

Le reazioni nucleari delle stelle

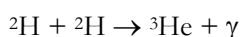
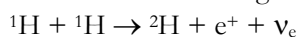
Le stelle possono essere considerate come composte da vari strati. La parte più interna è detta **core**, mentre eventuali gusci intorno ad esso sono chiamati **shell**. Nel core e nelle shell si sviluppano le reazioni di fusione nucleare, come descritto nel Capitolo 3. Gli strati più esterni sono detti in sequenza: **involuppo**, **fotosfera** (la parte visibile), **cromosfera** e **corona**. Nel seguito sono indicate le principali reazioni di fusione nucleare che portano alla nascita di nuovi elementi chimici. In genere un elemento è indicato con un simbolo AZ , dove A è il numero di particelle nel nucleo (nucleoni) e Z il numero di protoni, che viene sostituito dalla sigla dell'elemento chimico. Per esempio Z=1 è H (idrogeno), Z=6 è C (carbonio). Lo stesso elemento può avere un numero diverso di nucleoni, e ogni configurazione diversa si chiama **isotopo**. Per esempio, gli isotopi stabili del carbonio sono C^{12} e C^{13} , mentre C^{14} tende a decadere, diventando N^{14} (azoto 14). Nelle reazioni di fusione nucleare il segno + indica l'insieme delle particelle coinvolte, e la freccia il prodotto della reazione. In genere il prodotto finale deve essere fatto da più nuclei o particelle stabili, che possano viaggiare nello spazio senza trasformarsi in altre particelle o nuclei (**decadimento**).

Fusione nucleare dell'idrogeno

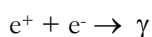
La trasformazione dei protoni dell'idrogeno ionizzato in elio può avvenire tramite la catena protone-protone oppure tramite il ciclo CNO, che predomina a temperature sopra i 20 milioni di gradi. In entrambi i casi quattro protoni (1H) si uniscono per formare un atomo di elio (4He) generando energia sotto forma di raggi gamma (γ), positroni (e^+) e neutrini elettronici (ν_e).

Catena p-p (protone-protone)

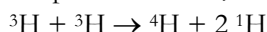
Le reazioni che avvengono nel core delle stelle sono:



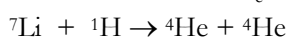
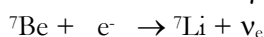
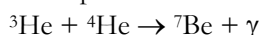
Il positrone (antiparticella dell'elettrone) generato dalle varie reazioni nucleari incontra gli elettroni liberi strappati dall'atomo di idrogeno a causa delle alte temperature e si annichila producendo ulteriore energia:



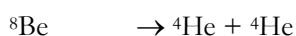
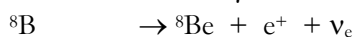
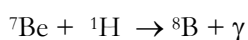
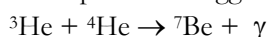
Sulla base delle temperature presenti nel core, possono poi predominare varie reazioni. La più efficiente a temperature solari, 10-14 MK (milioni di gradi Kelvin) è la **pp I**:



A temperature tra 14 e 23 MK è più efficace la **pp II**, detta bruciamento del litio-berillio:

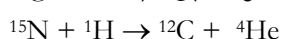
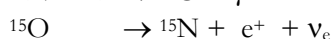
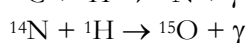
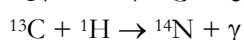
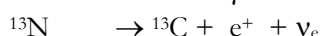
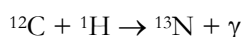


A temperature maggiori di 23 MK predomina la **pp III** detta bruciamento del berillio-boro:

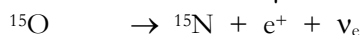
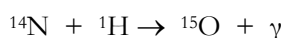
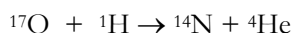
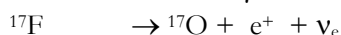
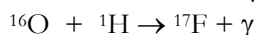
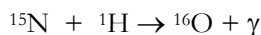


Esistono altri tipi di reazioni della catena p-p, ma sono meno efficienti nel produrre elio dall'idrogeno. Tutte queste reazioni sono attive nelle stelle di varia massa, ma predominano a temperature diverse.

Ciclo CNO



Questo schema è un ciclo perché il nucleo iniziale di carbonio si ritrova alla fine del processo. Insieme al carbonio, azoto ed ossigeno fanno da catalizzatori della produzione di elio. Anche per questa reazione esiste una variante, che parte da ${}^{15}N$ e produce azoto ed elio ma anche ossigeno.

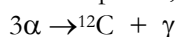


Alla fine, il core della stella, ricco di idrogeno, si trasforma in elio e, se sono presenti già elementi “catalizzatori” come carbonio e azoto, anche di altri isotopi di elementi come l’ossigeno. Quattro su sei elementi delle molecole biologiche (PONCHS) vengono create in questi processi nel core delle stelle.

La fusione dell’elio

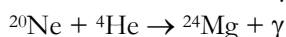
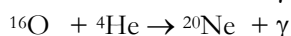
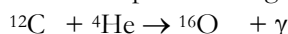
A temperature superiori a 100 MK, tre nuclei di elio possono unirsi a formare carbonio. La reazione $^4\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^8\text{Be}$ ostacola questa fusione, perché decade nel suo inverso in $2,6 \cdot 10^{-16}$ secondi riformando elio. Entro questo tempo brevissimo, un terzo nucleo di elio deve collidere secondo la reazione $^8\text{Be} + ^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} + \gamma$.

In altre parole, la reazione può essere scritta come:

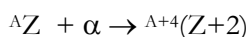


e prende il nome di reazione triplo alfa perché i nuclei di ^4He sono detti anche particelle alfa (α).

Può accadere che il carbonio prodotto interagisca con l’elio producendo altre reazioni, che sono però piuttosto rare e non producono globalmente molta energia:



Possono naturalmente avvenire altre ‘catture’ di particelle alfa, che in genere producono atomi con numero atomico Z aumentato di 2 unità e peso atomico A aumentato di 4 unità:

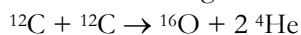
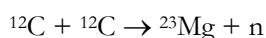
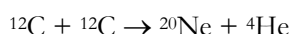
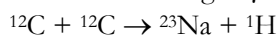
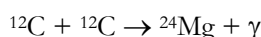


Le tre reazioni scritte sopra ne sono un esempio.

Processi di fusione oltre l’elio

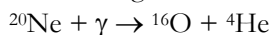
Una volta prodotto carbonio, a temperature più alte di 500 MK, possono prodursi le seguenti reazioni, che portano ad isotopi stabili. In generale, la regola è che si possono verificare tutte le reazioni il cui risultato produca isotopi stabili. Queste reazioni ne sono un esempio.:

Bruciamento del Carbonio

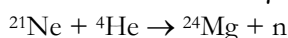
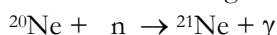


Bruciamento del Neon

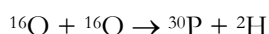
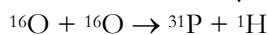
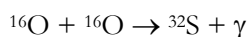
A temperature maggiori di 1 GK l’energia dei fotoni è in grado di distruggere alcuni nuclei, con i processi di fotodisintegrazione.

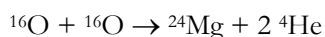
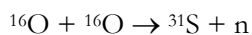
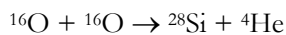


Altre reazioni che coinvolgono il neon 20 sono la cattura di particelle α e di neutroni.



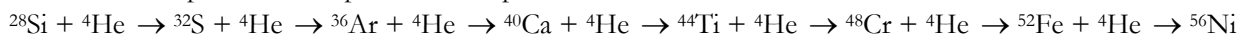
Bruciamento dell’Ossigeno



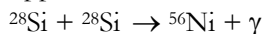


Bruciamento del Silicio

Anche il Silicio può bruciare, per cattura di particelle α :



oppure attraverso una reazione diretta:



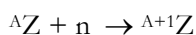
a cui segue un decadimento con l'emissione di positroni



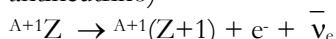
Il ^{56}Fe è il nucleo con la minore massa per nucleone, ovvero la maggiore energia di legame. Il successivo processo di cattura $^{56}\text{Fe} + ^4\text{He} \rightarrow ^{60}\text{Zn}$ assorbe energia perché lo zinco ha una massa per nucleone maggiore del ferro. Così la fusione nucleare si arresta istantaneamente perché il processo non è più in grado di produrre l'energia necessaria per dare energia cinetica alle particelle e generare successive collisioni e assorbe l'energia creata dalla contrazione del core.

Cattura di neutroni

La nascita di elementi più pesanti del ferro è legata ai processi di **cattura di neutroni**:

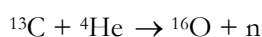
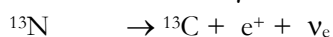
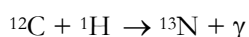


a cui segue il decadimento β (cioè l'emissione di un elettrone, detto particella beta, e di una particella detta antineutrino)



Come descritto nel testo, esistono due processi di cattura neutronica: rapida (processo-r) e lenta (processo-s).

Un tipico processo s si verifica negli strati che bruciano elio e producono carbonio quando per moti convettivi vengono in contatto con strati ricchi di idrogeno (protoni liberi). I neutroni vengono prodotti attraverso queste reazioni:



oppure

