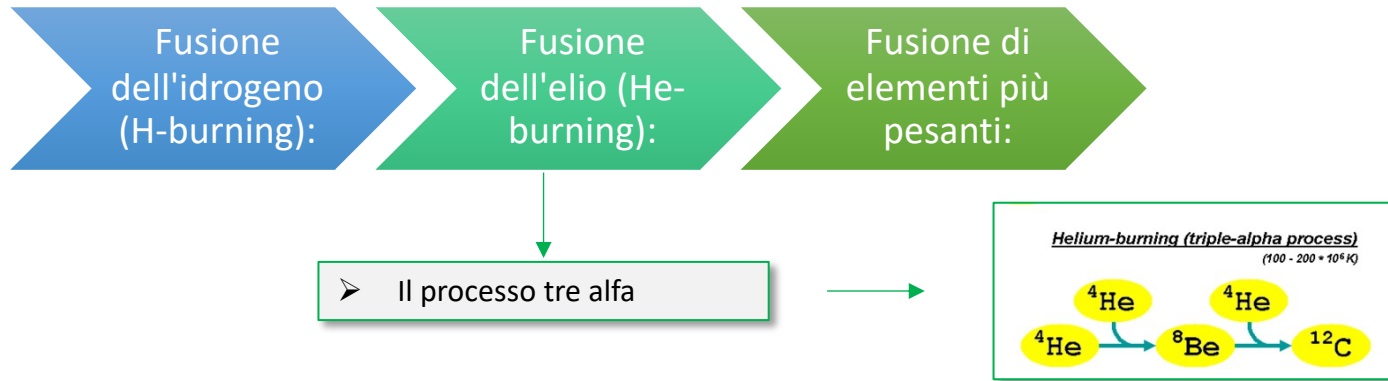


- Ciclo Protone-protone (p-p chain).
- Ciclo del carbonio-azoto-ossigeno (CNO cycle).



# Nucleosintesi stellare

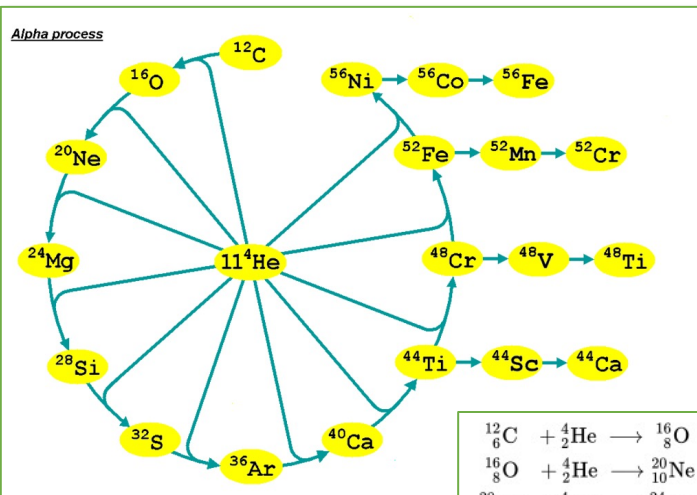
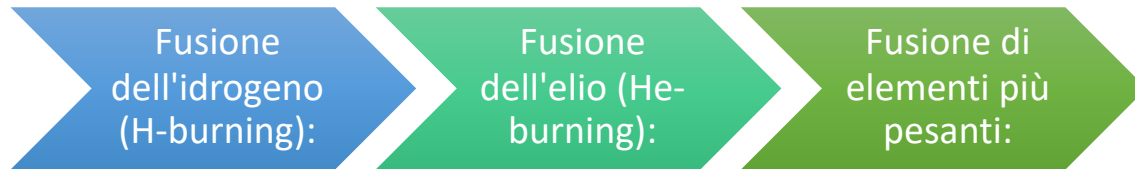
Coinvolge diversi cicli di fusione nucleare che avvengono all'interno delle stelle, dove le alte temperature e le pressioni consentono la realizzazione di reazioni nucleari. Le reazioni più importanti sono:





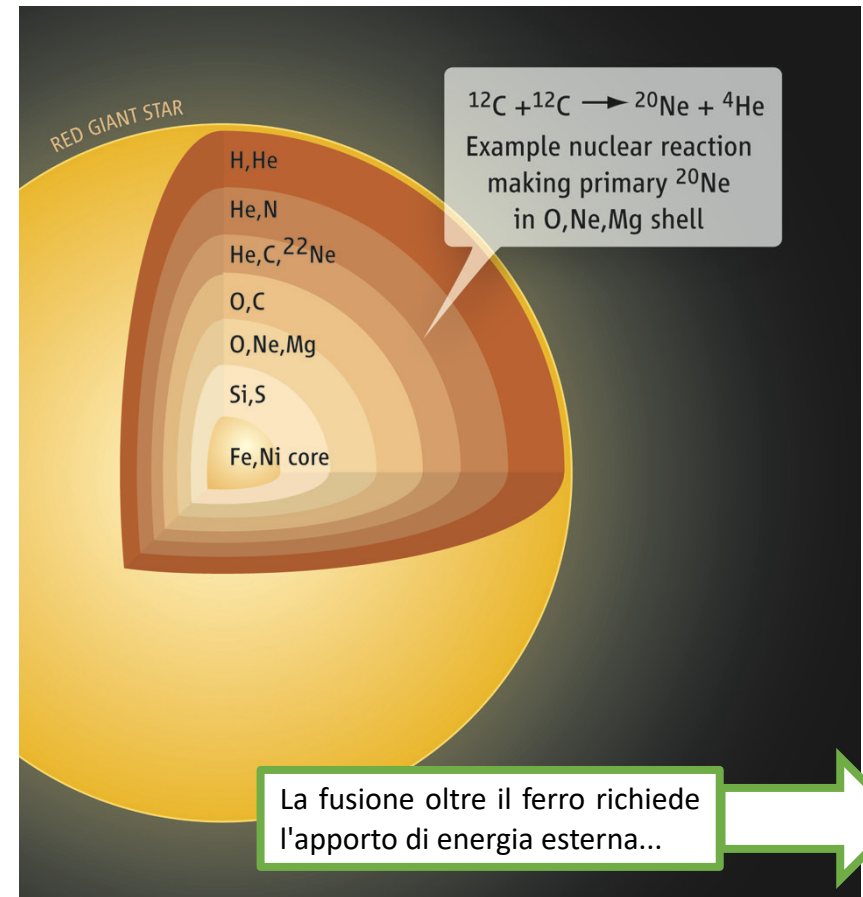
# Nucleosintesi stellare

Coinvolge diversi cicli di fusione nucleare che avvengono all'interno delle stelle, dove le alte temperature e le pressioni consentono la realizzazione di reazioni nucleari. Le reazioni più importanti sono:

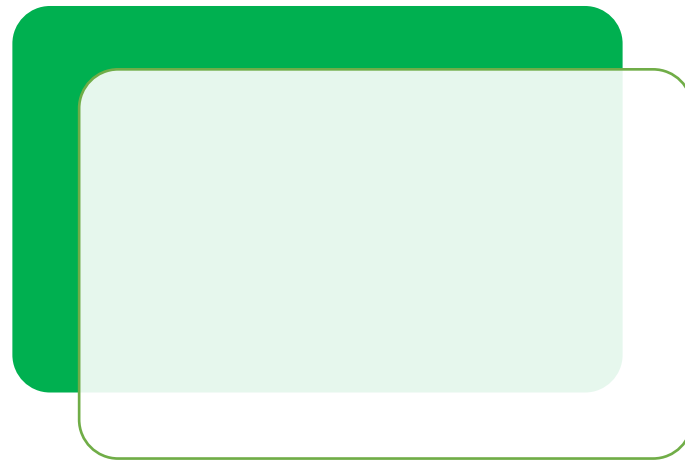
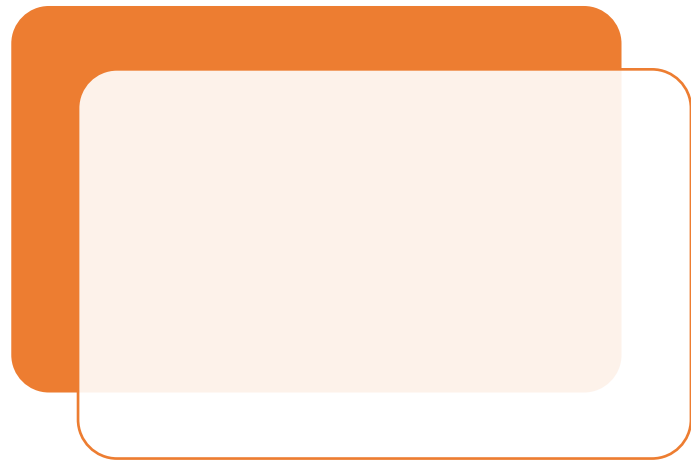


$^{12}_6\text{C} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{16}_8\text{O} + \gamma$	$E = 7.16 \text{ MeV}$
$^{16}_8\text{O} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{20}_{10}\text{Ne} + \gamma$	$E = 4.73 \text{ MeV}$
$^{20}_{10}\text{Ne} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{24}_{12}\text{Mg} + \gamma$	$E = 9.32 \text{ MeV}$
$^{24}_{12}\text{Mg} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{28}_{14}\text{Si} + \gamma$	$E = 9.98 \text{ MeV}$
$^{28}_{14}\text{Si} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{32}_{16}\text{S} + \gamma$	$E = 6.95 \text{ MeV}$
$^{32}_{16}\text{S} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{36}_{18}\text{Ar} + \gamma$	$E = 6.64 \text{ MeV}$
$^{36}_{18}\text{Ar} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{40}_{20}\text{Ca} + \gamma$	$E = 7.04 \text{ MeV}$
$^{40}_{20}\text{Ca} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{44}_{22}\text{Ti} + \gamma$	$E = 5.13 \text{ MeV}$
$^{44}_{22}\text{Ti} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{48}_{24}\text{Cr} + \gamma$	$E = 7.70 \text{ MeV}$
$^{48}_{24}\text{Cr} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{52}_{26}\text{Fe} + \gamma$	$E = 7.94 \text{ MeV}$
$^{52}_{26}\text{Fe} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{56}_{28}\text{Ni} + \gamma$	$E = 8.00 \text{ MeV}$

- Il processo alfa
- Processo di fusione del carbonio
- Processo di fusione del neon
- Processo di fusione dell'ossigeno
- Processo di fusione del silicio



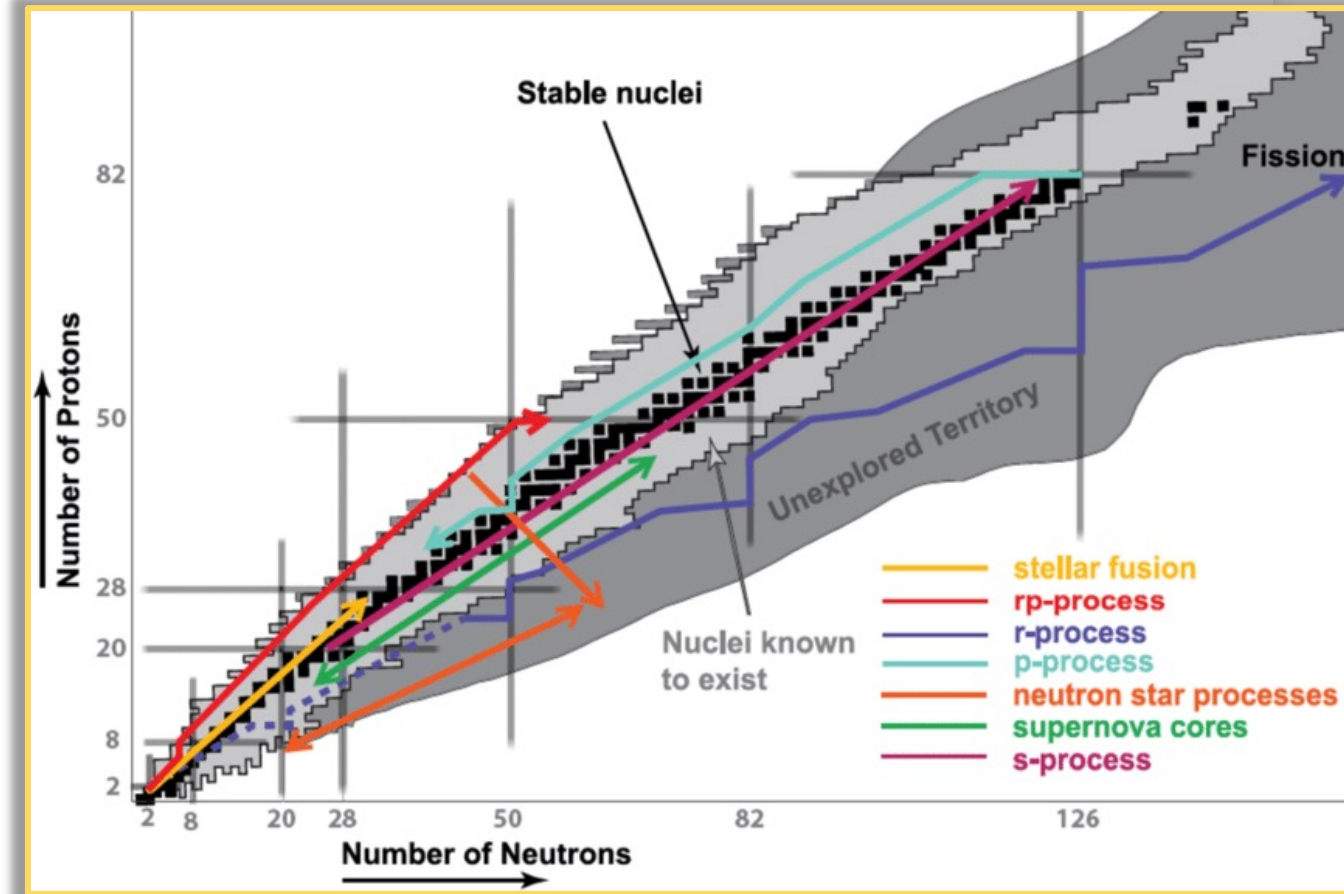
# Tipi di nucleosintesi

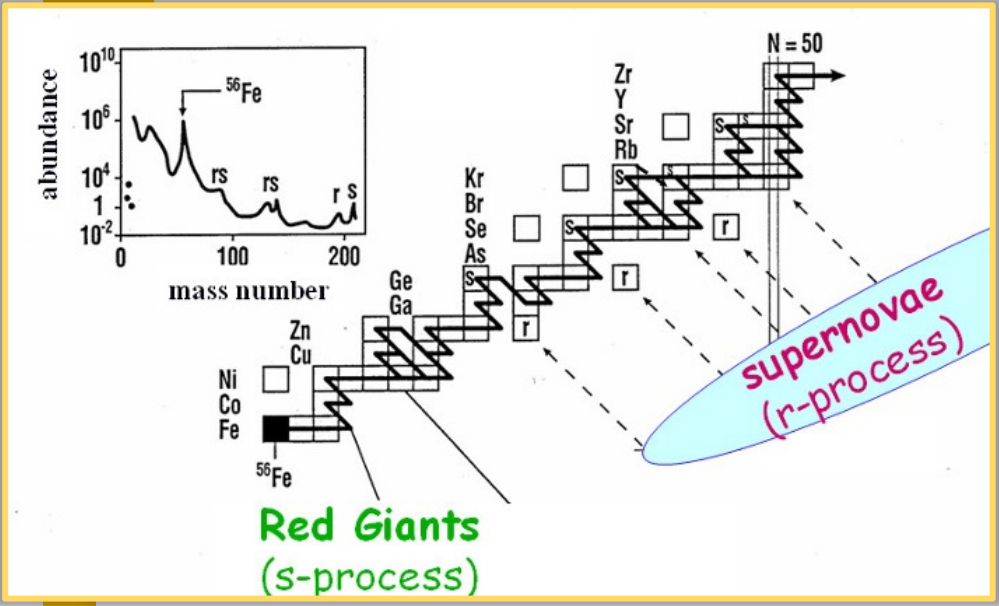


**Nucleosintesi Elementi Pesanti**  
Creazione di elementi pesanti all'interno delle stelle o durante eventi esplosivi e catastrofici.

# Nucleosintesi degli Elementi Pesanti

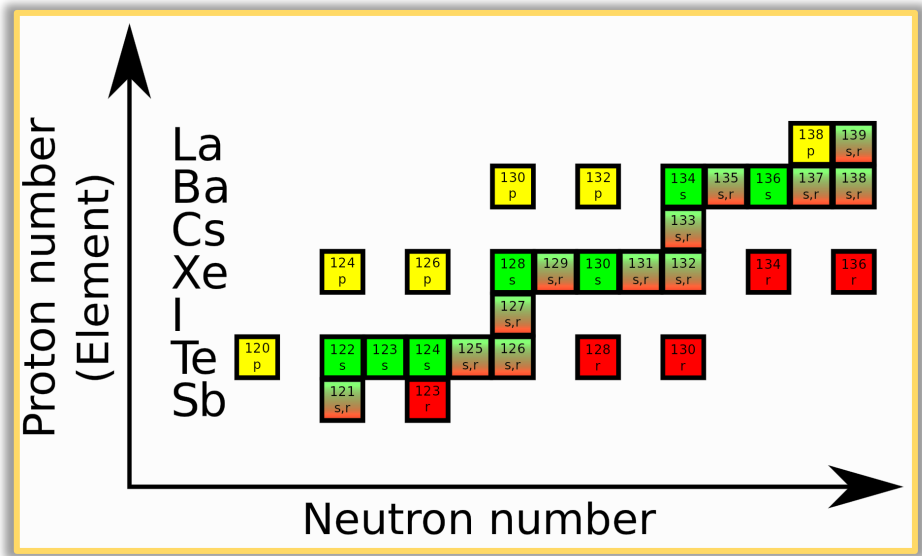
- Elementi molto più pesanti del Fe, come Pb, Au, U, non vengono prodotti nella normale nucleosintesi stellare (reazioni di fusione).
- La loro formazione coinvolge diversi processi che avvengono **all'interno delle stelle** o durante **eventi esplosivi** e catastrofici.
- Durante questi eventi, la **cattura di neutroni o protoni** da parte degli atomi è il processo principale mediante il quale si formano gli elementi pesanti.





Red Giants  
(s-process)

supernovae  
(r-process)



Esistono tre processi principali attraverso i quali avviene la nucleosintesi degli elementi più pesanti:

### Processo-s

- Densità di neutroni relativamente basse ( $10^6$ - $10^{11}$  n/cm<sup>3</sup>).
- Tempi di cattura dei neutroni sono molto più lenti della maggior parte dei tempi di decadimento  $\beta$ .
- In grado di costruire nuclei pesanti e stabili dal Ferro fino al 209Bi.
- Segue la valle di stabilità.

### Processo-r

- Temperatura e densità neutronica molto elevate ( $\geq 10^{20}$  n/cm<sup>3</sup>).
- Un nucleo assorbe un neutrone prima che possa decadere ( $\beta$ ).
- Si svolge in un intervallo di tempo compreso tra 0,01 e 10 secondi.
- Produce nuclei ricchi di neutroni che poi decadono.

### p-nuclei

#### Processo-p

- Aggiungendo successivamente protoni a un nuclide (cattura  $(p,\gamma)$ ).

#### Processo- $\gamma$

- Rimuovendo neutroni da un nucleo attraverso sequenze di fotodisintegrazioni di tipo  $(\gamma, n)$ . Le reazioni  $(\gamma, n)$  sono seguite dalle reazioni  $(\gamma, p)$  e/o  $(\gamma, \alpha)$ .

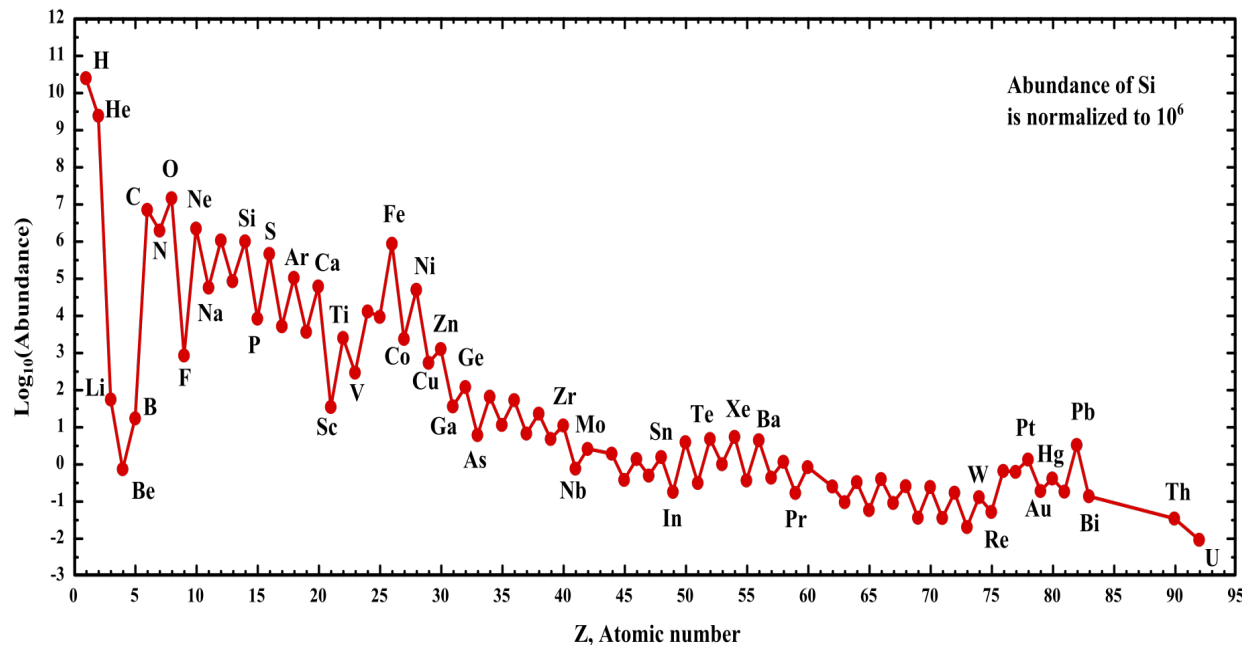
# Nucleosintesi

- Oltre ai processi sopra menzionati, gli elementi possono anche essere formati attraverso la **spallazione dei raggi cosmici**.
- I raggi cosmici, che sono particelle altamente energetiche provenienti da fonti al di fuori del nostro sistema solare, possono scontrarsi con nuclei atomici nel mezzo interstellare, rompendoli e creando nuovi elementi.
- Questo meccanismo contribuisce **all'abbondanza di alcuni elementi rari nell'universo**.
- Mentre ciascuno di questi processi svolge un ruolo nella formazione di elementi, è importante notare che l'abbondanza relativa di diversi elementi nell'universo è influenzata da una varietà di fattori:
  - condizioni iniziali dell'universo.
  - l'abbondanza di elementi primordiali.
  - il tasso di evoluzione stellare.
  - la frequenza delle esplosioni di supernova.



# Abbondanza degli Elementi nell'Universo

La teoria della nucleosintesi mira a spiegare la grande differenza nell'abbondanza degli elementi chimici e dei loro diversi isotopi dal punto di vista dei processi naturali.



Abbondanze previste

Confronto con le abbondanze osservate  
sperimentalmente

Per determinare la abbondanza degli elementi in laboratorio si utilizzano diversi parametri di astrofisica nucleare come ad esempio il tasso di reazione e la sezione d'urto Maxwelliana (MACS).

# Nucleosintesi @LNL

Maxwellian Averaged Cross Section  
(MACS)

$$\text{MACS} = \langle \sigma \rangle = \frac{\langle \sigma v \rangle}{v_T} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{(kT)^2} \int_0^\infty \sigma(E) E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE$$

$\sigma(E)$  - Determinato  
sperimentalmente

MACS - Misurato  
direttamente

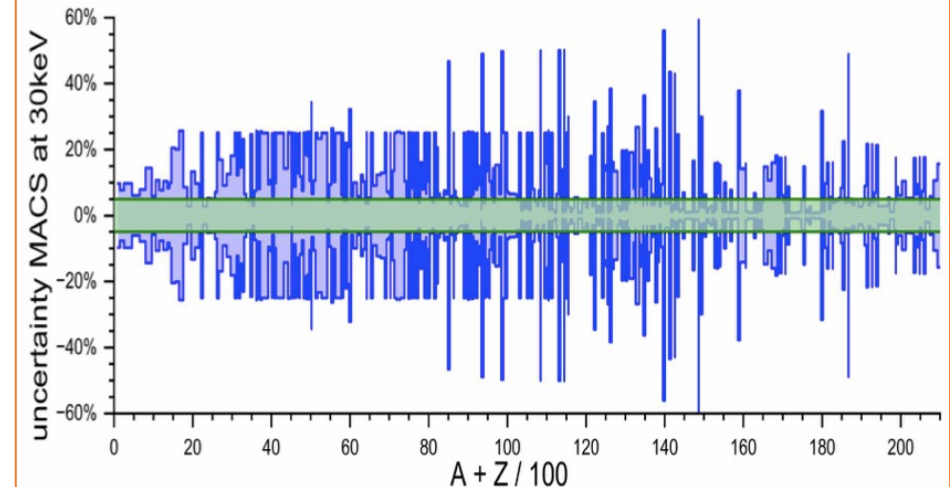
Tasso di reazione del processo-s

$$\langle \sigma v \rangle = \int_0^\infty \Phi(v) \sigma(v) v dv = 4\pi \left(\frac{\mu}{2\pi kT}\right)^{3/2} \int_0^\infty \sigma(v) v^3 \exp\left(-\frac{\mu v^2}{kT}\right) dv$$

Abbondanze previste

Confronto con le abbondanze osservate  
sperimentalmente

## Uncertainties of MACS in KADoNiS



Karlsruhe Astrophysical Database of Nucleosynthesis in Stars (KADoNiS)  
[https://exp-astro.physik.uni-frankfurt.de/kadonis1.0/KADoNiS database](https://exp-astro.physik.uni-frankfurt.de/kadonis1.0/KADoNiS%20database)

# Nucleosintesi @LNL

## Maxwellian Averaged Cross Section (MACS)

$$\text{MACS} = \langle \sigma \rangle = \frac{\langle \sigma v \rangle}{v_T} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{(kT)^2} \int_0^\infty \sigma(E) E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE$$



## Tasso di reazione del processo-s

$$\langle \sigma v \rangle = \int_0^\infty \Phi(v) \sigma(v) v dv = 4\pi \left(\frac{\mu}{2\pi kT}\right)^{3/2} \int_0^\infty \sigma(v) v^3 \exp\left(-\frac{\mu v^2}{kT}\right) dv$$



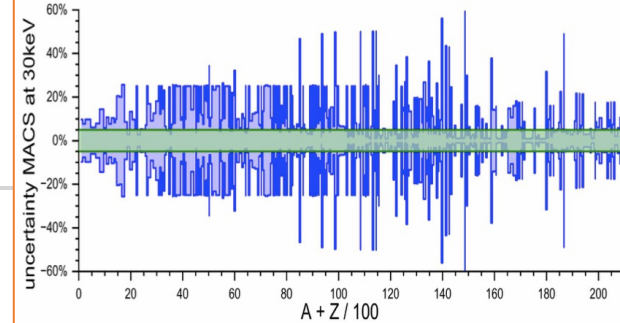
## Abbondanze previste

Confronto con le abbondanze osservate sperimentalmente

$\sigma(E)$  - Determinato sperimentalmente

MACS - Misurato direttamente

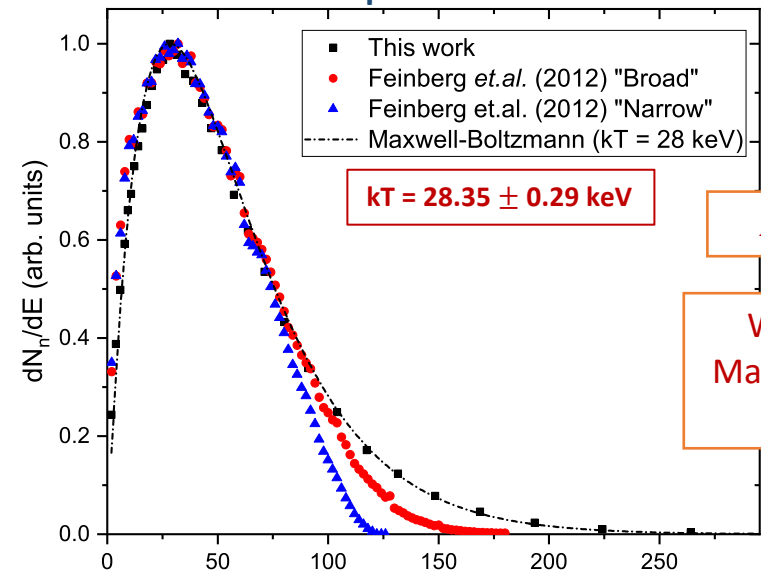
## Uncertainties of MACS in KADoNiS



Karlsruhe Astrophysical Database of Nucleosynthesis in Stars (KADoNiS)  
[https://exp-astro.physik.uni-frankfurt.de/kadonis1.0/KADoNiS\\_database](https://exp-astro.physik.uni-frankfurt.de/kadonis1.0/KADoNiS_database)

Campagna di misura di MACS degli isotopi di rilevanza per l'astrofica.

## 0°-90° spettro di neutroni



$R^2 = 0.992$

Well reproduce Maxwell-Boltzmann spectrum



# Tavola periodica degli elementi

## 250 secondi dopo il Big Bang

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<sup>1</sup> H																	<sup>2</sup> He
<sup>3</sup> Li	4								5	6	7	8	9	10			
11	12								13	14	15	16	17	18			

I primi 3 elementi primordiali (H, He e Li) ci sono formati. Si formarono quantità insignificanti di <sup>7</sup>Be e <sup>8</sup>Be ma a causa della loro breve vita decadde.

# Tavola periodica degli elementi

250 secondi dopo il Big Bang

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$^1_1\text{H}$																	$^3_2\text{He}$
$^4_2\text{He}$	3	4			5	6	7	8	9	10							
11	12				13	14	15	16	17	18							

100 milioni di anni dopo il Big Bang

1 H																		2 He							
3 Li	4 Be																		5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg																								
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr								
37 Rb																									

Primordial

Cosmic ray spallation

Exploding massive stars

Piccole quantità di He-3, insieme a litio, berillio e boro, si formano dalla spallazione dei raggi cosmici. Gli elementi oltre il picco del ferro sono dovuti al lento processo-s di cattura dei neutroni.

# Tavola periodica degli elementi

250 secondi dopo il Big Bang

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H																	2 He
3 Li	4 Be																
11 Na	12 Mg																

200 milioni di anni dopo il Big Bang

100 milioni di anni dopo il Big Bang

1 H																	2 He
3 Li	4 Be																
11 Na	12 Mg																
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																

1 H																	2 He
3 Li	4 Be																
11 Na	12 Mg																
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np													

Piccole quantità di He-3, insieme a litio, berillio e boro, si formano dalla spallazione dei raggi cosmici. Gli elementi oltre il picco del Fe sono dovuti al lento processo-s di cattura dei neutroni. Gli elementi oltre sono dovuti al processo-r di cattura rapida dei neutroni.

# Tavola periodica degli elementi

250 secondi dopo il Big Bang

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H																	He
Li	4																
11	12																







8 miliardi anni dopo il Big Bang

100 milioni di anni dopo il Big Bang

1	2																	2
H																		He
3	4																	
Li	Be																	
11	12																	
Na	Mg																	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
37																		
Rb																		

200 milioni di anni dopo il Big Bang

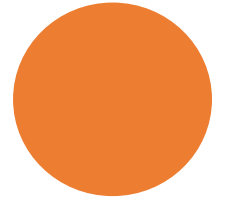
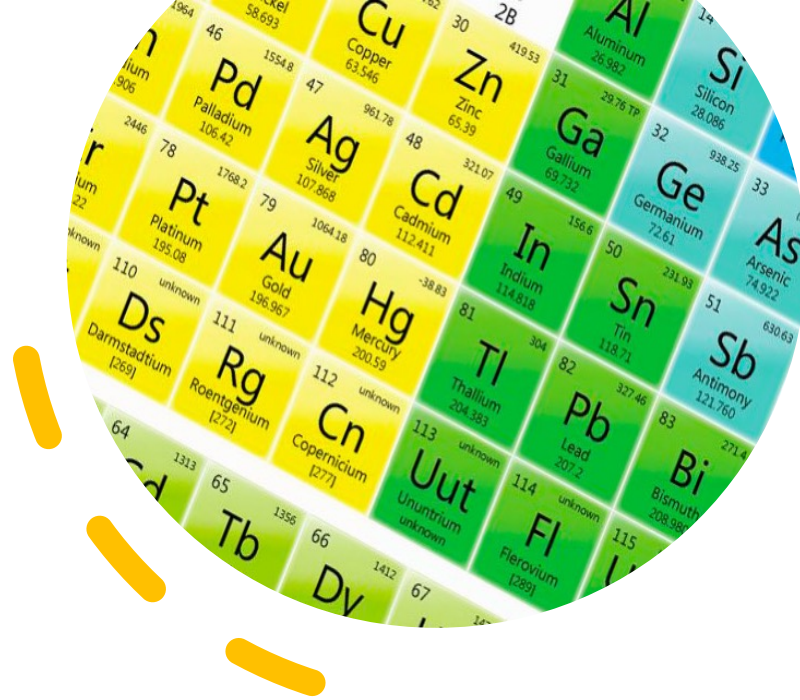
1	2																		2
H																			He
3	4																		
Li	Be																		
11	12																		
Na	Mg																		
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
55	56																		
Cs	Ba																		
72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86					
Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn					
87	88																		
Fr	Ra																		
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71					
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
89	90	91	92																
Ac	Th	Pa	U																

1	big bang fusion 															cosmic ray fission 															2
3	4	merging neutron stars 										exploding massive stars 										5	6	7	8	9	10				
11	12	dying low mass stars 										exploding white dwarfs 										13	14	15	16	17	18				
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36														
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54														
55	56																														
72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																	
87	88																														
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71																	
89	90	91	92																												

Johnson et al. (2020)

# Conclusioni

- Le origini degli elementi sono un argomento complesso e affascinante che ha perplesso scienziati per decenni.
- Attraverso processi come la nucleosintesi primordiale, la nucleosintesi stellare, le supernovae e la spallazione dei raggi cosmici, l'universo si è gradualmente evoluto, dando origine alla vasta gamma di elementi che osserviamo oggi.
- Comprendendo questi processi, acquisiamo preziose intuizioni sulla natura fondamentale del nostro universo e meccanismi che governano la sua evoluzione.





Grazie per l'attenzione !!!

# Alcuni elementi di Fisica Nucleare

L'energia di legame  $B(Z;N)$  di un nucleo è definita come l'energia necessaria per scomporlo nei singoli nucleoni.

$$B(Z, N) = N m_n c^2 + Z m_p c^2 - M(Z, N) c^2$$

La forza nucleare rende la massa del nucleo più piccola della somma delle masse dei singoli nucleoni.

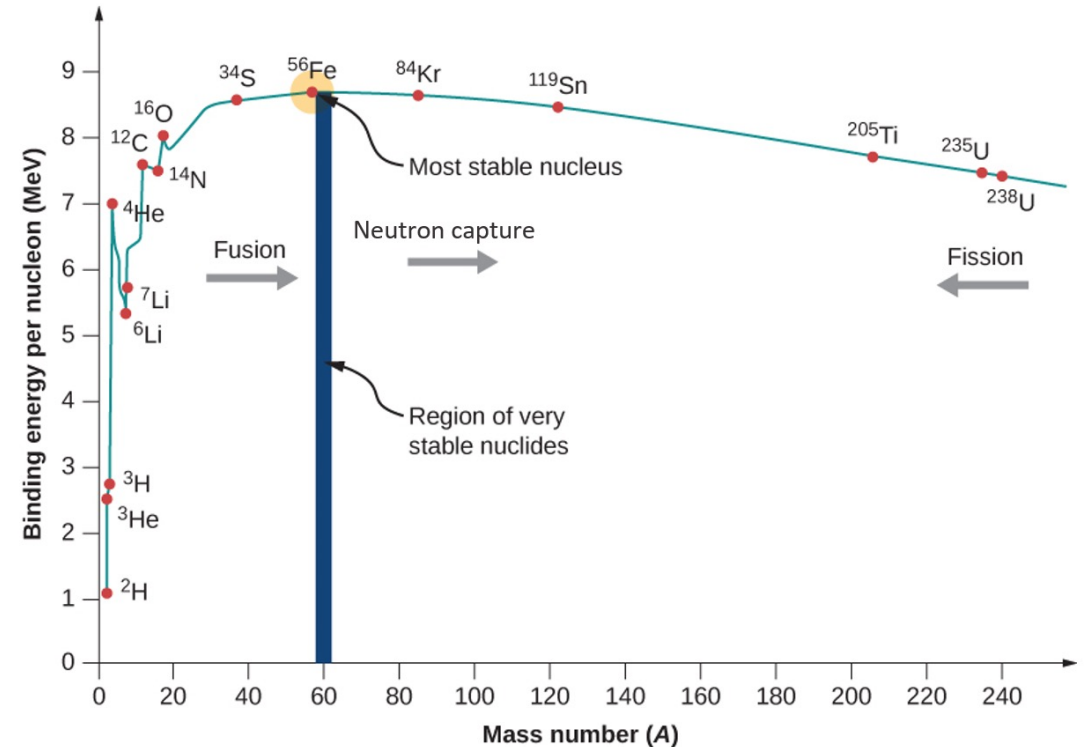
Il ferro è il nucleo più strettamente legato, con un'energia legante per nucleoni di 8,8 MeV per l'isotopo  $^{56}\text{Fe}$ .

$A < 56$ : l'energia viene rilasciata aumentando la massa (catturando un nucleone o una particella).

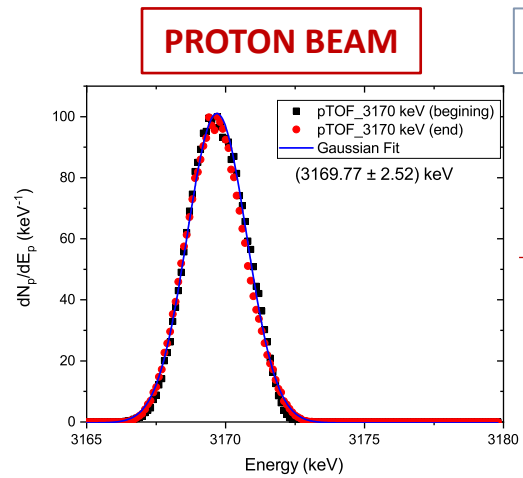
$A > 56$ : i nuclei aumentano la loro energia di legame (o, equivalentemente, riducono la loro massa) emettendo particelle.

La fissione spontanea avviene nella regione dell'uranio ( $A \approx 200$  e oltre).

L'energia di legame nucleare è l'energia responsabile della stabilità del nucleo: se il numero di neutroni è troppo piccolo o troppo grande, il nucleo risulta instabile e decade radioattivamente.

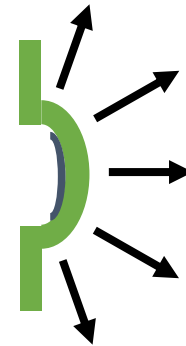
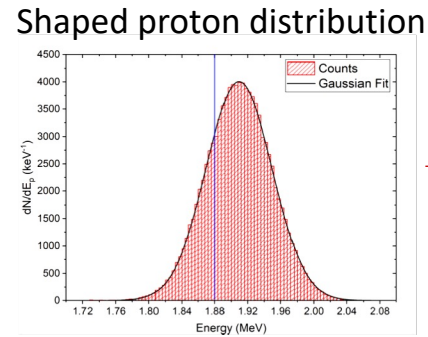


# Nucleosintesi @LNL

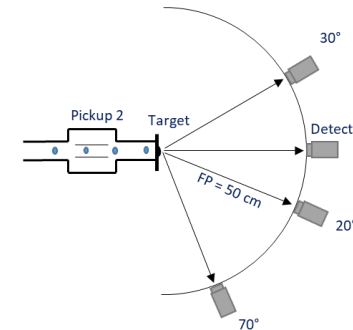
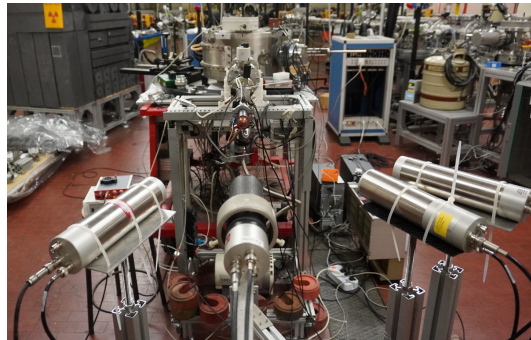


$E_p = 3.17$  MeV

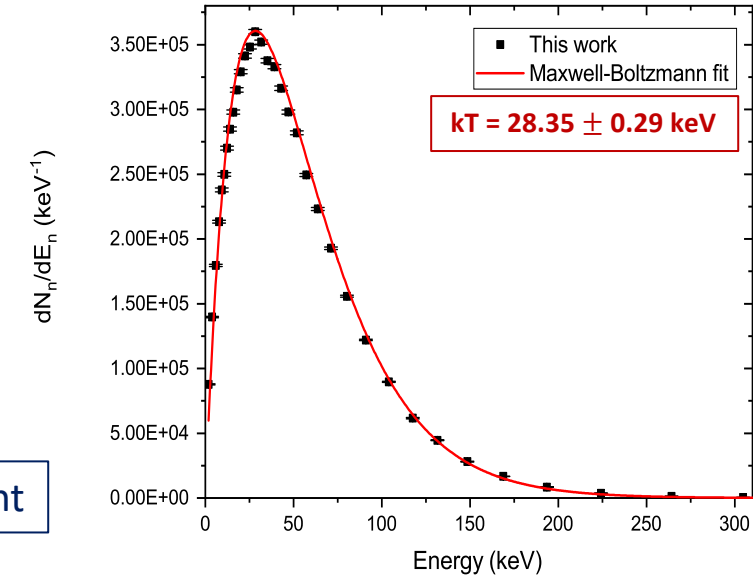
51  $\mu$ m Al foil



Neutron Time-of-Flight



**0°-90° INTEGRAL NEUTRON SPECTRUM**

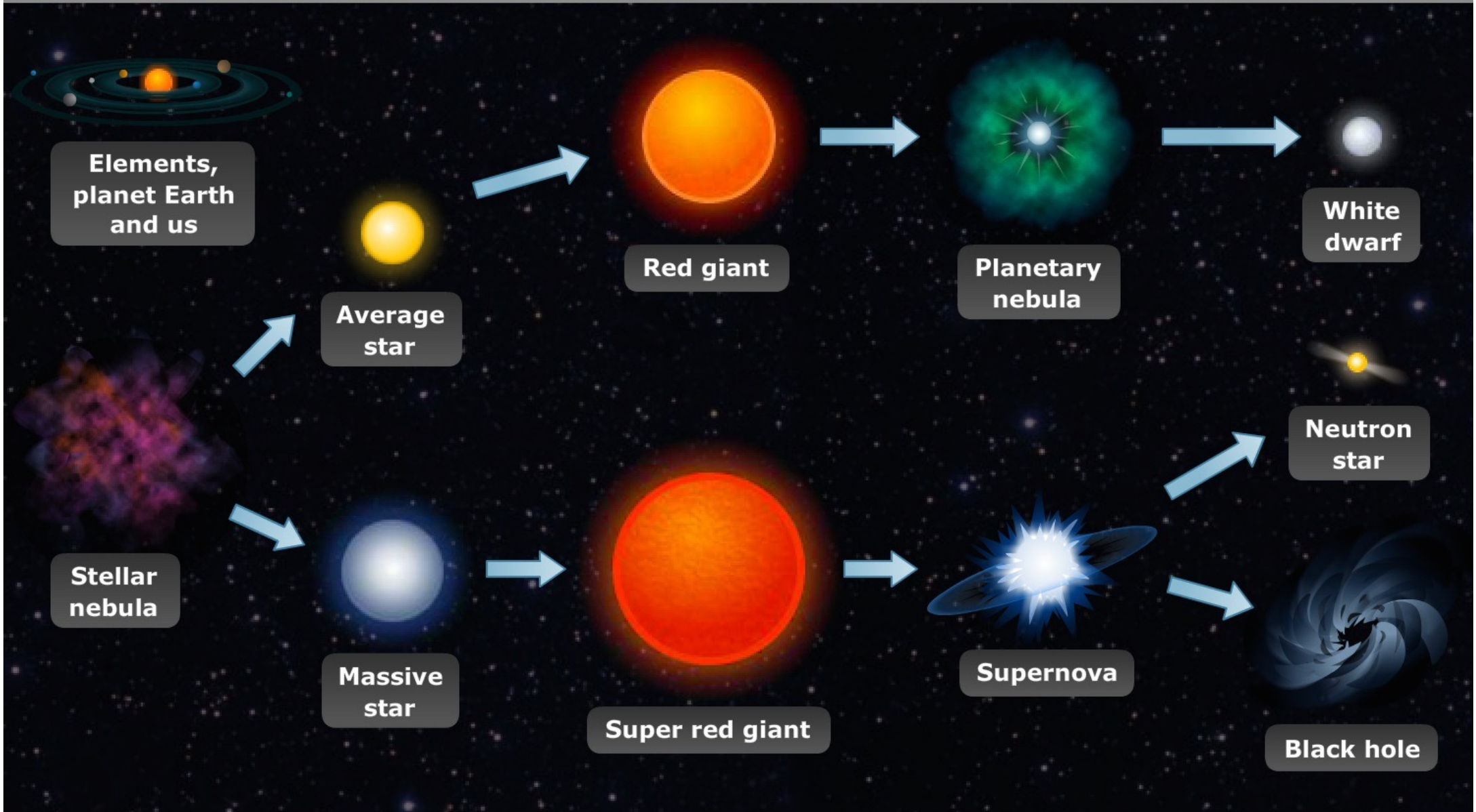


$R^2 = 0.992$

Well reproduce Maxwell-Boltzmann spectrum



# UNIVERSAL ELEMENT FORMATION



# Ciclo di vita

Il ciclo di vita inizia in una nebulosa, una vasta nube di gas e polvere nello spazio. La gravità comincia a comprimere una regione della nebulosa, formando un nucleo protostellare.

## Stelle della Sequenza Principale:

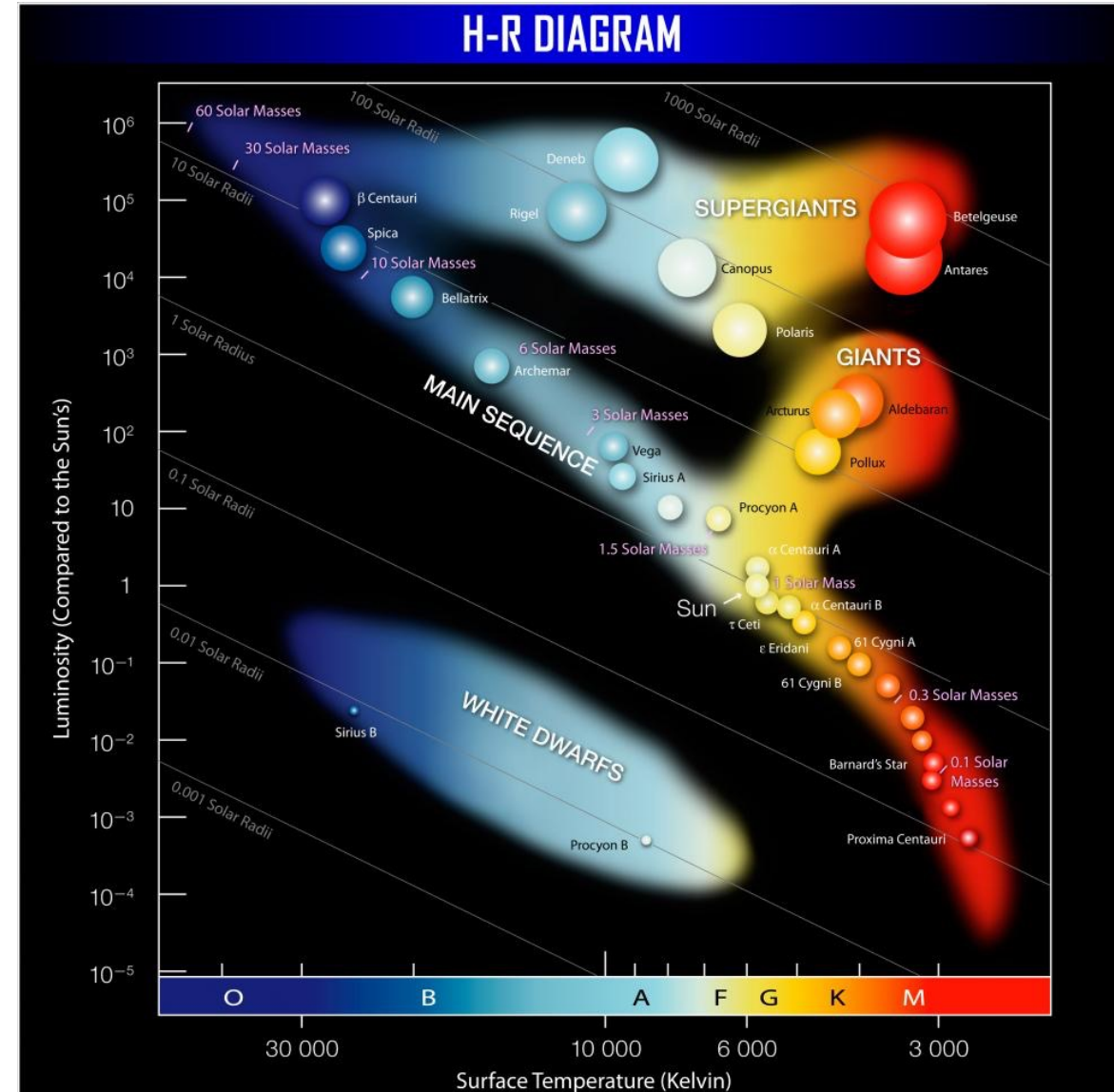
Quando la temperatura e la pressione al centro della protostella raggiungono livelli sufficienti, inizia la fusione nucleare dell'idrogeno per formare elio. La stella entra nella fase di sequenza principale, dove brucia idrogeno nel suo nucleo per generare energia.

## Gigante Rossa (per stelle di piccola e media massa):

A un certo punto, le stelle di massa più bassa, come il nostro Sole, esauriscono l'idrogeno nel loro nucleo. In risposta, la stella espande i suoi strati esterni, diventando una gigante rossa.

## Espulsione degli Strati Esterni (per stelle di bassa/media massa):

Le stelle di massa inferiore espellono gli strati esterni nell'ambiente circostante, creando una nebulosa planetaria. Al centro rimane una nana bianca, una stella molto compatta costituita principalmente da carbonio e ossigeno.



# Ciclo di vita

## Supernova (per stelle di massa elevata):

Le stelle di massa più elevata esauriscono il loro combustibile nucleare in modo più rapido. Quando queste stelle esauriscono l'idrogeno, iniziano a fondere elementi più pesanti fino a formare il ferro nel loro nucleo. L'accumulo di ferro causa un collasso gravitazionale, portando a una supernova, un'esplosione stellare molto energetica.

## Nane Bianche e Stelle di Neutroni (per stelle di massa elevata):

Nel caso di una supernova, il nucleo della stella può collassare per formare una nana bianca (se la massa originale della stella era abbastanza bassa) o una stella di neutroni (se la massa era sufficientemente elevata).

- Le nane bianche sono stelle estremamente dense composte principalmente da carbonio e ossigeno.
- Le stelle di neutroni sono oggetti ancora più densi composti principalmente da neutroni.

## Buco Nero (per stelle di massa molto elevata):

Se la massa originale della stella è sufficientemente elevata, il collasso gravitazionale può portare alla formazione di un buco nero, una regione dello spazio dalla gravità così intensa che nulla, nemmeno la luce, può sfuggire.

