

L'Universo esplosivo e l'origine degli elementi chimici

Villi Demaldè – Mattia Bulla
Poggetto, 27 gennaio 2023

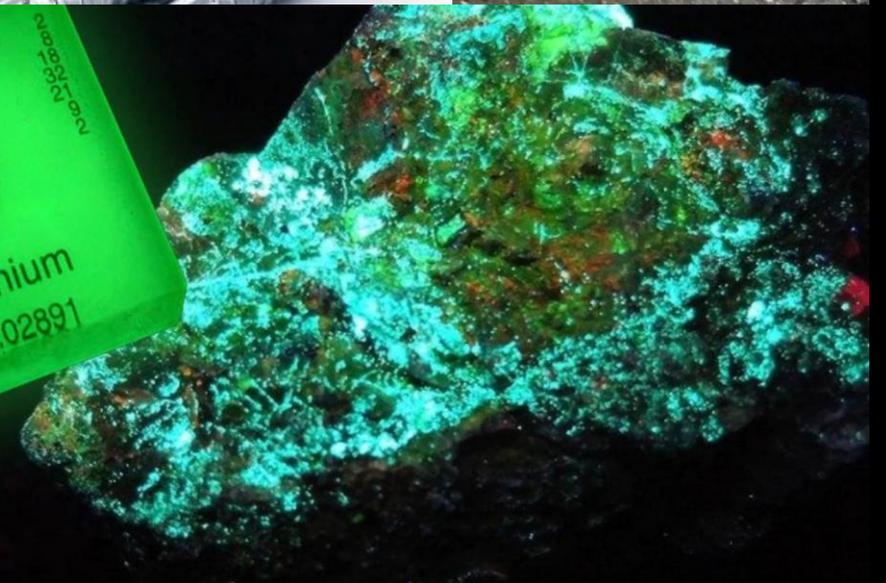
Gli *elementi chimici* attorno a noi

In chimica, si chiama **elemento** una **sostanza semplice**, cioè non decomponibile in altre ancora più semplici

Due o più elementi formano un **composto**

Sono esempi di elementi l'idrogeno, l'elio, il carbonio, l'ossigeno, il sodio, il ferro, lo iodio, l'uranio...

Gli elementi attualmente conosciuti sono 118: di questi, 90 sono presenti in natura e 28 sono stati prodotti artificialmente. 35 di essi sono **radioattivi** (cioè emettono radiazioni α , β o γ)



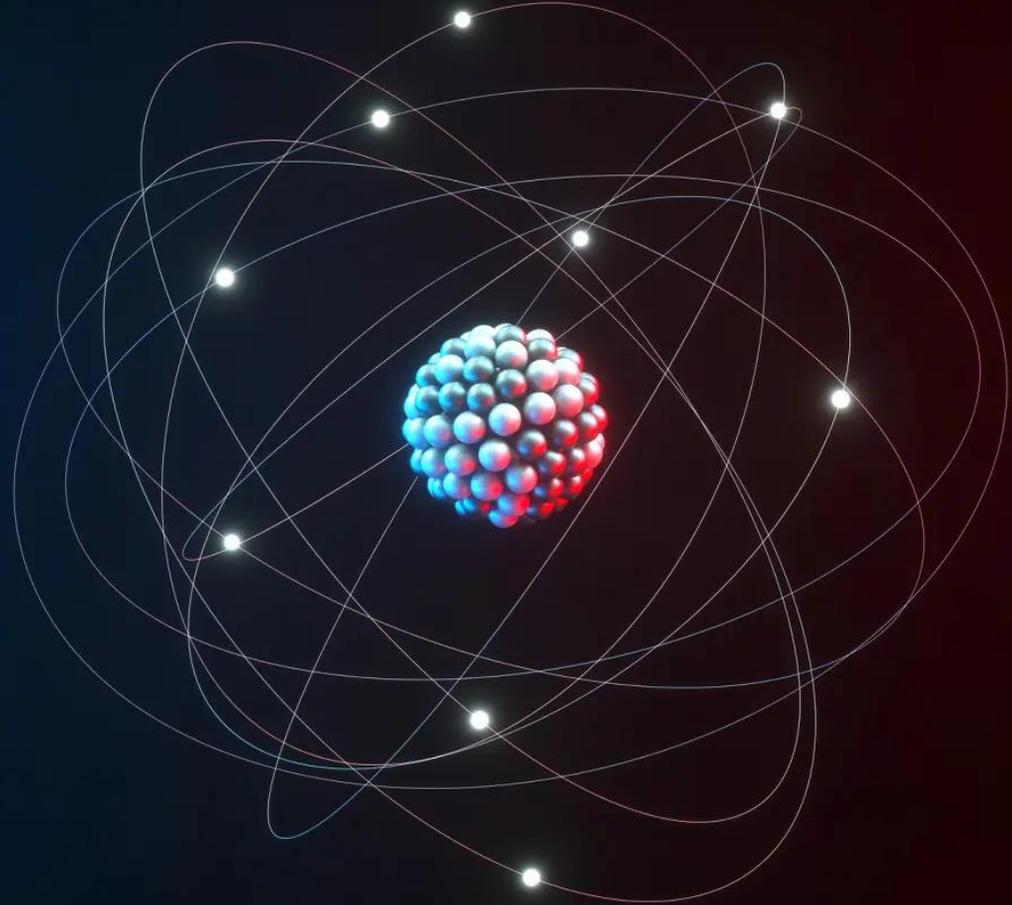
Elementi & atomi: quando i numeri contano

La materia è formata da **atomi**, costituiti da un **nucleo** contenente **protoni** (+) e **neutroni** privi di carica, detti insieme **nucleoni**. A grandi distanze rispetto alle dimensioni del nucleo, vi sono gli **elettroni** (-), in ugual numero rispetto ai protoni.

È il numero di protoni **Z** a caratterizzare gli atomi come appartenenti a un certo elemento: per es., tutti gli atomi con 6 protoni nel nucleo sono atomi dell'elemento **carbonio**.

Il numero di neutroni **N** può invece variare anche tra atomi dello stesso elemento: sono i c.d. **isotopi**.

$A = Z + N$ è detto **numero di massa**.



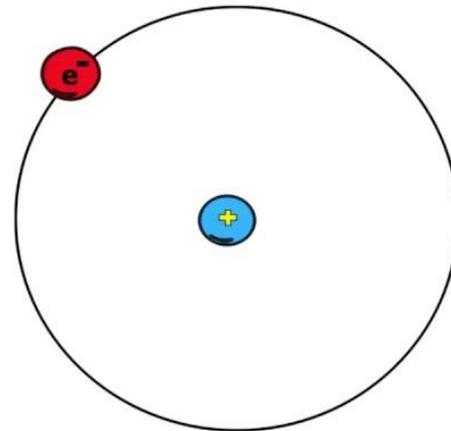
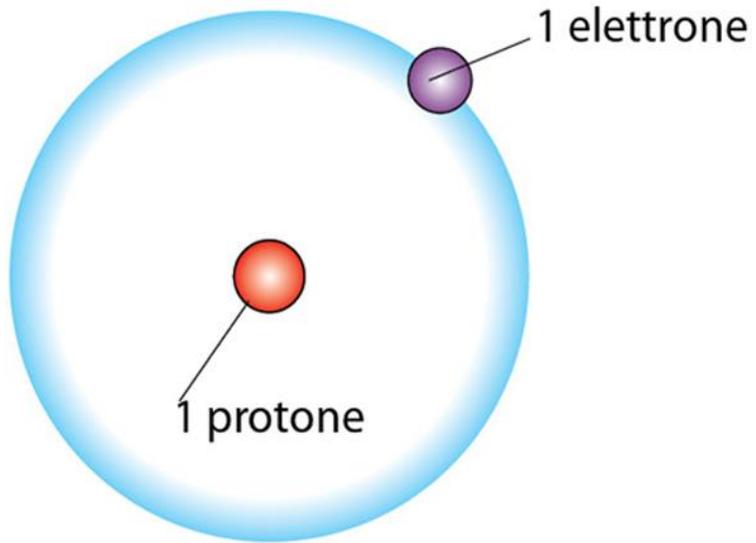
Come si
rappresentano?

Si parla di *nuclide* per indicare ogni singola specie nucleare, individuata da un numero atomico e da un numero di massa

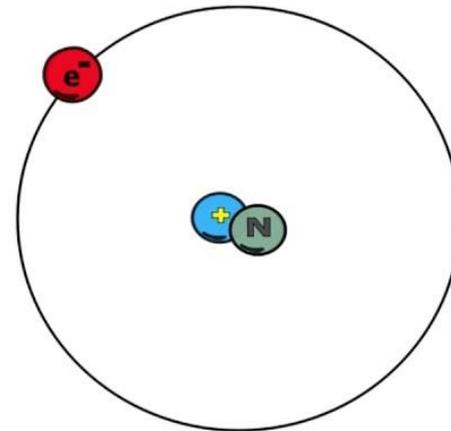


- Simbolo dell'Elemento
- Numero di Massa ($p + n$)
- Numero Atomico (p)

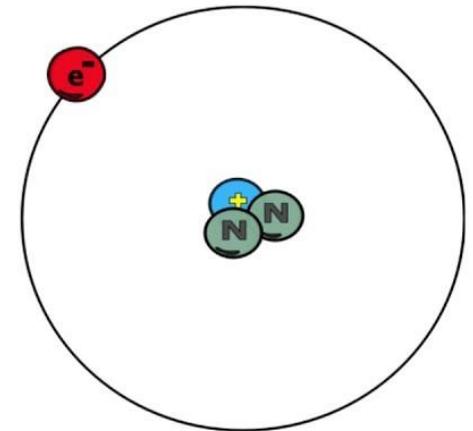
Atomo e isotopi dell'idrogeno



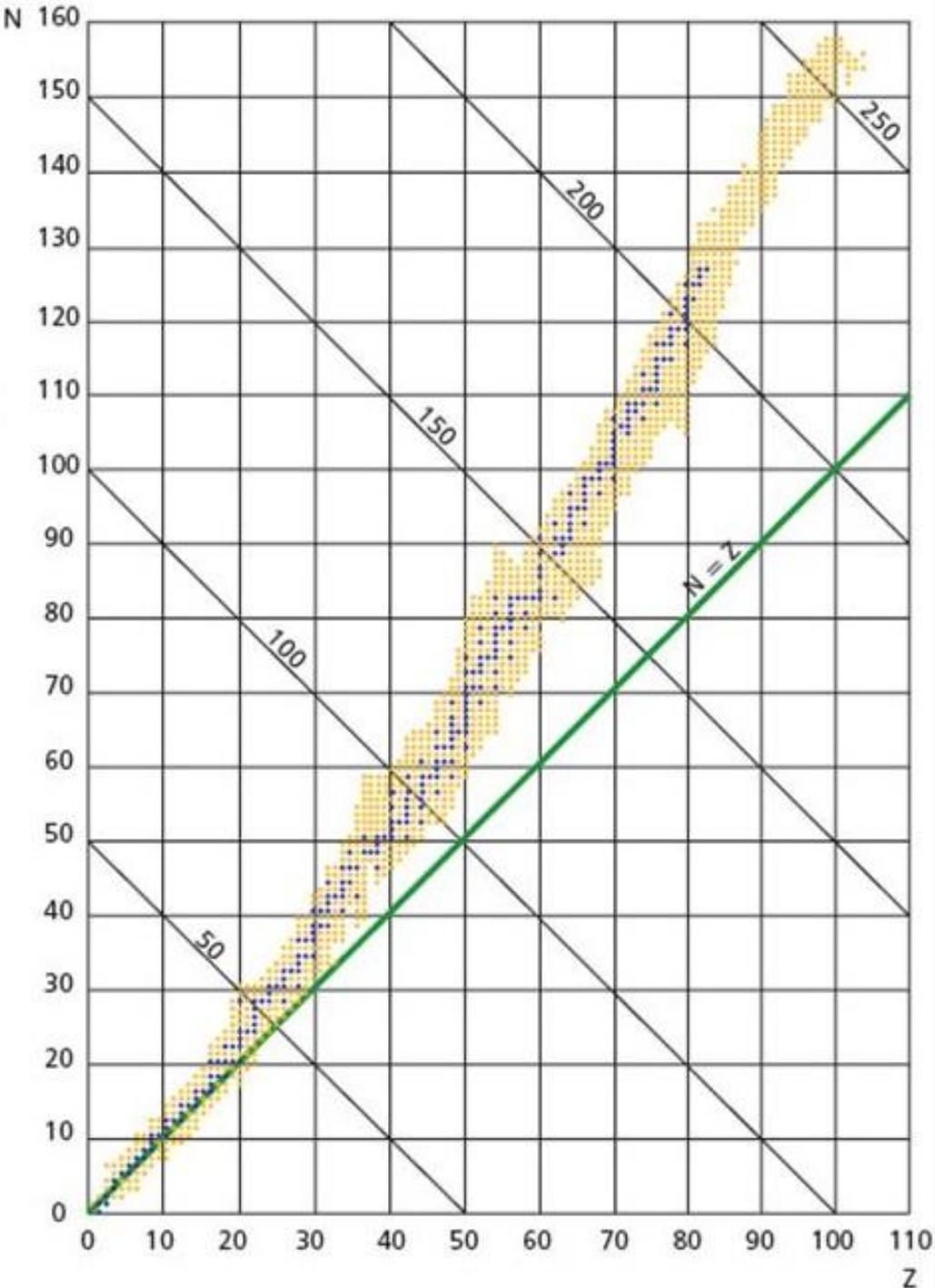
¹₁H
Protio



²₁H
Deuterio



³₁H
Trizio



Stabilità dei nuclei

- Nei nuclei agiscono diverse forze: attrattive (a cortissimo raggio, la c.d. *interazione nucleare forte*) tra tutti i nucleoni e repulsive (a lungo raggio, la *forza elettrostatica*) tra i protoni, cioè cariche di ugual segno. Se prevalgono quelle attrattive il nucleo «regge», viceversa no.
- I nuclei possono essere perciò *stabili* o *instabili*, e in quest'ultimo caso tendono a stabilizzarsi trasformandosi in altri nuclei (con i *decadimenti radioattivi*) soprattutto mediante l'espulsione di particelle nucleari (α , β).
- La stabilità dipende da Z e anche da N/Z . Al crescere di Z aumenta la forza repulsiva e occorrono sempre più neutroni per "tenere insieme" il nucleo, fino al massimo di 83 protoni (Bismuto). Oltre questo limite prevale la repulsione elettrostatica tra i protoni.
- Anche un eccesso (o una scarsità) di neutroni rispetto ai protoni può rendere il nucleo instabile, anche se $Z \leq 83$.

Ma... da dove derivano atomi
ed elementi?

La nucleosintesi

Figli delle stelle?

- La *nucleosintesi* è l'insieme dei processi che, a partire dagli istanti successivi al *Big Bang*, ha portato alla formazione di tutti i nuclei degli elementi conosciuti, compresi quelli che formano il nostro corpo.
- Essa si distingue in:
 - ✓ n. *primordiale*, cioè l'insieme dei processi avvenuti nelle prime fasi di vita dell'Universo;
 - ✓ n. *stellare*, che avviene nel «cuore» delle stelle, a sua volta distinta nei processi principali della *catena protone-protone*, del *ciclo CNO*, del *processo tre alfa*.
 - ✓ n. *esplosiva*, quella che avviene nelle ultime fasi di vita di una stella, o nella fusione di *stelle di neutroni*.

Nucleosintesi primordiale

- Secondo la teoria più accreditata, quando dopo il *Big Bang* la temperatura è scesa sufficientemente, le particelle elementari hanno cominciato a formare i *nucleoni*. L'Universo era quindi ricchissimo di protoni.
- Secondo i cosmologi, tra 10 secondi e 20 minuti dopo il *Big Bang* si sarebbero formati: la maggior parte dell'elio presente nell'Universo, in particolare elio-4 (^4He), piccole quantità di deuterio (^2H), di elio-3 (^3He) e piccolissime quantità di litio-7 (^7Li). Occorre infatti una grandissima energia (e quindi un'altissima temperatura) per vincere la repulsione tra i protoni.
- Si sarebbero formati anche due isotopi instabili (o radionuclidi): il trizio (^3H) e il berillio-7 (^7Be). Questi due sarebbero poi decaduti in ^3He e ^7Li .
- L'Universo primordiale era quindi formato solamente da questi pochi elementi. E gli altri da dove derivano?



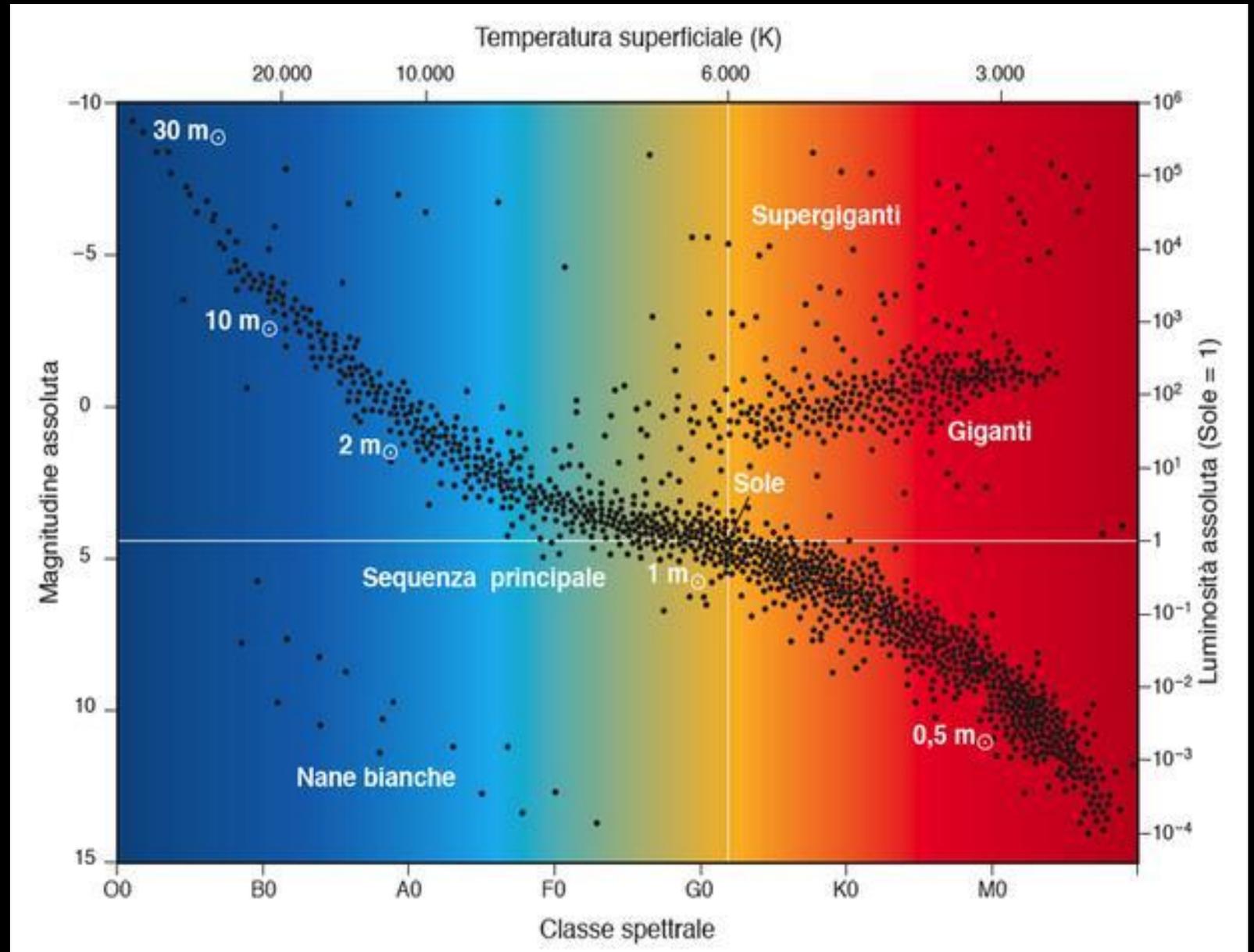
Vita da star: nucleosintesi stellare

- Dopo il *Big Bang* occorsero alcune centinaia di milioni di anni perché si «accendessero» le prime stelle.
- Una stella si origina a partire da una nube interstellare di gas (prevalentemente H) e di polveri, che inizia a *collassare* sotto l'azione della gravità e perciò a comprimersi e a riscaldarsi.
- Passata la fase di *protostella*, quando la T nella sua zona centrale (*nucleo*) raggiunge una decina di milioni di °C, iniziano i processi di *fusione nucleare*. L'energia termica è tale da vincere le repulsioni tra i protoni e tra i nuclei: è nata una stella. Essa è stabile finché resta in equilibrio tra la gravità che tende a farla collassare e la tendenza all'espansione data dall'energia liberata dalla fusione nucleare.
- La vita e l'evoluzione della stella dipendono ora dalla sua massa: quanto maggiore essa è, tanto più «vivaci» saranno le reazioni di fusione nucleare al suo interno e tanto più breve sarà la sua vita.



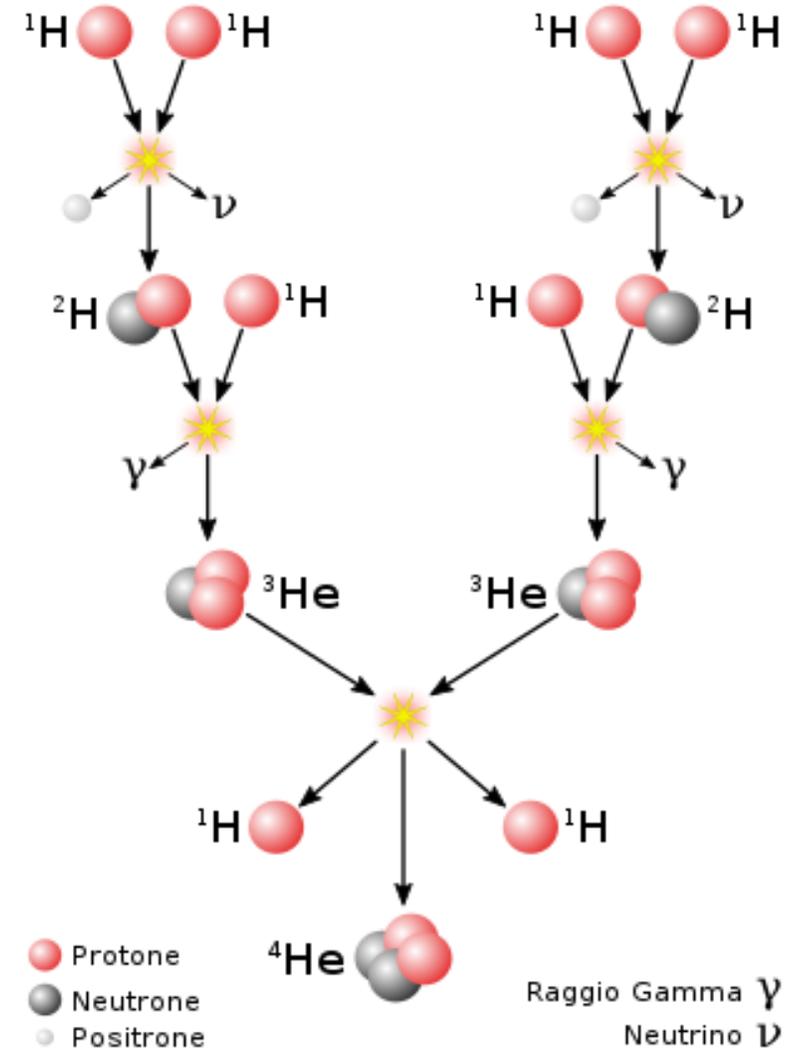
Il diagramma HR

Il diagramma di Hertzsprung-Russell (HR) rappresenta la relazione tra massa, Magnitudine, Luminosità, Temperatura superficiale e Classe spettrale («colore») delle stelle. Quelle nella diagonale sono dette della *Sequenza principale* e sono stelle nella prima fase della loro vita. A destra si trovano le giganti e supergiganti rosse, stelle in una fase successiva della propria evoluzione.



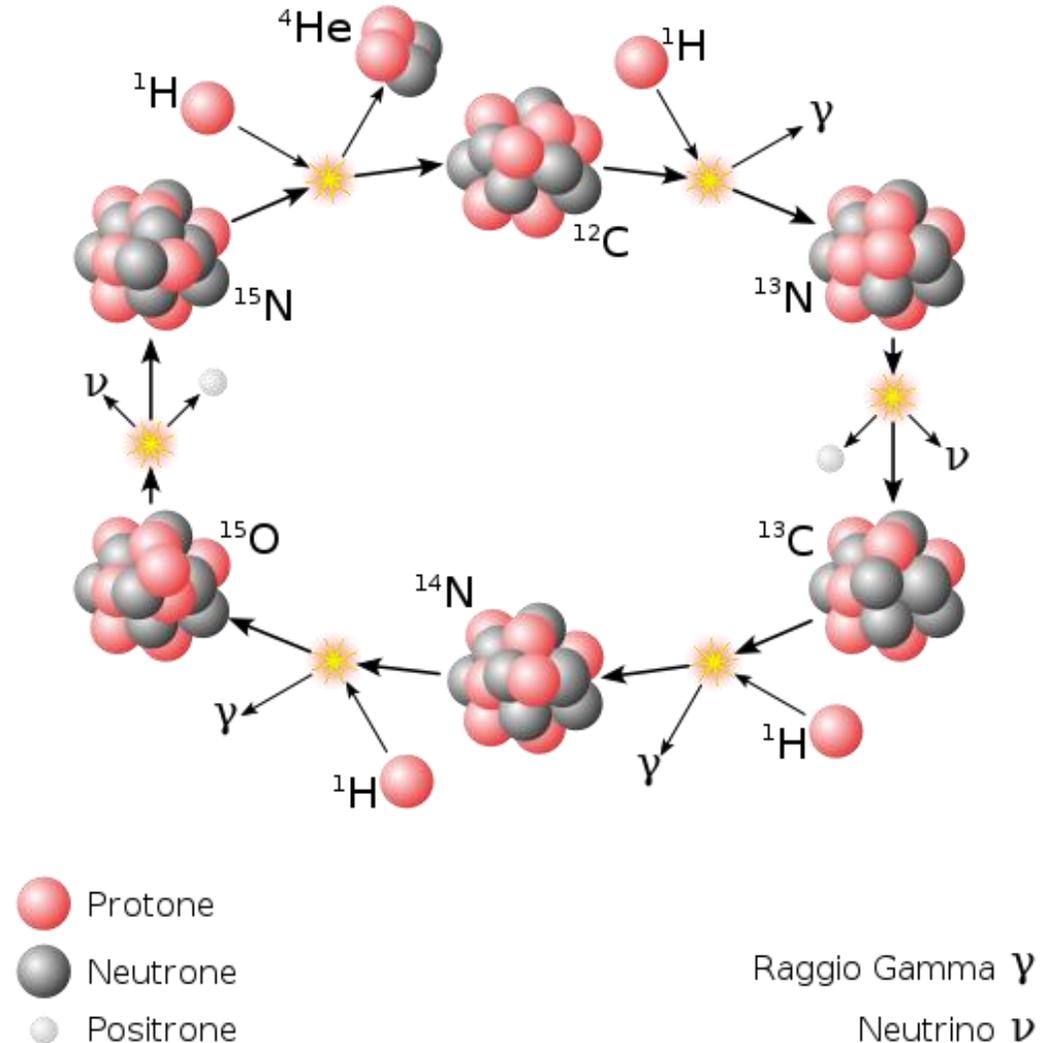
Stella, stellina...

- Nelle stelle di massa più piccola, fino a quella del nostro Sole, nella prima fase della loro vita opera soprattutto la *catena protone-protone*.
- Il risultato finale di tale processo è la trasformazione di 4 nuclei di ^1H (protoni) in un nucleo di ^4He , con la liberazione di un'enorme quantità di energia.
- Le stelle di massa più piccola possono «vivere» per molte decine di miliardi di anni in questa fase.



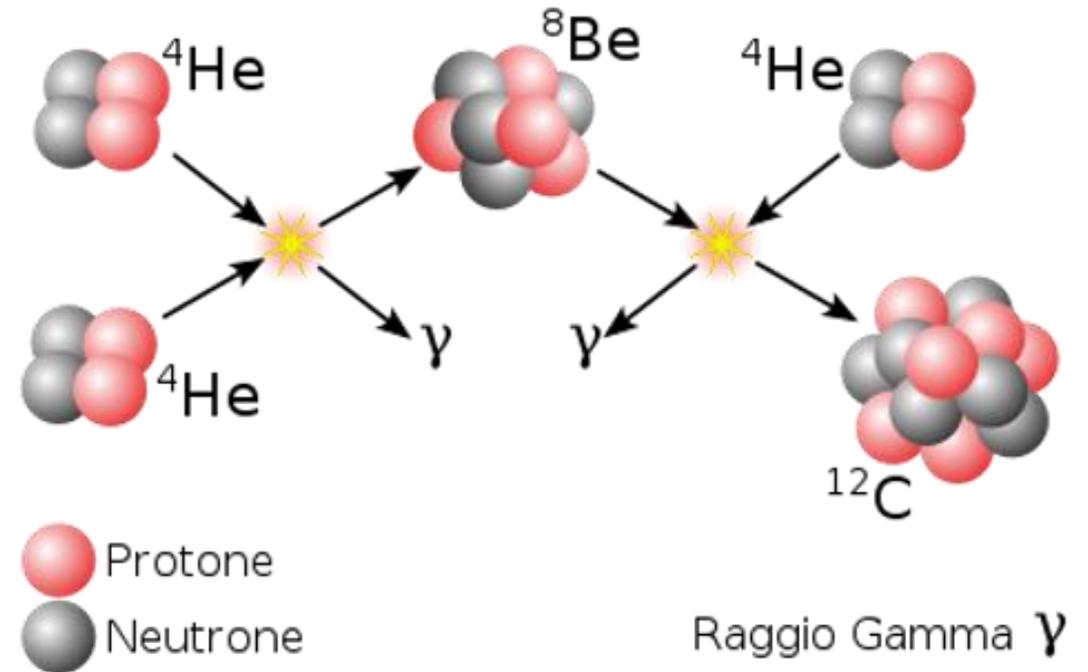
Il ciclo CNO

- Il ciclo CNO, o ciclo di Bethe, è l'altra serie di reazioni nucleari che avvengono comunemente all'interno delle stelle.
- Secondo i modelli teorici il ciclo CNO è la principale sorgente di energia per le stelle più massicce, cioè da 1,2 volte quella del Sole, che raggiungono temperature più alte.
- Anche in questo ciclo, partendo da quattro protoni, si produce una particella alfa (cioè un nucleo di elio-4).
- I nuclei di carbonio, azoto e ossigeno agiscono rendendo possibile il processo (*catalizzatori*).



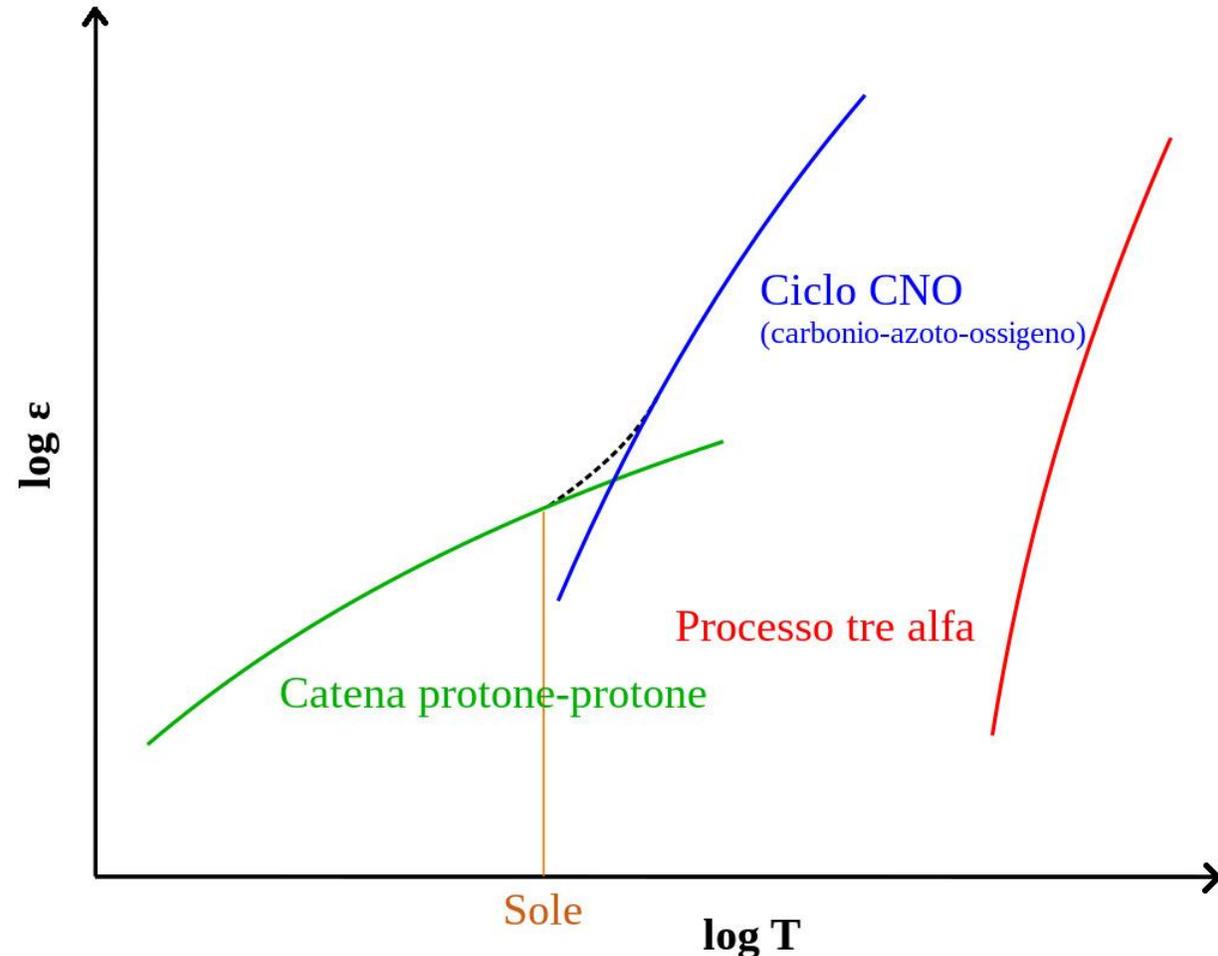
Processo *tre alfa*

- In questo processo tre nuclei di elio-4 (particella α) sono alla fine trasformati in carbonio-12 dopo una serie di reazioni nucleari che passa attraverso la sintesi del berillio-8.
- Questa reazione di fusione nucleare può avvenire solo in ambienti ricchi di elio, con pressioni elevate e a temperature superiori a 100.000.000 °C.
- Avviene perciò all'interno di stelle a uno stadio di evoluzione avanzato: l'elio prodotto dalla catena protone-protone e dal ciclo CNO si è accumulato al centro della stella. La stella collassa per gravità, finché la temperatura al centro non raggiunge il valore necessario perché inizi la fusione dell'elio.



I tre processi a confronto

- I processi di fusione visti richiedono condizioni diverse per realizzarsi.
- Il ciclo CNO e ancora di più il processo tre alfa sono più probabili (ϵ è la c.d. *sezione d'urto*, che indica la probabilità che avvenga la trasformazione) a T più elevate (stelle più massicce o fasi finali del ciclo stellare).
- Attraverso questi processi, cioè per via di fusione nucleare, si formano nuclei fino a circa $Z = 26$ (Fe, Ni).
- Ulteriori processi di fusione infatti non sarebbero energeticamente vantaggiosi.
- **Come si formano allora gli elementi più pesanti?**



Riconoscimenti

- Nella presentazione sono state utilizzate immagini e grafici tratti da vari siti Internet di pubblico dominio, tra cui Wikipedia per alcune delle voci trattate.
- L'autore di questa parte (Villi Demaldè) è disponibile a riconoscere gli eventuali diritti.