

Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Astronomia

**PRINCIPALI REAZIONI  
TERMONUCLEARI NELLE STELLE**

Tesi di Laurea

Presentata da:  
Alfonso Pisapia

Relatore:  
Chiar.mo Prof.  
Daniele Dallacasa

Sessione II  
AA 2020-2021

# Indice

<b>1</b>	<b>Struttura Stellare</b>	<b>1</b>
1.1	Tempi Scala . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Fusione Nucleare</b>	<b>3</b>
2.1	Energia di Legame . . . . .	4
2.2	Fusione e Fissione Nucleare . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Interazioni Fondamentali</b>	<b>7</b>
3.1	Decadimento $\beta^+$ e $\beta^-$ . . . . .	8
3.2	Cattura elettronica e protonica . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Reazioni Termonucleari</b>	<b>10</b>
4.1	Catena protone-protone . . . . .	10
4.1.1	Catena PPI . . . . .	11
4.1.2	Catena PPII . . . . .	11
4.1.3	Catena PPIII . . . . .	12
4.2	Ciclo CNO . . . . .	13
4.3	Processo $3\alpha$ . . . . .	13
4.3.1	Confronto energetico . . . . .	14
4.4	Reazioni successive . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Neutrini</b>	<b>16</b>
5.1	Neutrini Solari . . . . .	17

## Sommario

Questo elaborato intende fornire una panoramica delle principali reazioni termonucleari che avvengono negli interni stellari. Nel primo capitolo viene messo in evidenza il ruolo cruciale di queste nella produzione di energia e nel meccanismo che regola la stabilità idrostatica delle stelle, studiate come sistemi autogravitanti, di cui si ricostruisce brevemente il ciclo evolutivo. Nel secondo e terzo capitolo sono descritti i principi fisici per i quali le reazioni termonucleari producono energia e i vari processi nucleari e subnucleari che le regolano, governati essi stessi dalle interazioni fondamentali della natura. Nel quarto capitolo vengono poi messi a confronto nel dettaglio i vari processi di combustione che si alternano nelle diverse fasi evolutive delle stelle. Per concludere, l'ultimo capitolo offre uno sguardo rapido sull'incidenza dei neutrini nel bilancio energetico delle strutture stellari, e sulla loro rilevanza nello studio delle stesse.

# Capitolo 1

## Struttura Stellare

Una stella è un oggetto celeste a simmetria sferica, composto da materia allo stato di plasma che si trova nella condizione di *equilibrio idrostatico*: la forza gravitazionale, generata dalla sua stessa massa, tende a comprimere la struttura verso il suo centro mentre viene bilanciata dalle forze di pressione interne che agiscono verso l'esterno; ciò rende la stella un corpo *autogravitante*. Tuttavia si parla di struttura in quasi-equilibrio, perché nel corso di determinate fasi della sua evoluzione le due forze in contrasto non sono uguali e opposte, ma il tempo che impiegano ad equilibrarsi è molto minore del tempo di permanenza di uno stato stazionario. Infatti l'esistenza delle stelle è dovuta al predominio in natura, su scala macroscopica, dell'*Interazione Gravitazionale*: essa è responsabile della compressione del gas del mezzo interstellare, all'interno del quale, una volta raggiunte temperature dell'ordine di  $10^7 K$ , si innescano le reazioni di combustione dell'idrogeno che danno vita a un oggetto celeste classificabile come stella. La storia evolutiva delle stelle è dunque la progressiva contrazione di una massa di gas iniziale sotto l'influenza del proprio campo gravitazionale, che viene interrotta per tempi più o meno lunghi a seconda del processo che vi si contrappone.

### 1.1 Tempi Scala

La contrazione iniziale della nube protostellare avviene quando la sua massa supera il limite critico della *Massa di Jeans*: è un processo che avviene su *tempi scala dinamici*, molto rapidi, durante i quali la forza gravitazionale non è completamente bilanciata dalla pressione del gas, per cui la struttura autogravitante non è in equilibrio e segue il *Teorema del Viriale* nella forma:

$$2T + \Omega = \frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} \quad (1.1)$$

con  $T$  energia cinetica totale del sistema,  $\Omega$  energia potenziale gravitazionale e  $I$  il momento di inerzia. Al progredire della contrazione la struttura gassosa aumenta la propria densità e temperatura attivando il processo di ionizzazione della materia; ciò conduce a un aumento dell'opacità stellare per mezzo del quale la radiazione rimane intrappolata all'interno della struttura. L'aumento di pressione genera il primo cambio di regime dei tempi di contrazione: si passa ai *tempi scala termodinamici* o di *Kelvin-Helmoltz*, molto più lunghi, durante i quali la contrazione non avviene senza resistenza ma è rallentata dalla pressione interna del gas. L'alta opacità inibendo il trasporto radiativo dell'energia verso l'esterno, genera moti convettivi che rimescolano l'intera struttura rendendola chimicamente omogenea. La struttura raggiunge così la condizione di quasi-equilibrio,  $d^2 I/dt^2 \rightarrow 0$  ed è controllata dal Teorema del Viriale:

$$2T + \Omega = 0 \quad \implies \quad dT = -d\Omega/2 \quad (1.2)$$

per il quale lo stato di equilibrio è conservato se metà dell'energia guadagnata nella contrazione aumenta l'energia cinetica interna, e quindi la temperatura, e l'altra metà viene emessa, cioè persa per irraggiamento. La continua contrazione della stella permette di produrre energia finché si raggiungono le temperature di innesco delle reazioni termonucleari: avviene il passaggio ai *tempi scala termonucleari*, sono i più lunghi e arrivano anche alle decine di miliardi di anni. In questo regime la contrazione viene rallentata ulteriormente perché vi è un contributo aggiuntivo alla pressione interna dovuto alla *pressione di radiazione*, alimentata dalla combustione dei nuclei. Il nuovo meccanismo di produzione energetica supplisce alle perdite dovute alla contrazione. Quando un determinato elemento viene completamente consumato dalla combustione, la produzione di energia termonucleare si arresta causando una diminuzione della pressione interna. Lo stato di equilibrio non è più mantenuto, perciò la stella riprende la contrazione su tempi scala termodinamici finché non raggiunge la temperatura di innesco della reazione nucleare successiva, la quale garantisce un nuovo stato di equilibrio. Dunque la contrazione della struttura stellare è rallentata dalla pressione interna dovuta alla produzione di energia che avviene attraverso due canali:

- la contrazione della struttura viriale con conseguente un aumento della pressione interna del gas (regime termodinamico);
- l'innesco delle reazioni termonucleari che attiva un flusso di energia verso l'esterno e un termine aggiuntivo di pressione di radiazione (regime termonucleare).

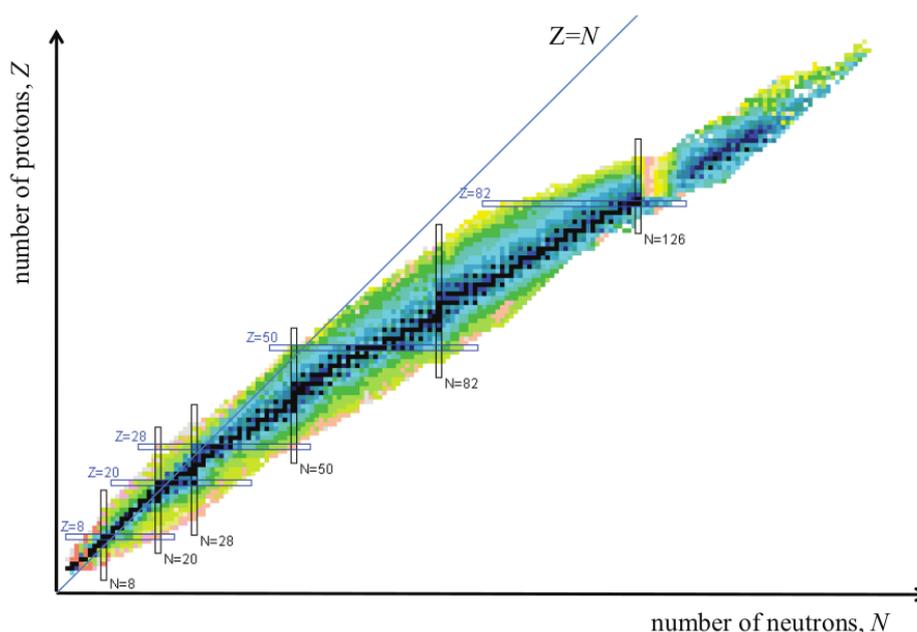
L'evoluzione della stella prosegue con l'alternarsi dei due diversi tempi scala, dovuto ogni volta all'accensione di una nuova reazione termonucleare. A rallentare i tempi scala termodinamici può intervenire il fenomeno della *degenerazione*, che impedendo al gas di contrarsi, ritarda il raggiungimento della temperatura di innesco delle reazioni termonucleari, dilatando così i tempi che intercorrono tra la combustione di un elemento e il successivo. Una sfera di gas degenerare può solo perdere energia, raffreddarsi, mantenendo il raggio costante.

L'ultima reazione è la nucleosintesi del ferro dopo la quale la struttura entra nelle fasi terminali del suo ciclo vitale.

# Capitolo 2

## Fusione Nucleare

La materia che compone le stelle, date le elevate temperature, si trova allo stato di plasma, un miscuglio di nuclei ed elettroni che per la loro elevata agitazione termica sono liberi e non vincolati dall'attrazione coulombiana generata dai protoni dei nuclei. Il processo di fusione nucleare coinvolge proprio la componente nucleare del plasma stellare; ognuno di essi è caratterizzato dal numero di massa  $A = N + Z$  dato dal numero totale dei nucleoni, cioè protoni, identificati dal numero atomico  $Z$  che ne definisce la specie chimica, e neutroni. I nucleoni sono tenuti insieme per mezzo dell'*Interazione Nucleare*, la quale ha un range di interazione dell'ordine dei fermi ( $10^{-13}cm$ ) che corrisponde circa alle dimensioni dei nuclei. Questa forza aggregante è in contrasto con l'*Interazione Elettromagnetica*, di intensità maggiore ( $\alpha_{SI}/\alpha_{EM} \sim 10^2$ )<sup>1</sup> che tende a disgregare il nucleo: la repulsione coulombiana dovuta ai protoni è bilanciata dalla presenza di un numero adatto di neutroni che conferiscono stabilità al nucleo, infatti per  $Z$  piccoli  $N \approx Z$  mentre per  $Z$  più alti sono necessari un maggior numero di neutroni rispetto ai protoni. In particolare non esistono elementi stabili con  $A = 5$  o  $8$ .



**Figura 2.1:** Carta dei nuclidi: i nuclei stabili sono indicati in nero nella parte centrale detta Valle di Stabilità. La vita media è tanto più elevata quanto più un nuclide è indicato con colore scuro. Le barre evidenziano i nuclei con numeri magici.

<sup>1</sup>il rapporto tra la costante di accoppiamento forte ed elettromagnetica misura la differenza di intensità tra i due tipi di interazione.

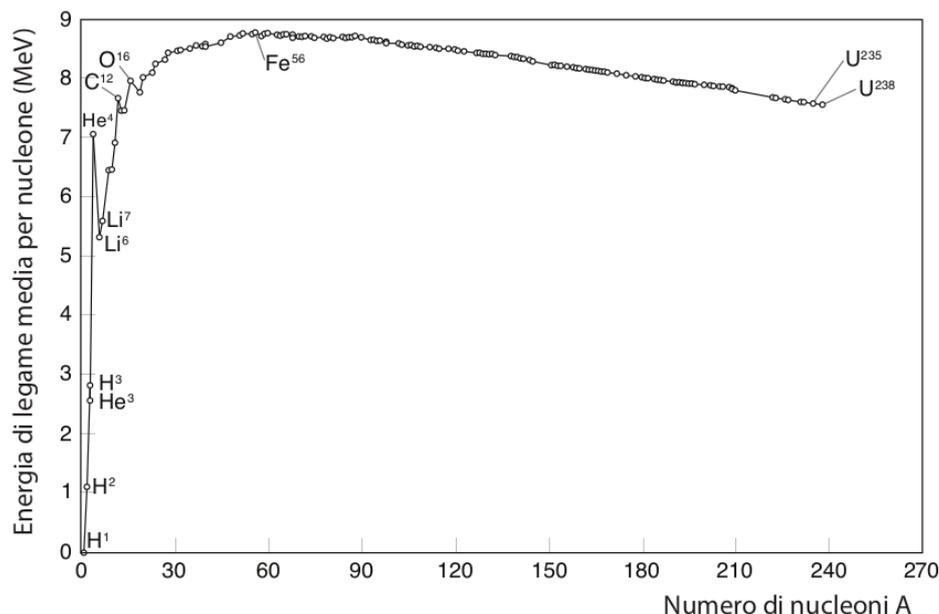
## 2.1 Energia di Legame

Misurando la massa dei nuclei con l'utilizzo di uno spettrometro di massa, si osserva che la somma delle singole masse dei nucleoni costituenti è maggiore della massa totale del nucleo. Questo "difetto di massa" è dovuto al fatto che nella formazione di un nucleo stabile una frazione della massa a riposo dei nucleoni viene trasformata in energia di legame, (*Binding Energy*): essa corrisponde all'energia necessaria da fornire a un nucleo per scinderlo nei suoi singoli costituenti.

$$BE(Z, N) = [Zm_p + Nm_n - m(Z, N)]c^2 \quad (2.1)$$

dove  $m_p = 1.673 \cdot 10^{-24}$ gr e  $m_n = 1.675 \cdot 10^{-24}$ gr.

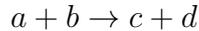
Il grafico sottostante mostra l'andamento dell'energia di legame per nucleone in funzione del numero di massa: la curva presenta una rapida crescita iniziale che culmina nel nucleo di  $He^4$  (chiamato anche particella  $\alpha$  riveste un ruolo fondamentale in vari processi nucleari), l'elemento più stabile tra quelli leggeri; il picco di energia di legame è raggiunto per il  $Fe^{56}$  che è il nucleo più stabile in natura: i nuclei con numero di massa simile hanno massima energia per nucleone perché nel momento in cui si formano, la massima quantità di massa viene trasformata in energia. Oltre il ferro la curva subisce un leggero calo fino ai nuclei più pesanti come  $U^{238}$ : mediamente per i nuclei  $BE/A \sim 8\text{MeV/nucleone}$ .



**Figura 2.2:** *Energia di legame per nucleone misurata dei nuclei stabili in funzione di A. Si notano dei picchi corrispondenti a nuclei particolarmente legati. La curva presenta un massimo per  $A \sim 60$*

## 2.2 Fusione e Fissione Nucleare

Gli elementi fino al ferro sono prodotti tramite reazioni di *fusione nucleare* cioè il processo per cui due nuclei leggeri si fondono originando nuclei più pesanti. Si tratta di processi di tipo *esoenergetico* in quanto il  $Q$  valore della reazione è positivo. Esso è definito per una generica reazione



dalla conservazione dell'energia e rappresenta l'ammontare di energia rilasciata o assorbita durante il processo:

$$m_a c^2 + K_a + m_b c^2 + K_b = m_c c^2 + K_c + m_d c^2 + K_d \quad (2.2)$$

$$Q = K_c + K_d - K_a - K_b = (m_a + m_b - m_c - m_d)c^2 \quad (2.3)$$

Quando  $Q > 0$  parte della massa viene trasformata in energia secondo la relazione  $E = mc^2$  perciò il processo è spontaneo. Dal punto di vista classico la fusione richiede che i nuclei debbano avere sufficiente energia cinetica per superare la repulsione coulombiana e trovarsi abbastanza vicino affinché l'interazione nucleare ne permetta la fusione. L'energia di attivazione  $E_a$  della fusione nucleare corrisponde a

$$E_a \geq \frac{Z^2 e^2}{R} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_0 (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})} \quad (2.4)$$

che si ha quando la distanza  $R$  tra i nuclei reagenti è minore della somma dei loro raggi nucleari dati dal prodotto  $R_0 A^{1/3}$  con  $R_0 = 1.2 \text{ fm} = 1.2 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$ . La reazione che richiede la minore energia (potenziale) di attivazione è quella tra due protoni per la quale  $Z_1 = Z_2 = A_1 = A_2 = 1$  e si ha:

$$E_a = \frac{e^2}{R_0} \sim 1.4 \text{ MeV} \quad (2.5)$$

raggiungibile per temperature di circa  $10^9 \text{ K}$ . Nei nuclei stellari la temperature arrivano a  $10^7 \text{ K}$  che corrispondono a un energia termica media delle particelle

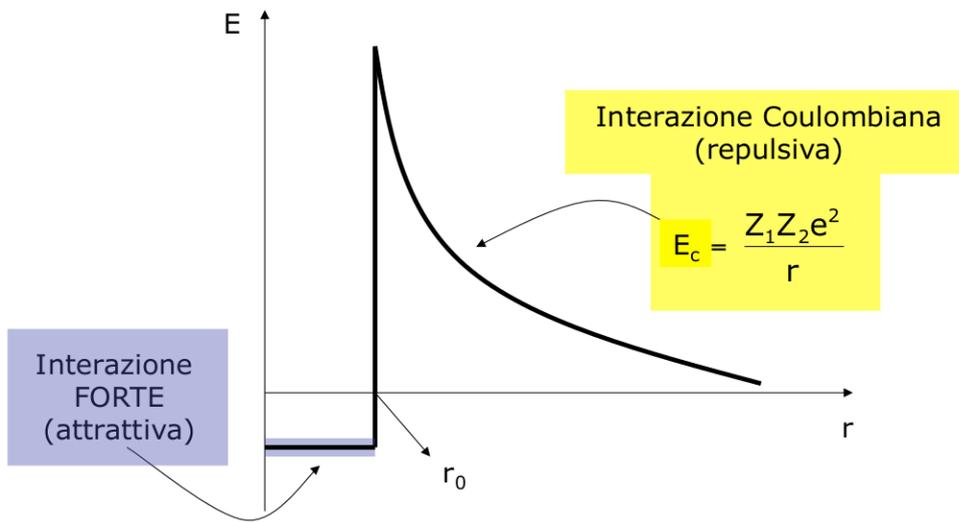
$$E_t = \frac{3}{2} kT \sim 1 \text{ keV} \quad (2.6)$$

cioè tre ordini di grandezza in meno di quanto necessario: dunque classicamente la fusione nucleare non è realizzabile neanche nel caso più semplice e superare la barriera coulombiana risulta improbabile anche per quelle particelle che si trovano nella coda della *Maxwelliana*.<sup>2</sup>

Dal punto di vista quantistico invece, una qualsiasi particella descritta da una funzione d'onda, che possiede una certa energia, ha una probabilità non nulla di attraversare una barriera di potenziale di energia superiore: questo fenomeno è noto come *Effetto Tunnel di Gamow* permette la fusione dei nuclei anche negli interni stellari dove classicamente le condizioni di temperatura ed energia non lo consentirebbero.

---

<sup>2</sup>la Distribuzione di Maxwell-Boltzmann è una distribuzione di velocità che descrive un qualsiasi gas perfetto e dipende esclusivamente dalla temperatura



**Figura 2.3:** Una particella riesce a superare una barriera di potenziale di energia maggiore grazie all'effetto tunnel.

L'energia liberata nella fusione si trasforma in energia cinetica dei nuclei e, se esiste un campo di forze che tiene i nuclei confinati, aumenta la temperatura di modo che si può raggiungere una situazione di equilibrio in cui la reazione di fusione è capace di autoalimentarsi e quindi produrre energia. Situazioni di confinamento sono presenti nel *core* delle stelle: date le elevate temperature il processo avviene spontaneamente, infatti i nuclei hanno un'energia termica tale da poter compiere, con frequenza elevata, urti sufficientemente energetici che risultano efficaci per la produzione di nuovi nuclei. La fusione del ferro non è un processo spontaneo poiché rappresenta l'elemento più stabile dunque non si avrebbe un guadagno di energia; tale reazione sarebbe infatti *endoenergetica* cioè con  $Q$  valore è negativo. La formazione degli elementi più pesanti del ferro avviene mediante altri meccanismi esaminati nel seguito.

Viceversa, tramite reazioni di *fissione nucleare*, è possibile creare spontaneamente elementi più leggeri e guadagnare energia: bombardando con neutroni un nucleo pesante come l'uranio, questo può spaccarsi in sottoprodotti stabili. Da ciò si deduce che la fissione di nuclei leggeri non è un processo spontaneo perché non si ha un guadagno energetico.

# Capitolo 3

## Interazioni Fondamentali

Nelle reazioni termonucleari intervengono tre diverse interazioni:

- **Elettromagnetica:** avviene mediante lo scambio di fotoni privi di massa e si oppone alla fusione dei nuclei.
- **Forte:** favorisce la fusione dei nuclei. L'interazione tra i nuclei è in realtà un'"interazione residua" poiché le particelle che effettivamente interagiscono non sono i nucleoni. Tramite esperimenti di diffusione inelastica profonda (*Deep Inelastic Scattering*) ad alte energie tra leptone-nucleone è stato verificato che il protone e il neutrone non sono le reali particelle elementari che compongono la materia nelle sue fondamenta, ma hanno una struttura interna complessa: sono composti da *quark di valenza*, oggetti estremamente piccoli di spin semintero e carica frazionaria, *quark del mare*, cioè coppie quark-antiquark, e *gluoni*, di spin intero ed elettricamente neutri. Sono i bosoni vettoriali, non massivi, mediatori dell'interazione forte, percepita dalle sole particelle dotate di *carica di colore*. In particolare:

$$\begin{array}{ll} \text{protone : } uud & \text{massa a riposo} = 938,27 \text{ Mev}/c^2 \\ \text{neutrone : } udd & \text{massa a riposo} = 939,56 \text{ Mev}/c^2 \end{array}$$

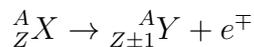
la diversa composizione di quark determina la lieve differenza tra le masse.

- **Debole:** agisce tra leptoni e quark, che possiedono una *carica debole*, attraverso lo scambio dei bosoni vettoriali  $W^\pm$  e  $Z^0$ , molto massivi, responsabili rispettivamente delle interazioni a corrente carica e a corrente neutra. È la sola interazione percepita dai *neutrini*, i quali non possiedono carica elettrica e di colore, e hanno massa talmente piccola che la gravità è trascurabile. Regola i decadimenti radioattivi dei nuclei infatti permette che i quark cambino sapore e perciò che un neutrone si trasformi in un protone o viceversa. È chiamata "debole" perché ha un'intensità nettamente inferiore alle altre:  $\alpha_{WI}/\alpha_{EM} \sim 10^{-4}$ . Per elevati impulsi del bosone scambiato l'interazione debole è unificata a quella elettromagnetica in un'unica interazione detta *Interazione Elettrodebole*.

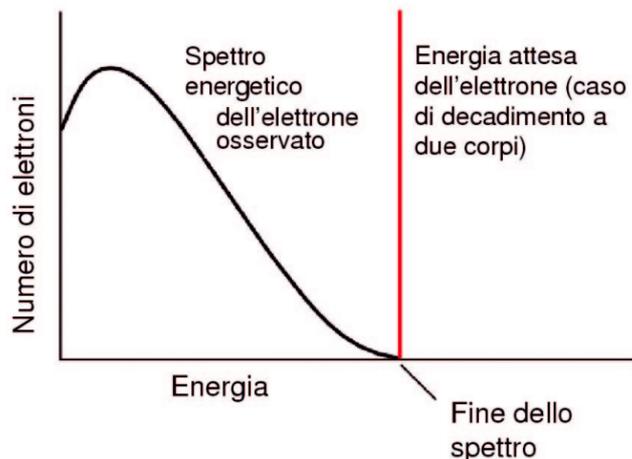
Le tre interazioni fondamentali regolano i seguenti processi che sono alla base delle reazioni termonucleari nelle stelle.

### 3.1 Decadimento $\beta^+$ e $\beta^-$

Il *decadimento  $\beta$*  prevede che un nucleo padre si trasformi in un nucleo figlio di diversa specie cioè con numero di massa uguale ma diverso numero atomico, dovuto all'aumento o alla diminuzione del numero di protoni, a seconda che esso sia accompagnato dall'emissione di una radiazione osservata, chiamata "beta", positiva o negativa: essa è costituita da elettroni o positroni.



Per un gran numero di decadimenti si osserva una distribuzione di energia continua di  $e^\pm$  che va da zero sino al valore  $E_{max} = (m_X - m_Y)c^2$ . Tale valore supponendo il decadimento a due corpi consentirebbe la conservazione dell'energia che invece è violata per la presenza dello spettro continuo.



**Figura 3.1:** Confronto tra energia dell'elettrone attesa e quella osservata.

Negli anni '30 il fisico **Wolfgang Pauli** dimostrò la conservazione dell'energia (e del momento angolare) nel processo ammettendo l'emissione di un'ulteriore particella neutra, non osservata, dotata di un'energia pari a quella mancante per la conservazione. Si tratta dunque di un decadimento a tre corpi:

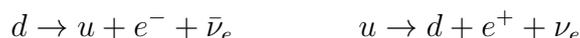


in cui  $\nu_e$  è una nuova particella, chiamata *neutrino* dall'italiano **Enrico Fermi**, la quale è difficilmente rilevabile poiché possiede una sezione d'urto molto piccola e quindi una probabilità di interagire con la materia molto bassa; verrà rilevata soltanto negli anni '50 grazie a esperimenti condotti da Cowan e Reines.

Il decadimento  $\beta$  corrisponde al decadimento, all'interno del nucleo, di un neutrone o un protone:

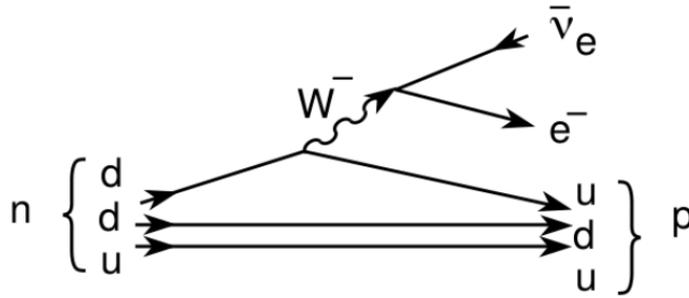


spiegato a livello più elementare con il cambiamento del sapore di un quark up o down via interazione debole<sup>1</sup>. I restanti quark non coinvolti vengono detti "spettatori"



Il decadimento  $\beta^-$  è una reazione esoenergetica, produce energia perché la massa del neutrone è maggiore di quella del protone, ed essendo spontanea può avvenire anche all'esterno del nucleo; il decadimento del neutrone è osservato e si misura una vita media di 15 minuti.

<sup>1</sup>nei processi deboli è conservata la carica e il numero leptonico ma non il sapore

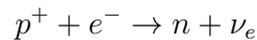


**Figura 3.2:** Il decadimento del neutrone è un processo di interazione debole a corrente carica; la carica è sempre conservata.

Il decadimento  $\beta^+$  invece è una reazione endoenergetica perché consuma energia, perciò può avvenire solo all'interno del nucleo; il protone isolato è stabile, con vita media molto maggiore dell'età dell'universo.

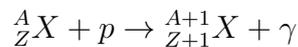
## 3.2 Cattura elettronica e protonica

La *cattura elettronica* (decadimento  $\beta^-$  inverso) da parte di un nucleo consente a un protone di trasformarsi in un neutrone emettendo un neutrino:



Questa reazione ha un ruolo chiave nei processi di produzione di energia e nella fase di evoluzione finale di stelle molto massicce. Le stelle con massa superiore alle  $8M_\odot$  dispongono di condizioni adatte a compiere tutte le reazioni di combustione fino a quella del silicio, che arricchisce il nucleo di ferro; a questo punto, terminate le reazioni, la struttura rimane in equilibrio solo grazie alla pressione esercitata dagli elettroni degeneri. Il core di ferro è destinato a collassare su tempi scala dinamici e a dare origine a una supernova di tipo II (*SNII*): infatti il *processo Urca*, cioè la cattura elettronica, rimuove sempre più elettroni dalla stella, che non garantiscono più quella pressione necessaria a mantenere l'equilibrio. Tale processo si autoalimenta perché la continua produzione di neutroni e neutrini favorisce la contrazione della stella, e quindi un maggior numero di interazioni tra protoni ed elettroni.

La *cattura protonica* consiste nell'iniezione di un protone all'interno di un nucleo con formazione di un nuovo elemento e liberazione di energia:



È alla base di una serie di reazioni di *presequenza* che avvengono nella nube protostellare raggiunti i  $10^6 K$ : preparano il nucleo all'attivazione delle reazioni di combustione dell'idrogeno, arricchendolo degli elementi necessari e liberando energia che va ad aumentare la temperatura.

# Capitolo 4

## Reazioni Termonucleari

Le *reazioni termonucleari* rivestono un ruolo fondamentale nell'evoluzione delle stelle, perché oltre a costituire il principale meccanismo di produzione di energia, atto a governare l'equilibrio idrostatico della struttura, determinano la variazione della composizione chimica della materia stellare; infatti l'attivazione di una reazione comporta il consumo di un dato elemento e la produzione di un altro. La composizione chimica è descritta dalle lettere X,Y,Z che indicano rispettivamente l'abbondanza frazionaria di massa di idrogeno, elio, e degli elementi più pesanti identificati come "metalli". Questi termini sono presenti nelle sette equazioni che descrivono gli interni stellari, perciò ogni proprietà fisica che caratterizza la stella è rappresentata da una variabile strettamente correlata alla composizione chimica e risulta quindi sensibile alle sue variazioni, che ne determinano l'evoluzione complessiva. I parametri che descrivono la composizione attuale del Sole sono:

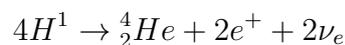
$$X = 0.70 \quad Y = 0.28 \quad Z = 0.02$$

essendo una stella di *Sequenza Principale* sta bruciando idrogeno per cui la sua abbondanza è destinata a decrescere a favore di quella dell'elio. Quando si innescherà la combustione dell'elio, il Sole uscirà dalla MS ed entrerà nel *Braccio Orizzontale*.

Le reazioni termonucleari sono responsabili della sintesi della maggior parte degli elementi esistenti nell'Universo. L'esplosione del Big Bang ha portato alla formazione degli elementi più semplici in natura, l'idrogeno per il 76% e l'elio per il 24%: processo di *Nucleosintesi Primordiale*; nel nucleo delle stelle è avvenuta la *Nucleosintesi Stellare*, grazie alla quale sono stati prodotti gli elementi fino al ferro. Gli elementi più pesanti sono stati prodotti nella *Nucleosintesi Esplosiva*, durante le fasi evolutive finali delle stelle più massicce.

### 4.1 Catena protone-protone

La catena *protone-protone* rappresenta il processo di combustione dell'idrogeno più semplice da realizzare perché richiede un ambiente ricco di protoni liberi, facilmente ottenuti dalla ionizzazione degli atomi di idrogeno ed elio che avviene già a temperature dell'ordine di  $10^4 K$ , e il superamento di barriere coulombiane non troppo elevate. Al netto la reazione consiste in:



che comporta un rilascio di energia del valore di  $Q = 24.7 \text{ Mev}$ . A questo va aggiunto il contributo di energia proveniente dall'annichilazione dei positroni con gli elettroni del plasma stellare:

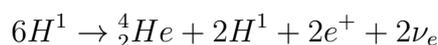


con emissione di due fotoni gamma di energia  $0.511 \text{ Mev}/c^2$ <sup>1</sup>. Va inoltre sottratto il contributo di energia trasportato dai neutrini prodotti nei decadimenti  $\beta^+$ : essi, avendo una sezione d'urto molto piccola, hanno bassissima probabilità di interagire con la materia, perciò dal punto in cui vengono generati viaggiano indisturbati verso l'esterno della stella sottraendo quantità di energia di pochi  $\text{MeV}$ . Il bilancio energetico finale del ciclo è di circa  $26 \text{ MeV}$ .

La catena pp segue tre diverse varianti la cui attivazione dipende dalle abbondanze chimiche dell'ambiente e dalle varie sezioni d'urto dei processi nucleari coinvolti.

### 4.1.1 Catena PPI

La prima variante prevede la fusione di due protoni uno dei quali decade per  $\beta^+$  producendo un neutrone: il risultato è un nucleo di deuterio, un positrone e un antineutrino elettronico. Tale processo, avviene in circa  $10^9$  anni perché ha una sezione d'urto estremamente piccola  $\sigma \sim 10^{-55} \text{ cm}^2$ , ed essendo il più lento, è quello che detta il tempo di tutta la catena: questo è il principale motivo per cui le stelle bruciano idrogeno molto lentamente e vivono a lungo. Il deutone appena formato si fonde rapidamente con un protone via interazione forte, con sezione d'urto molto più grande; la reazione produce un  $\text{He}^3$  il quale, una volta raggiunte abbondanze sufficienti nel core stellare, riesce a fondersi con un altro  $\text{He}^3$  formando un nucleo stabile di  $\text{He}^4$  e due protoni, disponibili per iniziare altri cicli. Riassumendo:



con una produzione di energia  $Q = 26,2 \text{ MeV}$  in cui le perdite causate dai neutrini sono di circa mezzo  $\text{MeV}$ .

Reazione	Energia Q (Mev)	Tempo
$H^1 + H^1 \rightarrow H^2 + e^+ + \nu_e$	+1.44 -0.26	$10^9 \text{ yr}$
$H^2 + H^1 \rightarrow \text{He}^3 + \gamma$	5.49	6sec
$\text{He}^3 + \text{He}^3 \rightarrow \text{He}^4 + 2H^1$	12.85	$10^6 \text{ yr}$

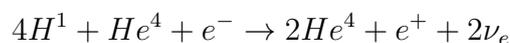
La ppI arricchisce l'environment della reazione con nuclei di  $\text{He}^4$ , già presente per la nucleosintesi cosmologica che consente l'attivazione delle varianti successive.

### 4.1.2 Catena PPII

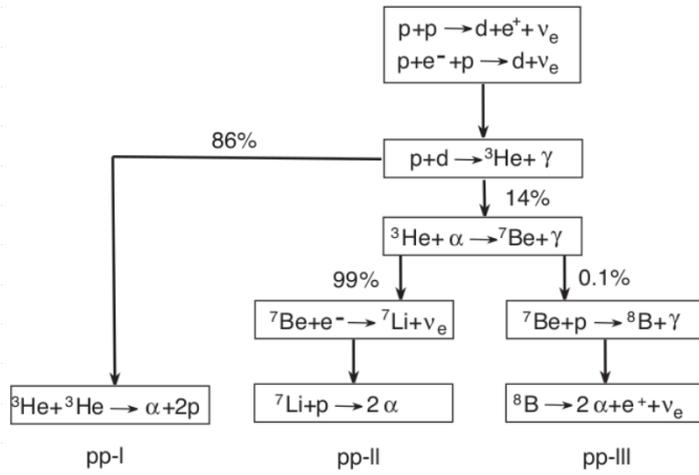
Attorno ai 15 milioni di gradi diventa efficiente la variante ppII, per la quale il nucleo di  $\text{He}^3$  si fonde con  $\text{He}^4$ . Si forma il  $\text{Be}^7$  instabile che, tramite il processo di cattura elettronica, trasformando un protone in un neutrone, origina un nucleo di  $\text{Li}^7$  accompagnato da un neutrino; la reazione tra il litio e un protone forma il  $\text{Be}^8$  che si scinde istantaneamente in due nuclei di  $\text{He}^4$ . Il processo libera in totale  $25,7 \text{ MeV}$  di energia.

Reazione	Energia Q (Mev)	Tempo
$H^1 + H^1 \rightarrow H^2 + e^+ + \nu_e$	+1.44 -0.26	$10^9 \text{ yr}$
$H^2 + H^1 \rightarrow \text{He}^3 + \gamma$	5.49	6sec
$\text{He}^3 + \text{He}^4 \rightarrow \text{Be}^7 + \gamma$	1.59	$10^6 \text{ yr}$
$\text{Be}^7 + e^- \rightarrow \text{Li}^7 + \nu_e$	+0.86 -0.80	0.4yr
$\text{Li}^7 + H^1 \rightarrow \text{Be}^8 + 2\text{He}^4 + \gamma$	17.35	6min

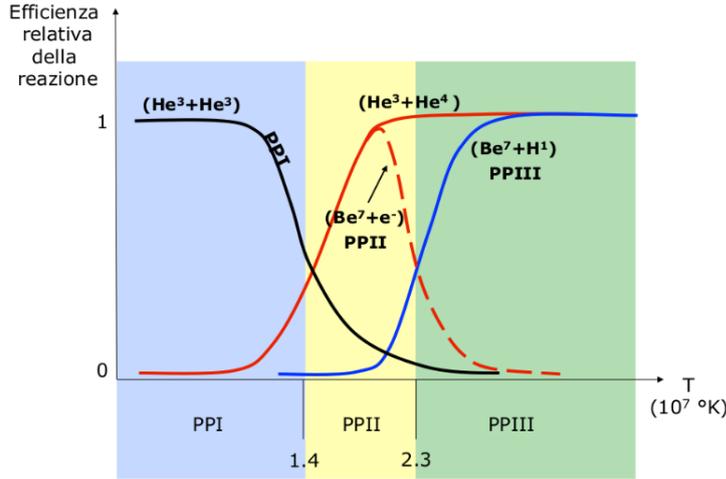
Dunque:



<sup>1</sup>nei processi di annichilazione entrambe le masse coinvolte vengono totalmente convertite in energia.



**Figura 4.1:** Probabilità di attivazione delle varianti.



**Figura 4.2:** Confronto dell'efficienza delle varianti.

### 4.1.3 Catena PPIII

La terza variante prevede la cattura di un protone da parte del  $Be^7$  con formazione del  $B^8$ ; questo decade in  $Be^8$  che si scinde in due nuclei di  $He^4$ ; per temperature superiori a 20 milioni di gradi la sua efficienza supera quella delle varianti precedenti. Fra le tre è quella che perde la maggiore quantità di energia a causa dei neutrini, produce infatti  $19,3 MeV$ ; inoltre è la meno probabile poiché la sezione d'urto dell'interazione tra il berillio e l'elettrone è molto inferiore rispetto a quella con il protone.

Reazione	Energia Q (Mev)	Tempo
$H^1 + H^1 \rightarrow H^2 + e^+ + \nu_e$	+1.44 -0.26	$10^9 yr$
$H^2 + H^1 \rightarrow He^3 + \gamma$	5.49	6sec
$He^3 + He^4 \rightarrow Be^7 + \gamma$	1.59	$10^6 yr$
$Be^7 + H^1 \rightarrow B^8 + \gamma$	0.135	66yr
$B^8 \rightarrow Be^8 + e^+ + \nu_e$	18.07	
$Be^8 \rightarrow 2He^4 + \gamma$	-7,5	1sec

In sintesi:



Nella **Figura 4.1** e **Figura 4.2** sono mostrate la diverse probabilità con cui si attivano le varianti e la variazione della loro efficienza relativa in funzione della temperatura. La ppII e la ppIII hanno minore probabilità di instaurarsi, ma per temperature maggiori risultano più efficienti della ppI.

## 4.2 Ciclo CNO

Il secondo canale di combustione dell'idrogeno è il *ciclo CNO* che si innesca alla temperatura di  $10^7 K$  se sono già presenti in quantità sufficienti i nuclei pesanti di calcio, azoto e ossigeno. Nella reazione fungono da catalizzatori, cioè vengono consumati allo scopo di trasformare quattro protoni in un nucleo di elio positroni e neutrini: l'energia totale prodotta è pari a  $25 MeV$ . Il ciclo è caratterizzato da un *ramo veloce* e un *ramo lento*. Il primo porta alla formazione e all'accumulo dell'  $N^{14}$  tramite catture protoniche e decadimenti  $\beta^+$  compiuti da carbonio e azoto. La formazione di  $O^{15}$  per cattura protonica dell'  $N^{14}$  è la reazione più lenta del ciclo e dà inizio al secondo ramo che, attraverso gli stessi processi, porta alla formazione di un nucleo di  $He^4$ .

Reazione	Energia Q (Mev)	Tempo
$C^{12} + H^1 \rightarrow N^{13} + \gamma$	1.93	$10^7 yr$
$N^{13} \rightarrow C^{13} + e^+ + \nu_e$	+2.2 -0.7	7min
$C^{13} + H^1 \rightarrow N^{14} + \gamma$	7.55	$10^6 yr$
$N^{14} + H^1 \rightarrow O^{15} + \gamma$	7.29	$10^8 yr$
$O^{15} \rightarrow N^{15} + e^+ + \nu_e$	+2.7 -1	82sec
$N^{15} + H^1 \rightarrow C^{12} + He^4$	4.96	$10^5$

Per temperature più elevate, al ciclo primario si affianca un ciclo secondario che coinvolge elementi più pesanti:  $N^{15}$  catturando un protone può formare  $O^{16}$  e successivamente formare l'elio. Se le condizioni ambientali sono adatte possono essere presenti cicli successivi.

Data una certa abbondanza iniziale di carbonio, azoto e ossigeno, se in una stella è attivo il ciclo CNO, le abbondanze relative degli elementi varieranno a causa dei diversi tempi scala delle reazioni. In particolare aumenterebbe la concentrazione dell'azoto e diminuirebbe quella di carbonio e ossigeno. Se dallo studio della composizione chimica di una stella, emerge una certa *anticorrelazione* tra le concentrazioni di questi elementi, allora sicuramente nella stella è attivo il ciclo CNO. Inoltre, misurando la variazione delle abbondanze chimiche degli elementi più pesanti, si può conoscere se sono attivi cicli successivi e quindi stimare la quantità di metalli presenti: ciò permette di stimare l'età della stella e capire a quale *popolazione*<sup>2</sup> appartiene.

## 4.3 Processo $3\alpha$

Una volta che l'idrogeno è stato completamente esaurito e trasformato in elio, le reazioni termonucleari si arrestano e, poiché la radiazione prodotta dalle reazioni di fusione non è più in grado di bilanciare la variazione di energia potenziale gravitazionale, il core della stella riprende la contrazione aumentando di densità. Nella contrazione l'energia gravitazionale si converte in energia cinetica dei nuclei in modo da innalzare la temperatura fino a  $1,5 \cdot 10^8 K$ , sufficiente per l'innescio della reazione di fusione dell'elio. La  $3\alpha$  è tipica delle stelle che si trovano nel Braccio Orizzontale, nelle quali la concentrazione percentuale di elio supera il 90%.

Due nuclei di  $He^4$  formano il  $Be^8$  che, essendo molto instabile, dovrebbe decadere di nuovo in elio in un tempo molto rapido dell'ordine di  $10^{-17}$  secondi; poiché sono presenti  $10^{10}$  nuclei di elio per ogni nucleo di berillio, diventa non nulla la probabilità che prima di spaccarsi si fonda con un altro nucleo di elio formando il  $C^{12}$ . La fusione dell'elio coincide infatti con il processo di nucleosintesi del carbonio:



<sup>2</sup>Le stelle di *PopI* sono le più antiche e più povere di metalli; quelle di *PopII* appartengono a una generazione più recente e hanno un contenuto metallico superiore.

con rilascio di  $7.3 \text{ MeV}$  di energia.

Reazione	Energia Q (Mev)
$He^4 + He^4 \leftrightarrow Be^8$	-0.1
$Be^8 + He^4 \rightarrow C^{12} + \gamma$	7.3

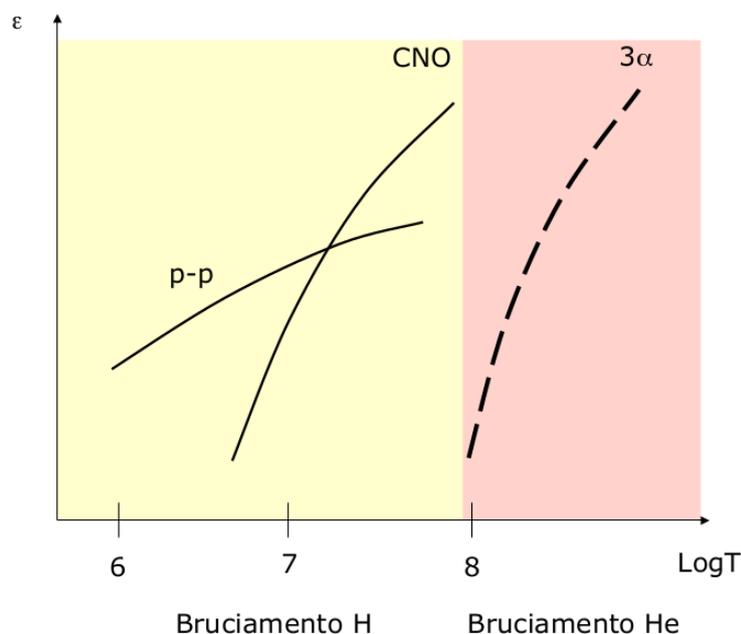
Al procedere della reazione diminuisce la concentrazione di elio e quindi anche l'efficienza del processo.

### 4.3.1 Confronto energetico

Il grafico riproduce l'andamento della produzione di energia in funzione della temperatura, relativa ai tre processi esaminati. Essa dipende principalmente dalla composizione chimica, dalla densità e dalla temperatura del guscio stellare in cui è attiva una determinata reazione. Dai  $10^6 K$  avvengono i primi processi legati alla catena pp, che risulta essere il processo dominante fino a 17 milioni di gradi poiché ha minore energia di attivazione. Per temperature più elevate diventa più efficiente il ciclo CNO; la rapida crescita delle curve relative a CNO e  $3\alpha$  testimonia la loro maggiore sensibilità alle variazioni di temperatura.

Un nucleo in cui predomina la catena pp è di tipo *radiativo*, in cui l'energia è trasportata verso l'esterno dai fotoni; se predomina il ciclo CNO è di tipo *convettivo*. Il rimescolamento di celle di plasma trasporta energia termica verso gli strati esterni più freddi, e rifornisce il nucleo di elementi pesanti, con l'effetto di prolungare la durata del ciclo.

In particolare, nel nucleo del Sole, che ha una temperatura di  $1.5 \cdot 10^7 K$ , la catena pp risulta circa cento volte più efficiente; per stelle più massicce del Sole, e perciò più calde prevale il ciclo CNO. Il processo  $3\alpha$  domina nella produzione di energia quando l'idrogeno è totalmente consumato; produce solo il 10% dell'energia prodotta dalla pp e perciò è attivo nella stella per periodi più brevi.

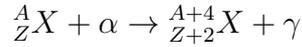


**Figura 4.3:** Confronto dell'efficienza energetica delle reazioni termonucleari in funzione della temperatura.

## 4.4 Reazioni successive

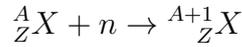
Terminata la combustione dell'elio, l'evoluzione della stella procede in modo analogo a quanto già spiegato: la contrazione permette di raggiungere temperature sempre più elevate, dell'ordine di  $10^9-10^{10}K$ , alle quali si attivano le reazioni di fusione successive come quella del carbonio, ossigeno, neon, magnesio e silicio, che sintetizzano e arricchiscono la stella degli elementi pesanti fino al ferro, emettendo energia.

La nucleosintesi degli elementi fino al ferro avviene anche mediante processi di *cattura*  $\alpha$  che si innescano per temperature superiori a  $6 \cdot 10^8 K$ :



l'iniezione di una particella  $\alpha$  all'interno di nuclei leggeri forma nuclei più pesanti chiamati elementi  $\alpha$ , con produzione di energia compresa tra  $5 - 10 MeV$ . Questi elementi vengono immessi mezzo interstellare a seguito dell'esplosione di SNII, e andranno ad arricchire di contenuto metallico le future generazioni di stelle.

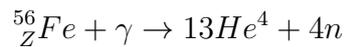
La nucleosintesi esplosiva consente la produzione di elementi più pesanti del ferro tramite processi di *cattura neutronica*:



seguiti generalmente da decadimenti  $\beta^-$  che stabilizzano il nuovo nucleo. La cattura neutronica può avvenire secondo due canali che si distinguono confrontando il tempo scala di cattura neutronica  $t_n$  con il tempo scala di decadimento  $\beta^-$   $t_\beta$ :

- *processi slow*: ( $t_\beta < t_n$ ) un nucleo instabile decade per  $\beta^-$  prima di catturare altri neutroni; consente la produzione degli *elementi s*;
- *processi rapid*: ( $t_\beta > t_n$ ) un nucleo instabile cattura molti neutroni prima di decadere per  $\beta^-$ ; consente la produzione degli *elementi r*.

La cattura dei neutroni avviene solo se è attivo un meccanismo che ne produca in abbondanza. Essi possono provenire da processi di cattura  $\alpha$  oppure essere prodotti tramite la *fotodisintegrazione* di elementi pesanti, come il ferro:



spaccato da radiazione molto energetica in nuclei di elio, per il picco di stabilità, e quattro neutroni.

Grandi quantità di neutroni possono essere emesse durante le esplosioni di SNII durante le quali vengono sintetizzati molti degli elementi pesanti della tavola periodica.

# Capitolo 5

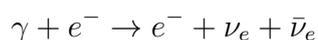
## Neutrini

Quando si raggiungono temperature dell'ordine di  $10^{8-9}K$  e densità molto elevate, l'emissione di neutrini nelle reazioni termonucleari è tale da sottrarre quasi tutta l'energia prodotta. Inoltre diventano efficienti i meccanismi di *termoproduzione* che sottraggono energia direttamente dalla struttura stellare, con ripercussioni fondamentali sulla sua evoluzione. Sono tre i canali di produzione dei *termoneutrini*:

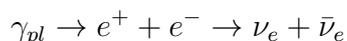
- *produzione di coppie* attraverso la seguente reazione di equilibrio:



- *fotoproduzione*: un elettrone può assorbire un fotone emettendo una coppia di neutrini:

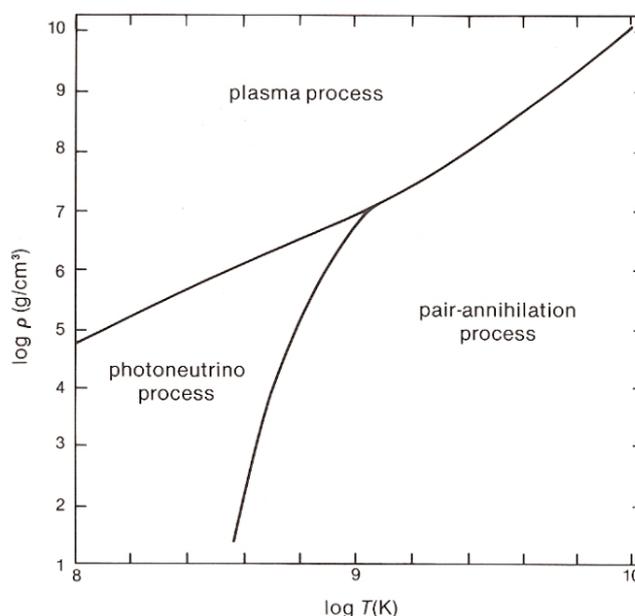


- neutrini da *oscillazione di plasma*:



i fotoni in un gas ionizzato, come negli interni stellari, si

comportano come *plasmoni* e perciò possono trasformarsi direttamente in una coppia di neutrini; per fotoni normali ciò non può avvenire perché violerebbe la conservazione dell'energia e dell'impulso



**Figura 5.1:** Piano  $\text{Log} \rho - \text{Log} T$  con regioni di predominio dei diversi processi di *termoproduzione*.

## 5.1 Neutrini Solari

I neutrini solari sono di notevole importanza perché sono prodotti nelle regioni centrali della stella e fuggono direttamente nello spazio senza interagire con la materia solare. Se rilevati consentono quindi di "osservare" il centro della nostra stella e ottenere informazioni riguardo le regioni di produzione.

A partire dagli anni '60 vennero condotti esperimenti al fine di rilevare i neutrini prodotti dalle reazioni di fusione nucleare all'interno del Sole. Conoscendo la luminosità solare, il numero di reazioni al secondo e il numero di neutrini prodotti per ogni reazione, si è stimato un flusso di  $10^{11}$  neutrini per  $cm^2$  per secondo.

Sorprendentemente i neutrini rivelati risultarono solo tra  $1/2$  e  $1/3$  di quelli previsti dalla teoria. Questo deficit venne spiegato ammettendo che i neutrini *elettronici* emessi dal Sole si sarebbero trasformati, nel tragitto per raggiungere la Terra, in neutrini di tipo *muonico* o *tauonico*. Ciò implica che i neutrini hanno massa, cioè oscillano, a differenza di quanto previsto dalla teoria del Modello Standard.

# Bibliografia

- [1] Braibant S., Spurio M., Giacomelli G., *Particelle e Interazioni Fondamentali*, 2<sup>a</sup> ed., Springer, 2012.
- [2] Castellani V., *Astrofisica Stellare*, ed. Zanichelli.
- [3] Cuffiani M., Spurio M., *Appunti e slides del corso di Fisica Nucleare e Subnucleare*
- [4] Ferraro F.R., *Appunti e slides del corso di Astrofisica Stellare*.