

L'abbondanza degli elementi nell'universo

Abbondanze nel sistema solare

Abbondanze fotosferiche e meteoriche

Abbondanze cosmiche

Chi da dove?

a) Nucleosintesi primordiale

b) Nucleosintesi stellare fino al ferro

c) Nucleosintesi oltre il ferro

Definizioni di abbondanza degli elementi

- **L'abbondanza in numero** di una specie atomica Z e' il rapporto fra il numero di atomi di questa specie e il numero degli atomi di una specie campione X

$$n_Z = N(Z)/N(X)$$

- Nello studiare le fotosfere stellari ci si riferisce in genere all'idrogeno, l'elemento in esse piu' abbondante. La quantita' $n_Z = N(Z)/N(H)$ e' il dato che si ottiene piu' direttamente dal confronto fra le intensita' delle righe dell'elemento Z e quelle dell' Idrogeno.
- Un altro elemento comunemente utilizzato come riferimento e' il Silicio (Si), che compone buona parte della crosta terrestre e dei meteoriti; in tal caso $n'_Z = N(Z)/N(Si)$

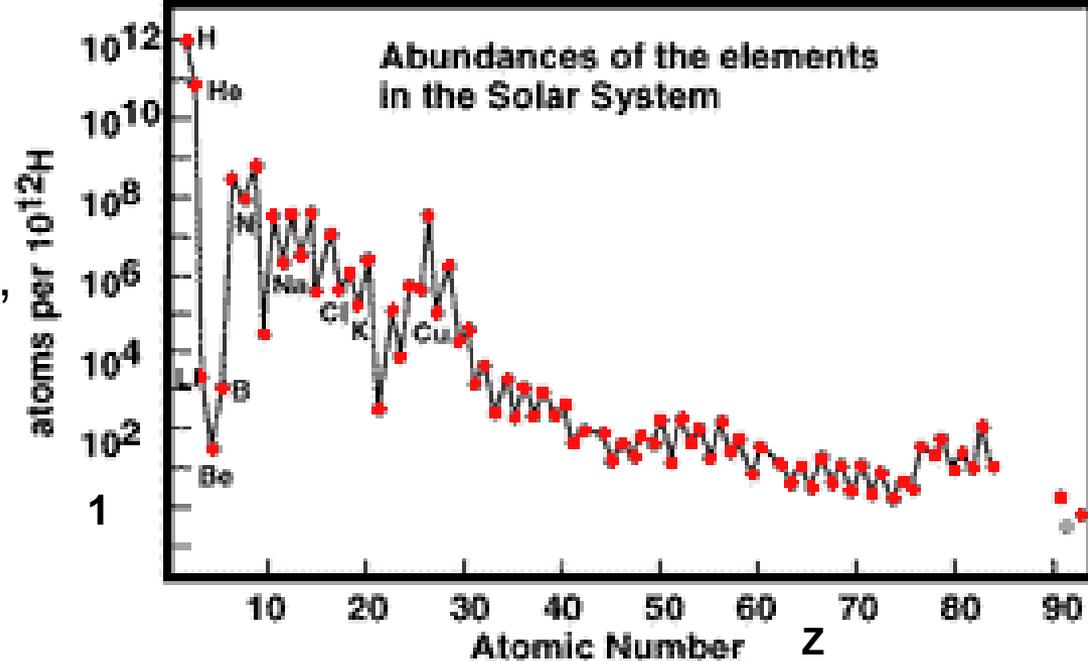
- **L'abbondanza in massa** di una specie atomica Z, a_Z e' la frazione in massa di quell'elemento contenuta in un campione

$$a_Z = m_Z N(Z) / \sum m_i N(i)$$

- Le abbondanza in massa si indicano in % o in "g/g", cioe' la quantita' di quell'elemento contenuta in un grammo di sostanza

Le abbondanze degli elementi nel sistema solare

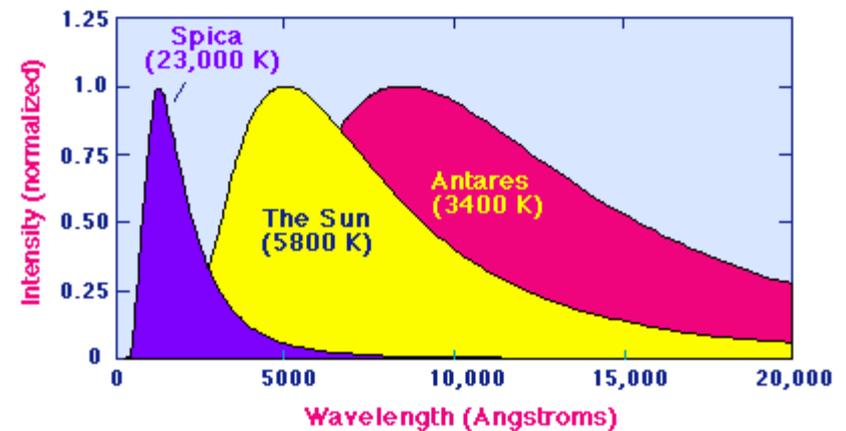
- La figura mostra le abbondanze, in numero di atomi, relative all' Idrogeno.
- L'idrogeno e' l' elemento di gran lunga piu' abbondante nel sistema solare e nel cosmo.
- Di questo la maggior parte e' ^1_1H , mentre il deuterio e' solo circa 10^{-4} .
- Il secondo elemento in ordine di abbondanza e' l'elio, il cui numero di e' circa 1/12 di quelli di H.
- Le abbondanze relative in genere decrescono all'aumentare di Z



- Gli elementi piu' pesanti, come l'Uranio, hanno abbondanze in numero dell' ordine di 10^{-12} rispetto all' Idrogeno.
- Nel sistema solare, le abbondanze in massa sono $X=a_{\text{H}}=73\%$, $Y=a_{\text{He}}=25\%$, mentre gli elementi con $Z>2$, genericamente indicati come "metalli" costituiscono complessivamente circa il 2% ($Z=\sum_{Z>2} a_Z=2\%$)

Abbondanze fotosferiche

- La fonte principale di informazioni sulle abbondanze nel sistema solare proviene dalla spettroscopia della fotosfera.
- Il tempo di diffusione di un elemento attraverso le dimensioni del sole e' di circa 10^{12} anni (vedi prossima trasp.)
- La fotosfera rappresenta dunque il materiale originario del sole, in quanto non ha avuto tempo sufficiente per mescolarsi con la parte interna del sole, dove avvengono reazioni nucleari che ne cambiano la composizione chimica.

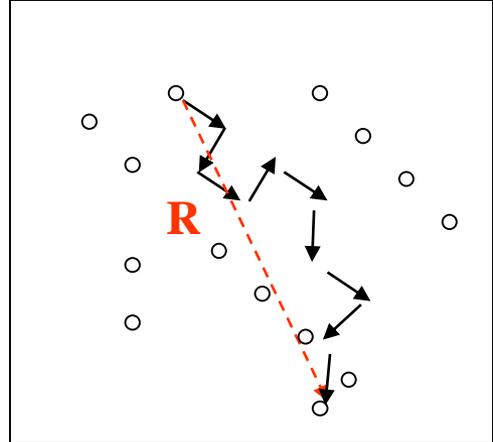


- Il sole emette uno spettro di corpo nero, a una temperatura di circa 5800 °K, sul quale sono sovrimposte le righe di assorbimento degli elementi. Dall'intensita' di queste righe si deduce la abbondanza degli elementi, rispetto all'idrogeno.
- L'Elio e' stato scoperto nella corona solare, ma per la posizione dei suoi livelli energetici non se ne puo' determinare l'abbondanza nella fotosfera con metodi spettroscopici

Tempi scala della diffusione nel sole

- Considero il sole con densita' media $n \approx 10^{24} \text{ cm}^{-3}$. Se considero un singolo atomo, questo farà una serie d'urti contro le molecole circostanti. La distanza media fra due urti sarà:
 $\lambda = 1/n\sigma \approx 1/[(10^{24} \text{ cm}^{-3})(10^{-16} \text{ cm}^2)] \approx 10^{-8} \text{ cm}$.
- La velocità con cui si muove sarà dell'ordine della velocità di agitazione termica; ponendo $m=10\text{GeV}$ e $kT=1\text{keV}$ si ha
 $v \approx (kT/m)^{1/2} \approx c(1\text{keV}/10^7\text{keV})^{1/2} \approx 10^7 \text{ cm/s}$
- Dopo N urti, l'atomo si sarà spostato di:
 $\mathbf{R} = \sum_i \boldsymbol{\lambda}_i$ dove $\boldsymbol{\lambda}_i$ sono dei vettori di lunghezza (media) λ e orientazione arbitraria.
- Se considero il quadrato di \mathbf{R} ho:

$$R^2 = \mathbf{R} \cdot \mathbf{R} = \sum_i \lambda_i^2 + \sum_{i \neq j} \boldsymbol{\lambda}_i \cdot \boldsymbol{\lambda}_j$$

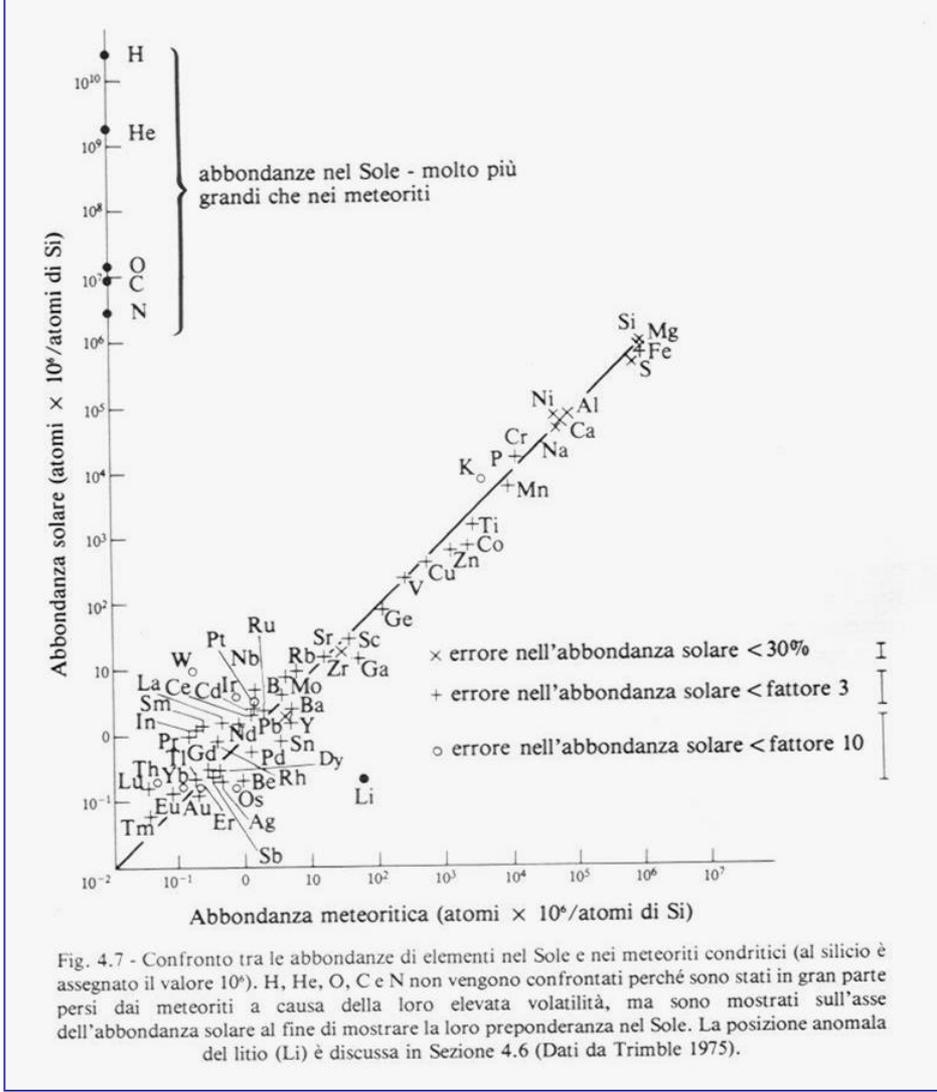


- Per grandi N il primo termine cresce come $\lambda^2 N$, mentre il secondo ha contributi di segno alterno, con media nulla. Quindi in media:
- (1) $\langle R^2 \rangle = N \lambda^2$
- Il tempo medio fra due urti è $\Delta t = \lambda/v$, per cui dopo un tempo t
- (2) $N = t/\Delta t = tv/\lambda$
- Combinando (1) e (2) ho la legge del moto browniano:
- (3) $\langle R^2 \rangle = vt \lambda$
- Se richiedo $\langle R^2 \rangle = (6 \cdot 10^{10} \text{ cm})^2$ (le dimensioni del sole) trovo:

$$t \approx 10^{15} \text{ anni}$$

Abbondanze meteoriche

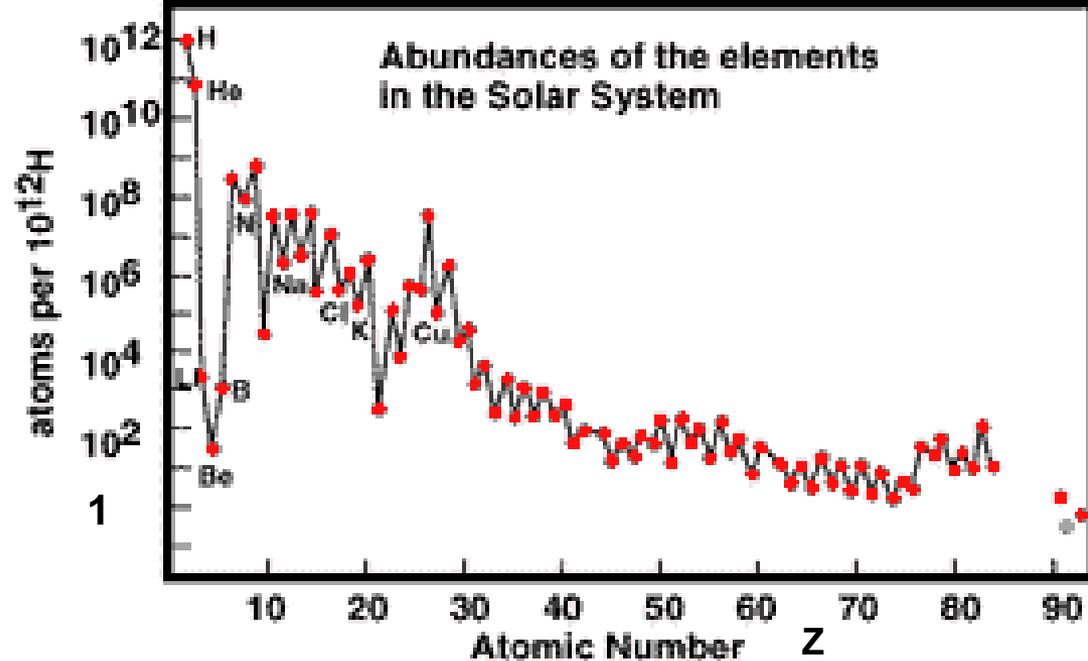
- Sono ricavate dallo studio della composizione di meteoriti che risultano aver subito scarsa differenziazione, cioè le cui abbondanze sono più simili a quella della nebulosa presolare.
- A questo riguardo sono particolarmente importanti i “condriti carbonacei CI”
- E' naturale che, rispetto alla fotosfera, nei meteoriti siano rari idrogeno, elio e gas nobili, cioè gli elementi più volatili, che necessitano una forte attrazione gravitazionale per essere intrappolati.
- In generale, le abbondanze meteoriche e fotosferiche, normalizzate ad un elemento comune quale il silicio sono concordanti, a testimonianza di una composizione sostanzialmente omogenea del sistema solare*



Un' unica eccezione, non completamente compresa: il sole e' carente di Litio per un fattore 100 rispetto ai CI

Abbondanze cosmiche

- Le caratteristiche principali delle abbondanze nel sistema solare sono riscontrate anche in altre stelle e in altre galassie.
- Le abbondanze di Idrogeno ed Elio ($a_H \approx 75\%$; $a_{He} \approx 25\%$) sono universali.
- Elementi oltre l'Elio e prima del Carbonio (Li, Be, B) sono particolarmente soppressi.
- C'è un picco nella regione fra il carbonio e l'ossigeno
- C'è un ulteriore picco intorno al Fe e quindi intorno al Piombo.

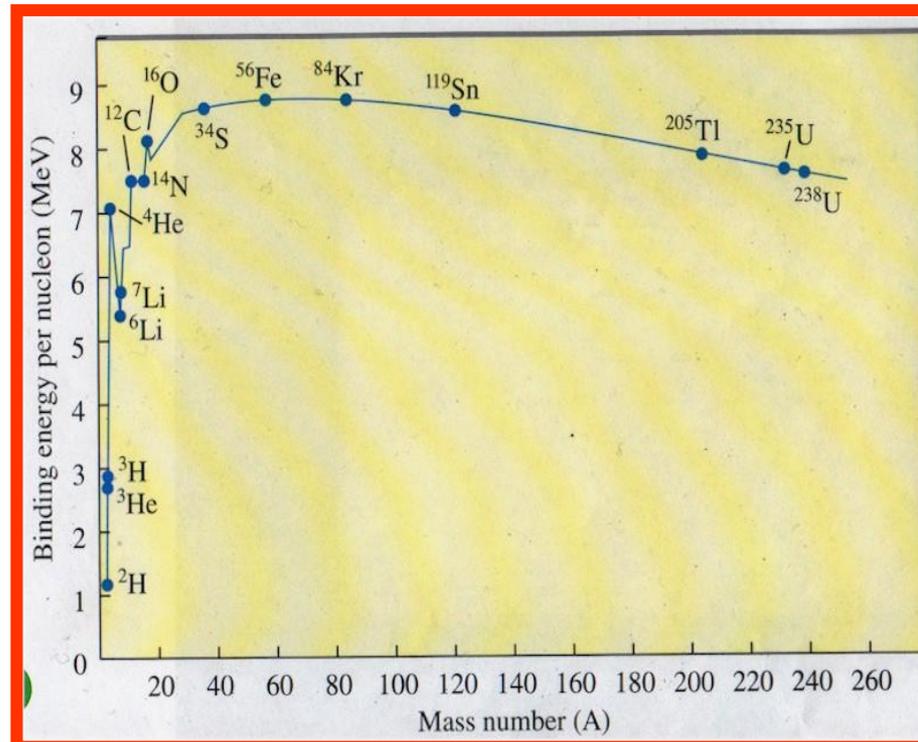
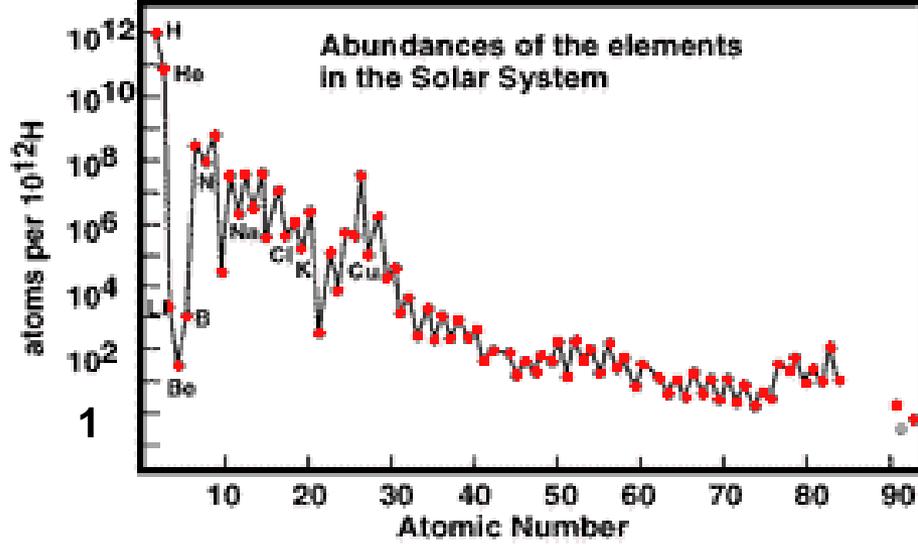


- Le abbondanze di metalli sono variabili, da $Z=2\%$ (stelle di prima popolazione*) fino a $Z=0.01\%$ (stelle di seconda popolazione).
- Non sono finora state osservate stelle prive di metalli (terza popolazione)
- **Il termine "prima popolazione" puo' essere ingannevole: si ritiene che in realta' queste siano le stelle piu' recenti formate con materiale fortemente riciclato*

Le 3 cucine cosmiche

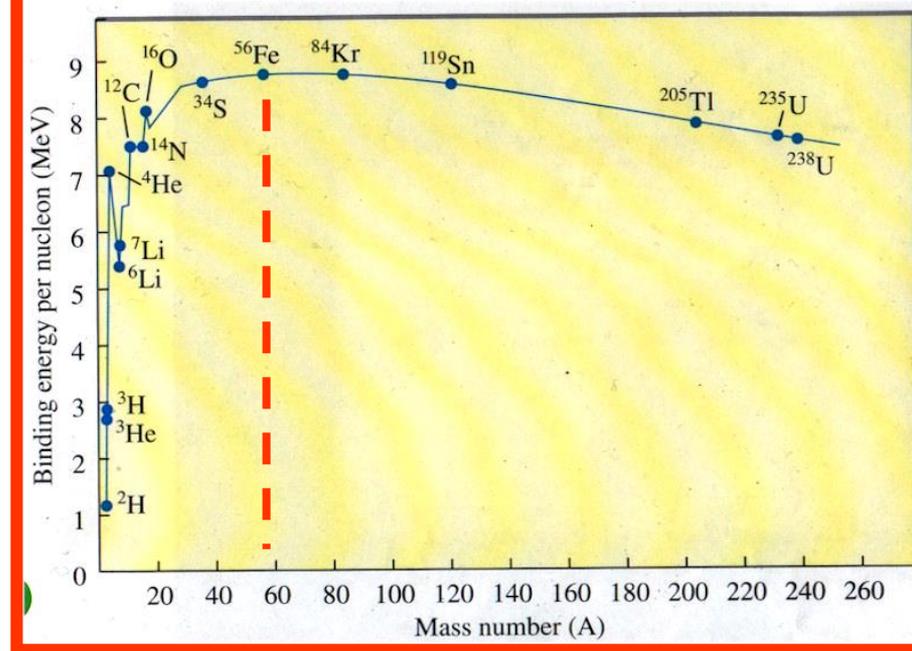
- Le abbondanze degli elementi che osserviamo nell'universo sono frutto di tre cucine cosmiche
- A) nucleosintesi primordiale
- B) nucleosintesi stellare, fino al ferro
- C) nucleosintesi stellare oltre il ferro

- A) e B) corrispondono a reazioni di fusione nucleare esoenergetiche, cioè in cui viene liberata dell'energia
- C) corrisponde a processi endoenergetici, in cui viene assorbita energia per la formazione dei nuclei più pesanti.
- Sono necessarie sia A) che B) al fine di:
 - rendere conto dell'abbondanza di Elio nell'universo (A)
 - rendere conto della abbondanza dei metalli



Richiami sulla fusione e fissione nucleare

- Da notare che l'energia di legame per nucleone ε cresce con A per $A < 60$, dove raggiunge un massimo (≈ 9 MeV), e quindi decresce lentamente.
- Questo vuol dire che si libera energia nel mettere assieme (fondere) due nuclei A_1 e A_2 fin tanto che $A = A_1 + A_2 < 60$, cioè, dato:



$$M(A)c^2 = (Z_1 + Z_2)m_p c^2 + (N_1 + N_2)m_n c^2 - E_b(A)$$

L'energia di legame di questo nucleo e'

$$E_b(A) = A \varepsilon(A) = A_1 \varepsilon(A_1) + A_2 \varepsilon(A_2) > A_1 \varepsilon(A_1) + A_2 \varepsilon(A_2)$$

e quindi

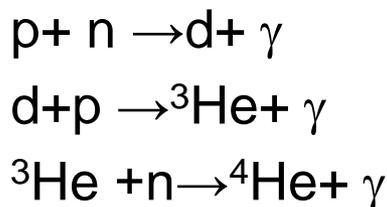
$$M(A)c^2 < (Z_1 + Z_2)m_p c^2 + (N_1 + N_2)m_n c^2 - A_1 \varepsilon(A_1) - A_2 \varepsilon(A_2) = M(A_1)c^2 + M(A_2)c^2$$

Poiche' $M(A) < M(A_1) + M(A_2)$ la reazione $A_1 + A_2 \rightarrow A$ libera energia.

- Viceversa, e' energeticamente conveniente la fissione di un nucleo con A grande, cioè i frammenti di fissione sono piu' legati e il processo di fissione libera energia.

Primi cenni sulla nucleosintesi primordiale

- Nei primi minuti dopo il big bang i neutroni presenti si sono legati ai protoni attraverso una serie di catture nucleari, come ad esempio:

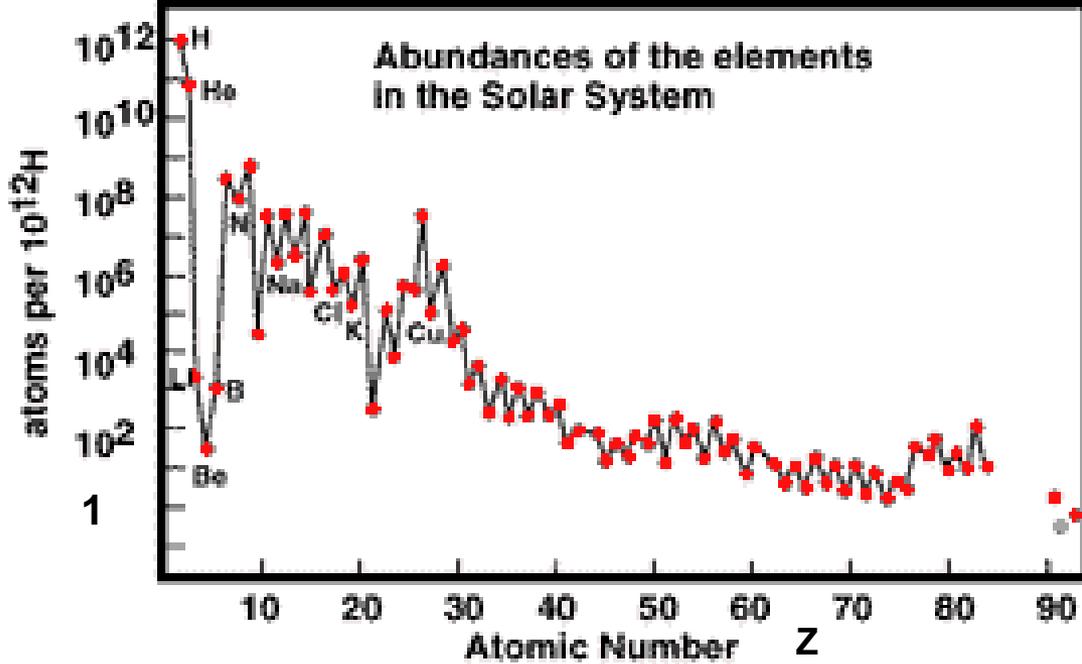


il cui risultato netto e' di trasformare:



Nei passi intermedi vengono formati dei nuclei stabili*, che possono attendere l'arrivo di una nuova particella da catturare.

*o comunque con tempi di decadimento maggiori di qualche minuto



- La serie di reazioni si ferma con ⁴He perche' per A=5 non esistono sistemi legati sufficientemente stabili.
- Gli elementi piu' pesanti dell'elio sono prodotti a partire dalla reazione a tre corpi ⁴He+ ⁴He +⁴He →¹²C + energia
- Questa, avviene nelle stelle pesanti in cui le densita' sono tali da permettere un processo a tre corpi.
- Gli elementi prodotti sono immessi nel gas interstellare dall'esplosione finale della stella.