

GAETANO VALENTINI

PRODUZIONE D'ENERGIA NELL'UNIVERSO: LE REAZIONI NUCLEARI STELLARI

La produzione d'energia all'interno delle stelle è uno degli argomenti di maggiore interesse nel campo dell'astrofisica moderna. Infatti, per poter spiegare molti dei fenomeni celesti, le fasi più importanti dell'evoluzione stellare, la presenza di determinati elementi chimici nella materia interstellare e nei sistemi planetari e lo sviluppo della vita sulla Terra, è necessario conoscere in modo approfondito le caratteristiche fisiche della produzione d'energia all'interno delle stelle.

Una stella nasce dalla contrazione di una nube di gas interstellare, nella quale l'energia gravitazionale ha prevalso sull'energia termica delle particelle. Questa contrazione andrà avanti finché non si raggiunge una condizione d'equilibrio, descritta dal cosiddetto teorema del viriale:

$$2T + \Omega = 0$$

In altre parole, per sostenere la simmetria sferica delle stelle è necessario che le forze radiali di pressione, che favorirebbero l'espansione, e le forze radiali gravitazionali, che favorirebbero la contrazione, si equivalgano:

$$dP(r)/dr = (-G \cdot M_r(r) \cdot \rho(r) / r^2) dr$$

La ricerca di quest'equilibrio accompagnerà sempre l'evoluzione della stella e sarà definitivamente rotto solo alla presenza di un'eventuale fase finale esplosiva (supernova).

Tornando al teorema del viriale, esso ci indica in maniera esplicita che all'aumentare della gravità deve aumentare la temperatura e di conseguenza la pressione:

$$dT = -d\Omega/2$$

cioè che la metà dell'energia guadagnata durante la contrazione deve andare ad innalzare il contenuto termico della struttura protostellare.

Nella nube di gas interstellare s'innalza progressivamente la temperatura, favorendo effetti di ionizzazione, e l'energia gravitazionale rilasciata viene trasferita al gas aumentando sia la temperatura che la pressione.

Queste ultime sono innalzate fino a far divenire efficienti le reazioni di bruciamento nel nucleo della stella, con la relativa emissione d'energia nella struttura che viene trasportata in qualche modo verso l'esterno (trasporto radiativo o convettivo): nasce così una stella.

La quantità direttamente osservabile di una stella è la sua luminosità, che è collegata alla quantità di energia prodotta per grammo di materia per secondo ϵ , secondo la relazione:

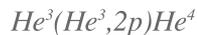
$$dL_r/dr = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot \epsilon$$

Le prime reazioni nucleari che si sviluppano sono quelle della trasformazione dell'idrogeno in elio, secondo due tipologie di bruciamento: la cosiddetta catena protone-protone PP ed il ciclo del carbonio CNO.

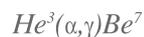
Nella catena protone-protone dalla prima interazione fra due protoni si forma un nucleo di deuterio, ed in aggiunta si liberano un positrone (che interagendo con un elettrone libera un raggio gamma) ed un neutrino. La successiva interazione del deuterio con un terzo protone produce un nucleo d'elio He^3 :



A questo punto la catena PP presenta tre varie possibilità. Nella prima, chiamata PPI, il processo procede con l'interazione con un altro nucleo d'elio He^3 , formatosi in una reazione analoga alla precedente, formando un nucleo di He^4 , e liberando due protoni:



In alternativa l' He^3 può interagire con un nucleo d'elio (la cosiddetta particella α) già presente, formando berillio Be^7 ,



Nella seconda catena, PPII, il nucleo di berillio cattura un elettrone producendo litio con emissione

di un neutrino; il litio combinandosi con un protone, forma due nuclei d'elio:



Nella terza catena, PPIII, il berillio interagisce invece con un protone formando boro B^8 , che è fortemente instabile e decade in berillio Be^8 liberando un positrone e un neutrino. Il berillio, instabile a sua volta, decade in due particelle:



La probabilità che sia attiva maggiormente una catena invece che l'altra è legata all'andamento della temperatura nel nucleo della stella. Per temperature comprese tra 1 e 14 milioni di gradi prevale la catena PPI, tra i 14 e i 23 milioni comincia a prevalere la PPII, mentre per temperature maggiori di 23 milioni è molto attiva la PPIII. Nel Sole, ad esempio, la temperatura del nucleo è di circa 16 milioni di gradi, di conseguenza le catene attive sono principalmente le prime due.

Ogni suddetta interazione libera un certo quantitativo d'energia: la catena PPI libera in totale 26,2 Mev ($4,2 \cdot 10^{-5}$ erg), la PPII ne produce 25,67 Mev ($4,1 \cdot 10^{-5}$ erg), mentre è di 19,27 Mev ($3,1 \cdot 10^{-5}$ erg) per la PPIII.

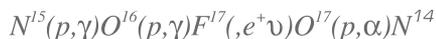
Descritta la catena protone-protone, consideriamo ora la seconda reazione di bruciamento dell'idrogeno: il cosiddetto ciclo del carbonio CNO.

Anche questo ciclo presenta in realtà due possibili tipologie di bruciamento. Il primo ciclo, chiamato principale, parte da un nucleo di carbonio C^{13} che, interagendo con protone, forma un nucleo di azoto

N^{13} con emissione di un raggio gamma.
L'azoto decade in C^{13} , liberando un positrone e un neutrino. Il C^{13} reagisce con un secondo protone producendo azoto N^{14} e un raggio gamma.
Il nucleo d'azoto combinandosi con un nuovo protone forma ossigeno O^{15} , che decade in azoto N^{15} con emissione di positrone e di un neutrino. L' N^{15} cattura un quarto protone per ricreare carbonio C^{12} e un nucleo d'elio He^4 :



Alternativamente, anche se a probabilità molto bassa (4 volte su 10^4), l'azoto N^{15} , catturando sempre un protone, può invece produrre ossigeno O^{16} .
L'ossigeno può interagire con un protone ottenendo fluoro F^{17} e un raggio gamma. Il fluoro decade in O^{17} emettendo un positrone ed un neutrino.
Infine l'ossigeno interagendo con un ultimo protone produce una particella α ed un atomo di azoto N^{14} .

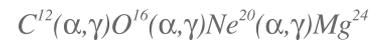


L'energia prodotta in entrambi i cicli è sostanzialmente identica ed è pari a circa 25 Mev ($4,0 \cdot 10^{-5}$ erg).
Dopo che tutto l'idrogeno presente inizialmente nel nucleo della stella è stato convertito in elio, le regioni centrali della stella cominciano a contrarsi, aumentando nuovamente temperatura e pressione del gas, fino a quando si attiva l'innesco del secondo combustibile: l'elio.

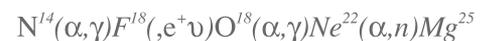
Il processo di bruciamento dell'elio è il cosiddetto 3α , tramite il quale viene prodotto principalmente carbonio, passando attraverso la creazione del berillio:



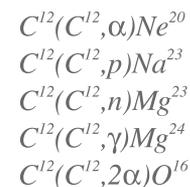
La produzione del berillio ha la particolarità di essere un processo endotermico (necessita di circa 0.1 Mev) ed inoltre il berillio, essendo un nucleo instabile, decade velocemente in due nuclei d'elio: la probabilità di avere questa reazione è molto bassa. L'energia prodotta da quest'intera reazione è di 7,3 Mev ($1,17 \cdot 10^{-5}$ erg).
Alle temperature di bruciamento della 3α sono possibili ulteriori catture di particelle α che producono ossigeno e, con trascurabile probabilità, quelle che producono nuclei di neon e magnesio:



Al termine della combustione dell'elio ci si aspetta nei nuclei stellari una mistura di elementi chimici composta principalmente di carbonio e ossigeno, con qualche traccia di neon. Anche se meno rilevanti, c'è da porre l'accento sulla presenza d'altre reazioni dovute alla cattura di nuclei α da parte dell'azoto N^{14} (prodotto nel ciclo CNO del bruciamento dell'idrogeno):



Esaurito l'elio, la minor produzione d'energia nucleare non riesce a sostenere più l'equilibrio della struttura stellare interna ed il nucleo si contrae nuovamente. Arrivando a temperature centrali di $7 \cdot 10^8$ K si attiva la combustione del carbonio che produce neon e sodio ed, a più bassa probabilità, magnesio e ossigeno:

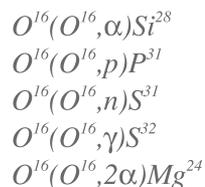


con emissione di nuove particelle α , protoni e neutroni. Siccome le temperature in gioco sono molto più elevate di quelle tipiche della combustione dell'idrogeno e dell'elio, i protoni e le particelle α appena prodotti reagiscono immediatamente con gli altri nuclei circostanti:



L'energia totale prodotta dalle reazioni di bruciamento del carbonio è di 7,16 Mev.

All'aumentare della temperatura fino a circa $2 \cdot 10^9$ K, si attiva anche la fusione fra due atomi di ossigeno che produce nuclei di silicio, fosforo, zolfo e magnesio:



i cui prodotti danno poi origine a tutta una serie di reazioni successive che possono giungere fino alla produzione di nuclei di titanio Ti^{46} .

L'energia prodotta dal bruciamento dei nuclei di ossigeno è di circa 7 Mev.

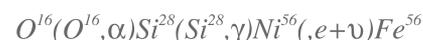
A temperature di 10^9 K iniziano a dominare i processi di fotodisintegrazione (vale a dire della disintegrazione dei nuclei da parte dei fotoni termici). Uno dei nuclei che vengono maggiormente fotodisintegrati è quello del neon Ne^{20} , da cui si ottiene nuovamente ossigeno:



producendo energia pari a 5,63 Mev

Le particelle prodotte sono immediatamente catturate e queste successive reazioni andranno a formare nuclei d'elementi chimici fino a quello del ferro Fe^{56} , ponendo termine ad altre possibili reazioni giacché si raggiunge con il ferro il massimo dell'energia di legame per nucleone.

Una possibile reazione per la produzione del ferro parte dal bruciamento dell'ossigeno O^{16} , che produce silicio Si^{28} , che a sua volta forma un nucleo instabile di nichel Ni^{56} che decade subito in Fe^{56} :



La particolarità di quest'ultimo decadimento è che si assiste ad una forte emissione d'energia via neutroni.

Anche il ferro prodotto nel nucleo stellare sarà affetto da fotodisintegrazione:



Questa darà inizio al collasso dell'intera struttura, fino all'esplosione della stella: si ha così una supernova, uno degli eventi più affascinanti ed "energetici" di tutto l'universo. Nell'intera fase esplosiva viene, infatti, rilasciata una quantità d'energia pari a quella prodotta da tutte le stelle all'interno di una tipica galassia (10^{48} erg): ma questo è un altro argomento.