



CIRCOLO ASTROFILI VERONESI
Antonio Cagnoli

LE REAZIONI NUCLEARI NEL SOLE

Elmar Pfletschinger

Indice

1. L'energia prodotta dal sole	3
2. La fusione nucleare e la finestra di Gamow	5
2.1 La distribuzione Maxwell Boltzmann	6
2.2 La barriera elettrostatica	8
2.3 L'effetto tunnel	9
3. La reattività protone – protone	12
4. La stabilità termica del sole e il confinamento gravitazionale	14
5. Ipotesi di reazione di antineutrini con protoni	16
6. Le reazioni del deuterio	18
6.1 La reazione deuterio trizio	18
6.2 La reazione deuterio – elio 3	19
6.3 La reazione tra due nuclei di deuterio	19
6.4 Dalla reazione deuterio - elio 4 nascerebbe il litio 6	20
Se ci fosse	
7. Le reazioni degli isotopi dell'elio e del litio	21
7.1 La fusione tra due nuclei di elio 3	22
7.2 La fusione tra elio 3 e elio 4	22
7.3 Le reazioni nucleari del litio 7 e del litio 6	23
7.4 La fusione tra due nuclei di elio 4	23
7.5 La cattura di un elettrone da parte di un nucleo di elio3	24
8. Ipotesi di reazione di antineutrini con elio 3	24
9. Il ciclo Bethe – Weizsäcker oppure CNO	25
9.1 la fusione $^{12}\text{C} + ^1\text{H}$	25
9.2 Il decadimento beta dell'azoto 13	25
9.3 La fusione $^{13}\text{C} + ^1\text{H}$	26
9.4 La fusione $^{14}\text{N} + ^1\text{H}$	26
9.5 Il decadimento beta dell'ossigeno 15	26
9.6 La fusione del N^{15} con un protone	27

1. L'energia prodotta dal sole

Sulla superficie terrestre, fuori dall'atmosfera, arriva la radiazione solare con una potenza di 1355 W/m^2 (costante solare). La distanza della terra dal sole in media è di 149,6 milioni di km. Dalla moltiplicazione della costante solare con la superficie di una sfera con il raggio uguale alla distanza media sole – terra si ottiene che la potenza totale delle radiazioni dal sole è di $3,805 \times 10^{26} \text{ W}$ ($3.846 \times 10^{26} \text{ W}$ da <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>).

Nel sole idrogeno viene trasformato in elio. Il primo passo è la reazione di due protoni che diventano un nucleo di idrogeno pesante o deuterio. L'energia totale liberata dalla fusione di 4 protoni in un nucleo di elio è di 26,12 MeV. Nelle reazioni nascono anche due neutrini che portano via un'energia che al massimo è di 471 keV ciascuno. L'energia portata via dai neutrini non riscalda il sole, i neutrini lasciano il sole senza interagire (in linea di massima). L'energia che riscalda il sole è di circa 25,65 MeV per ogni atomo di elio creato.

1 eV corrisponde a $1,609 \times 10^{-19} \text{ J}$. L'eV (electron Volt) è una misura di energia come il Joule. Dalla potenza totale del sole di $3,805 \times 10^{26} \text{ W}$ si calcola che il sole produce $6,15 \times 10^{11} \text{ kg}$ di elio al secondo. ($6,2 \times 10^{11} \text{ kg/s}$ da <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>).

Assumendo l'età del sole in 4,6 miliardi di anni (= $1,45 \times 10^{17}$ secondi) e assumendo una reazione costante nel tempo si calcola che il sole ha prodotto $8,93 \times 10^{28} \text{ kg}$ di elio nel frattempo, il 4,6% della propria massa si è trasformato in elio.

La composizione della superficie del sole, determinata con mezzi spettroscopici è:

Elemento	Percentuale numero di atomi	Percentuale della massa
Idrogeno	91,2	71,0
Elio	8,7	27,1
Ossigeno	0,078	0,97
Carbonio	0,043	0,40
Azoto	0,0088	0,096
Silicio	0,0045	0,099
Magnesio	0,0038	0,076
Neon	0,0035	0,058
Ferro	0,0030	0,14
Zolfo	0,0015	0,040

Da: <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>

I dati usati per calcolare la quantità di elio creati nel sole:

massa solare	1,9891E+30	kg
Distanza terra sole	149 600 000 000	m
Costante solare	1353	W/m ²
Energia di fusione di 4 protoni in un nucleo di elio senza l'energia dei 2 neutrini	25,65	MeV
Equivalenti eV/Joule	1,602E-19	eV/J
Massa nucleo di elio	4,002602	AMU

	6,646476E-27	kg
Età del sole	4,6E9	Anni
	1,45E17	secondi

Risulta che il contenuto di elio nel sole non corrisponde alla quantità di elio prodotta nel sole. C'è ne molto di più. Il dilemma si risolve con l'assunzione di un contenuto elevato di elio prima dell'inizio della reazione termonucleare. Si presume che la composizione di giovè corrisponda alla composizione del sole prima dell'accensione. Giove contiene il 25% di elio.

2. La fusione nucleare e la finestra di Gamow

Il processo della fusione nucleare nelle stelle può essere suddiviso in una serie di step:

Due nuclei si avvicinano tra di loro. La repulsione elettrostatica li rallenta e li ferma quando la loro energia cinetica si è totalmente trasformata in energia potenziale nel reciproco campo elettrostatico.

Le energie termiche disponibili sia nel sole, sia sulla terra, sono insufficienti a portare due nuclei a contatto tra di loro. Si può calcolare fino a dove riescono ad avvicinarsi tra di loro. La loro energia termica, che va trasformata in energia potenziale, si calcola con la distribuzione di Maxwell – Boltzmann. Non si calcola con il fattore di Boltzmann, come viene indicato nella parte maggiore dei testi. E' importante tenere conto del fatto che per l'avvicinamento tra due particelle non è determinante la velocità assoluta delle particelle ma la velocità relativa tra le due particelle, che è un'altra cosa.

Una particella che si è avvicinata fino a una certa distanza a un'altra particella e che è stata fermata dalla barriera elettrostatica ha una probabilità calcolabile di trovarsi dall'altra parte della barriera, cioè in contatto con l'altra particella. Questo perché il suo comportamento va descritto da un'onda. L'onda può mostrare un'ampiezza all'interno della barriera e dall'altra parte della barriera. La probabilità di passare dall'altra parte della barriera diminuisce con la distanza tra le due particelle.

All'interno della barriera l'onda c'è. Ma il quadrato dell'ampiezza che dà la probabilità di trovare la particella lì, non fornisce un valore reale, ma un valore immaginario, una caratteristica del calcolo con numeri complessi. In altre parole, la particella può trovarsi di qua o di là della barriera, ma non nella barriera.

Il prodotto delle due funzioni, cioè la probabilità di trovare una particella con una certa energia e la probabilità che la particella passi la barriera mostra un massimo a una determinata energia. La zona intorno a questo massimo si chiama "**finestra di Gamow**". Al di fuori della finestra di Gamow il prodotto delle due probabilità diventa piccolo. Due particelle si possono incontrare soltanto se la loro reciproca energia cinetica cade dentro la finestra di Gamow. A energie più basse nella distribuzione termica delle energie si trovano tante particelle, ma le loro energie sono insufficienti per avvicinarsi abbastanza per l'effetto tunnel, la barriera non è trasparente. Alle alte energie la barriera è notevolmente trasparente ma non ci sono particelle.

Quando due particelle si incontrano può verificarsi una fusione dei due – eventualmente, non sempre. La fusione tra due protoni è complessa. Tra due protoni non esiste nessuno stato legato. Due protoni si possono legare tra di loro soltanto se nel momento del contatto uno dei due si trasforma in un neutrone, con l'emissione di un positrone e un neutrino. Normalmente protoni non si trasformano in neutroni, manca l'energia per farlo. Nel caso della fusione di due protoni l'energia viene fornita dall'energia di legame del deuterone che si forma. Questa energia, 2,224 MeV, è abbondante. Per la formazione del positrone occorrono 0,511 MeV, restano quindi 1,713 MeV che vanno in energie cinetiche del positrone e del neutrino.

La trasformazione del protone in un neutrone è un decadimento beta. Il decadimento beta è governato dall'interazione debole.

La fusione tra due nuclei di solito è una questione di interazione forte, che governa l'adesione dei nucleoni (cioè protoni e neutroni) tra di loro. La fusione tra due protoni è l'unico caso di fusione

nucleare conosciuto che coinvolge oltre all'interazione forte e anche quella debole, che al momento giusto deve trasformare un protone in un neutrone.

Quando si afferma che la fusione termonucleare, cioè la bomba all'idrogeno o la fusione allo scopo della generazione di energia elettrica, sia il processo del sole, si tratta di una non verità. La fusione eseguibile sulla terra, cioè tra deuterio e trizio, non coinvolge nessuna interazione debole.

La fusione tra due protoni, che formano un deuterone, sulla terra non è mai stata eseguita.

2.1 La distribuzione di Maxwell – Boltzmann

Le particelle in un gas o in un plasma si muovono. Se la densità del gas è sufficiente per far nascere interazioni tra di loro, nasce un equilibrio termico con una distribuzione delle energie tipica. La probabilità che una particella abbia una certa velocità o una certa energia cinetica viene descritta dalla distribuzione di Maxwell - Boltzmann.

Due diverse formulazioni della distribuzione di Maxwell – Boltzmann:

$$f(v) dv = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT}\right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv \quad \text{distribuzione in funzione della velocità}$$

$$f(E) dE = 2 \sqrt{\frac{E}{\pi(kT)^3}} e^{-\frac{E}{kT}} dE \quad \text{distribuzione in funzione dell'energia cinetica}$$

Le funzioni $f(v)$ e $f(E)$ indicano ciascuna punti della curva. La probabilità di trovare una velocità precisa o un'energia precisa è zero. La probabilità diventa finita per un intervallo dv di velocità o un intervallo dE di energia. L'area intera sotto le curva diventa 1 (quest'è un controllo per la correttezza del calcolo).

La prima formula fornisce la probabilità $f(v)$ di trovare la particella nell'intervallo di velocità $v - dv/2$ a $v+dv/2$.

La seconda formula fornisce la probabilità f_E di trovare la particella con l'energia nell'intervallo $E - dE/2$ a $E + dE/2$.

Nella prima formulazione appare la massa m della particella, nella seconda formulazione la massa non appare.

La distribuzione di Maxwell – Boltzmann è idonea per descrivere il comportamento nelle stelle al di fuori delle situazioni di altissima densità come si trova nelle nane bianche o nelle le stelle a neutroni.

La cinetica d'urto tra due particelle.

Esiste un "trucco" per il comportamento tra due particelle in movimento. Si possono usare le formule valide per una sola particella, sostituendo la massa della particella con la "massa ridotta", che si calcola con la seguente formula:

$$m_{\text{ridotta}} = m_1 * m_2 / (m_1 + m_2) \quad (\text{derivazione dettagliata in Wikipedia})$$

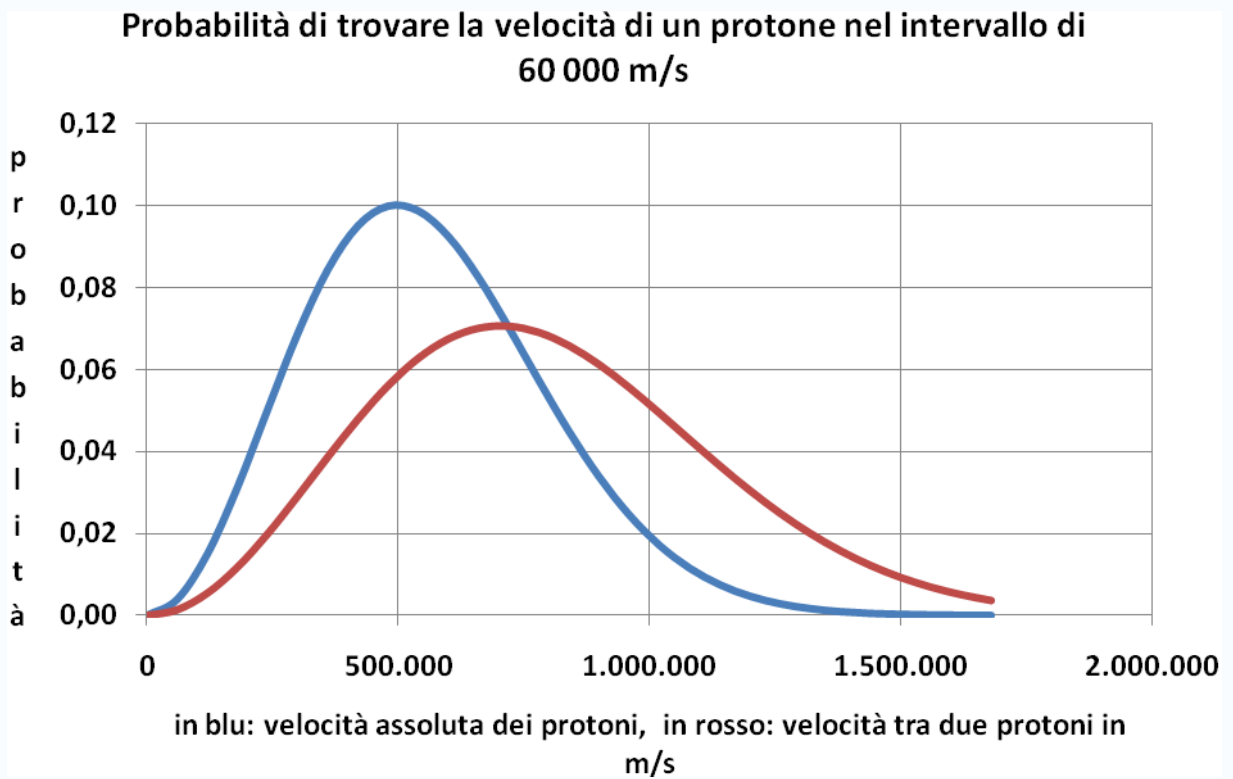
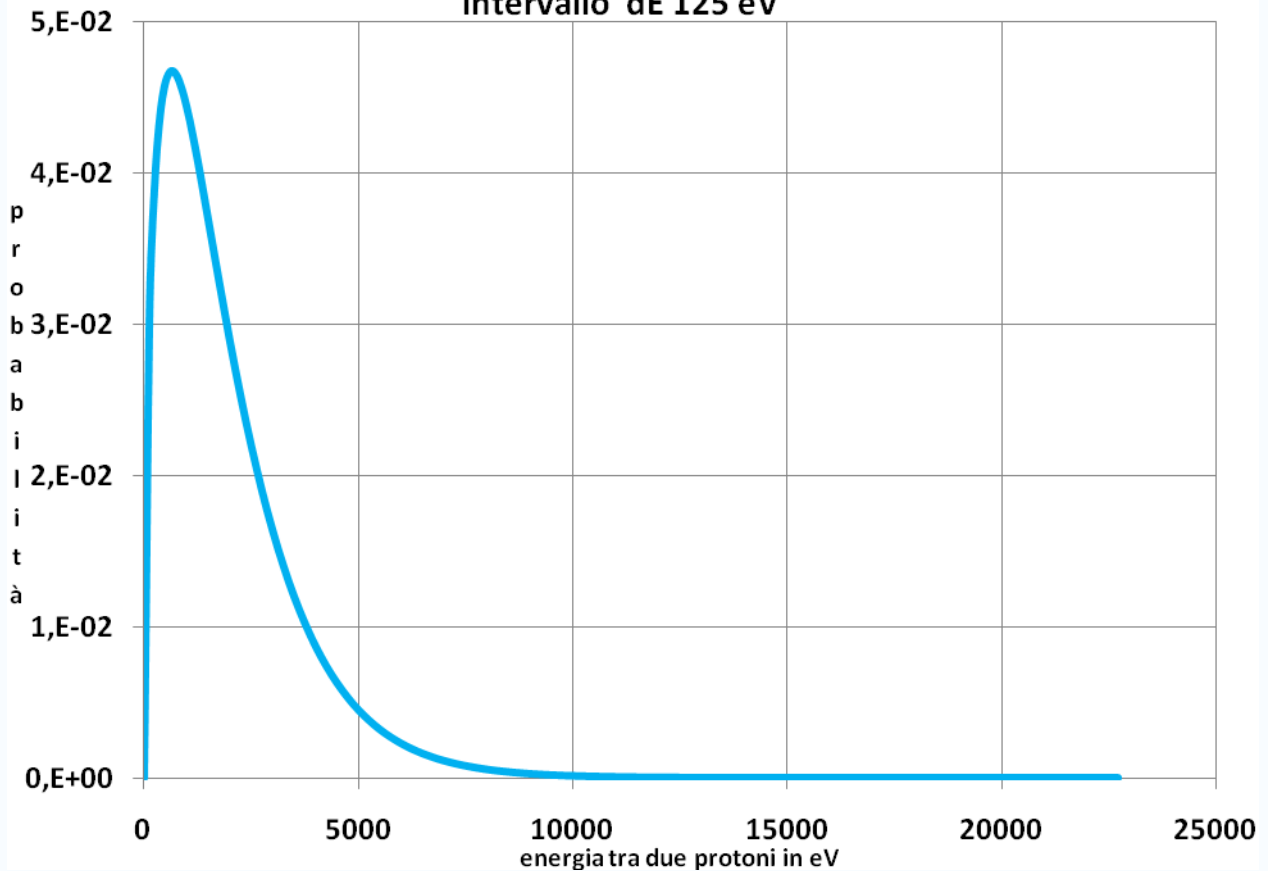


Grafico per la distribuzione **Maxwell – Boltzmann** delle velocità di protoni in m/s a 15 Milioni di gradi K (interno del sole).

Distribuzione Maxwell Boltzmann per 15 milioni di gradi K
intervallo dE 125 eV

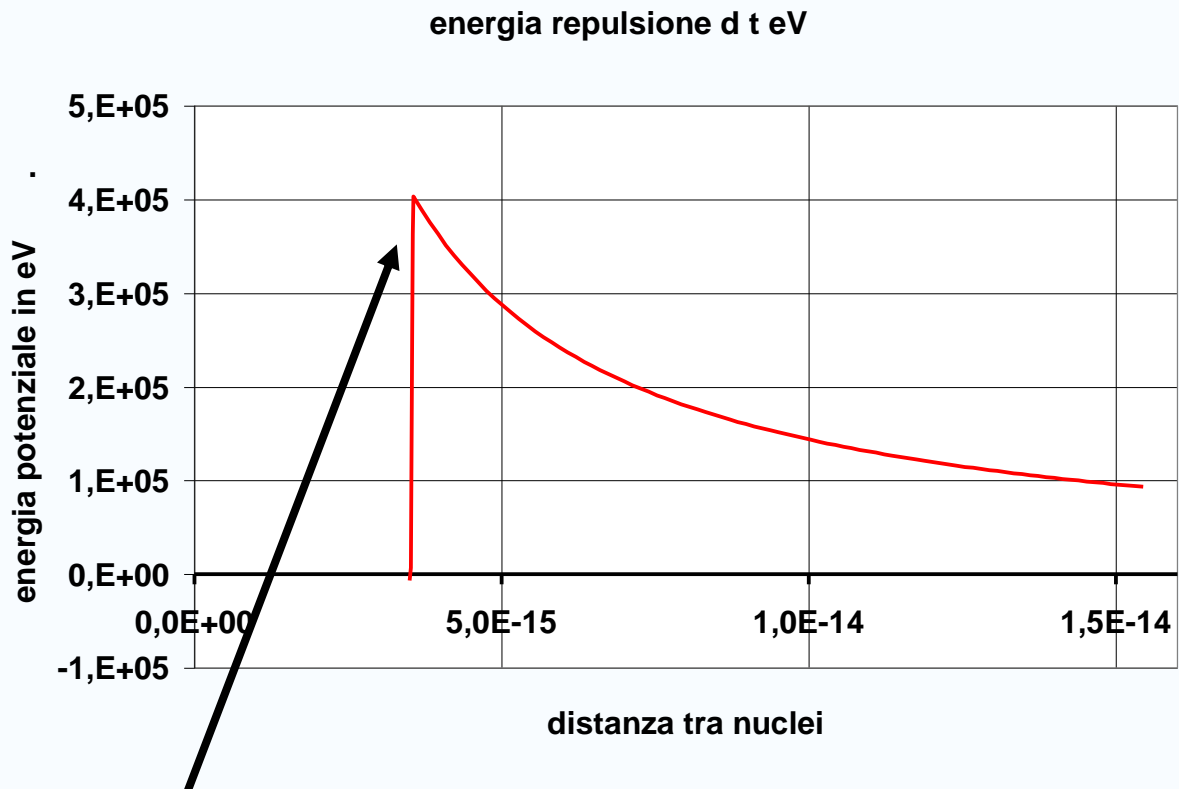


La distribuzione in funzione dell'energia è una sola, è uguale per singoli protoni, per coppie di protoni, per nuclei di elio o qualsiasi altra particella. **La massa della particella non appare nella formula.** L'esempio è stato calcolato per la temperatura di 15 milioni di K, temperatura al centro del sole.

Il fatto che la distribuzione Maxwell – Boltzmann espressa per velocità delle particelle crea due curve diverse e che la distribuzione in termini di energia consiste in una sola curva, merita una spiegazione: La velocità è un vettore, l'energia uno scalare. Per l'energia cinetica tra due particelle non conta la lunghezza intera (modulo) del vettore, ma solo la sua componente lungo la linea che collega le due particelle.

2.2 La barriera elettrostatica

Il grafico mostra l'energia (non la forza) di repulsione elettrostatica tra un nucleo di deuterio e un nucleo di trizio.



Contatto tra i due nuclei. A questo punto l'interazione forte diventa dominante sulla repulsione elettrostatica. Il grafico si riferisce alla repulsione tra un nucleo di deuterio e uno di trizio. E' uguale a quello tra due protoni, dato che le cariche elettriche sono uguali. Basta spostare la linea di contatto un po' più a sinistra. L'energia elettrostatica al contatto tra due protoni è più alta, dato che sono più piccoli e si avvicinano un po' di più.

2.3 L'effetto tunnel

L'energia cinetica necessaria tra due protoni per superare la repulsione elettrostatica tra di loro è di 545 keV. La probabilità di trovare quest'energia nella distribuzione termica a 15 milioni di gradi è dell'ordine di grandezza di 10^{-160} . In tutto il sole non c'è neanche una coppia di protoni con questa energia.

Secondo la meccanica classica la barriera può essere superata soltanto da particelle con energia uguale o superiore all'altezza della barriera.

Secondo la meccanica a onde le particelle possono avere una probabilità di trovarsi dall'altra parte della barriera senza avere l'energia sufficiente per superarla. E come superare una montagna con un tunnel invece di passare sopra.

Le ampiezze dell'onda (prese al quadrato), che esprimono la probabilità di trovare la particella in un posto si ottengono come soluzione dell'equazione di Schroedinger. Il potenziale da usare nell'equazione di Schroedinger è quello elettrostatico descritto qui sopra, a simmetria sferica. Questo problema matematico è stato risolto da Gamow.

Il rapporto delle probabilità fuori o dentro la barriera viene chiamato "trasparenza della barriera".

Si ottiene come risultato per la trasparenza o la probabilità di passare la barriera:

$$\text{probabilità} = \exp(-E_G/E)^{1/2}$$

$$E_G = \text{energia di Gamow} = (\pi\alpha Z_A Z_B)^2 2m_r c^2 \text{ in J}$$

E = energia della particella in J

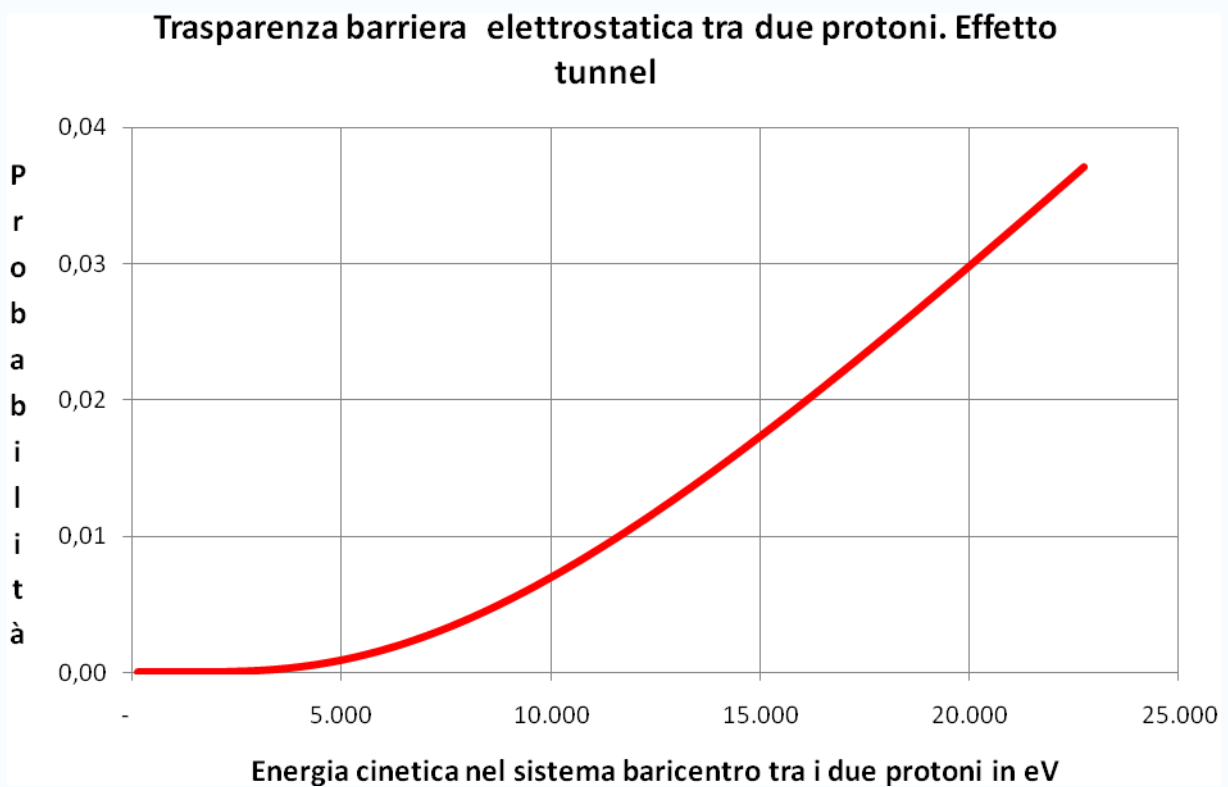
m_r = massa ridotta delle due particelle

c = velocità della luce = 299 792 458 m/s

α = fine structure constant

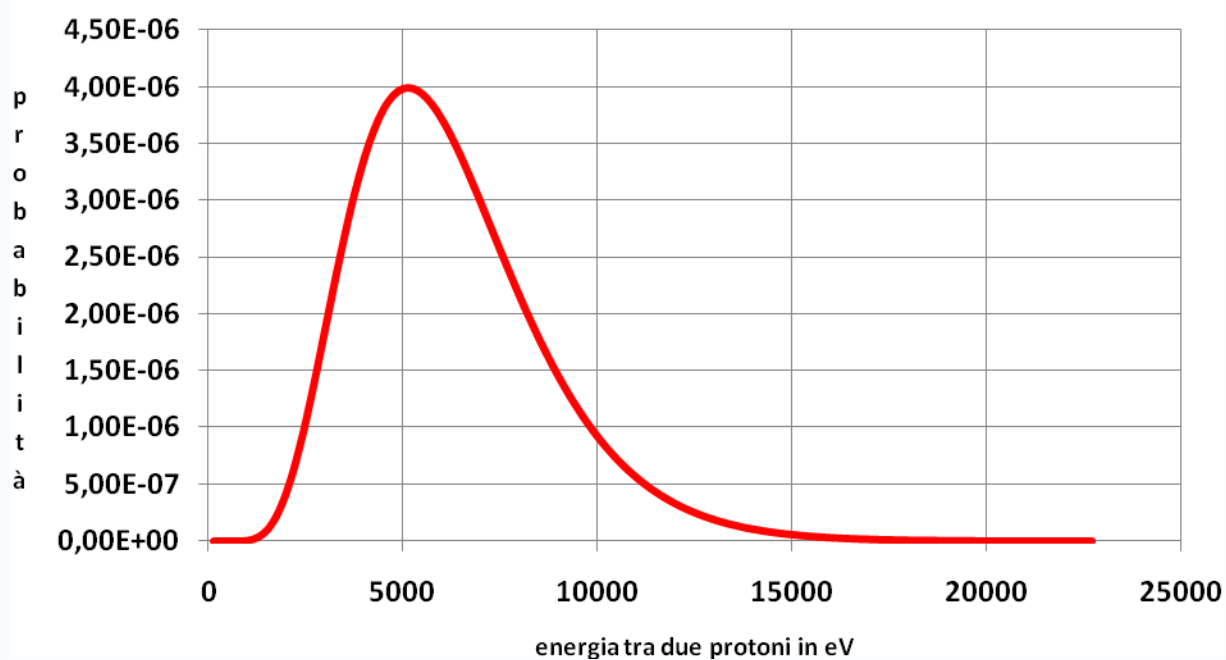
$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c 4\pi\epsilon_0} = 7.297352568(24) \times 10^{-3} = \frac{1}{137.03599911(46)}$$

1 eV = 1,6020E-19 J conversione J in eV



La “trasparenza” della barriera elettrostatica tra due protoni

Finestra di Gamow tra due protoni a 15 milioni di gradi



La finestra di Gamow tra due protoni a 15 milioni di gradi.

3. La reattività protone - protone

La finestra di Gamow non ha come risultato il numero di reazioni che avvengono in un determinato volume:

Manca il numero d'interazioni – la densità non c'è nella formula, ma è evidente che c'entra - e manca la probabilità che la reazione avvenga nel caso di contatto. E' possibile che anche in caso di contatto tra due protoni non succeda proprio niente.

Il numero d'interazioni:

(Non si può parlare di urti, dato che due protoni non si urtano mai. Come interazione si intende la situazione in cui due protoni si avvicinano alla distanza più breve possibile, alla quale tutta l'energia cinetica nel sistema di due protoni è trasformata in energia elettrostatica)

La questione del numero di interazioni, tralasciando la probabilità di una reazione nucleare, è una questione geometrica:

$$N = \sigma_{particella} n_1 n_2 v$$

N = numero di interazioni al secondo per unità di volume

$\sigma_{particella}$ = sezione di interazione

n_1 = numero di particelle tipo 1 che partecipano nella reazione nel volume

n_2 = numero di particelle tipo 2 che partecipano nella reazione nel volume

v = la velocità delle particelle

Il numero totale delle interazioni si ottiene come somma (o integrale) del numero di reazioni dei singoli campi di velocità.

La sezione di interazione non è la sezione geometrica. Va calcolata con la meccanica delle onde che descrive la probabilità di presenza di una particella in un determinato volume. Per particelle di piccola massa, come i protoni e di bassa energia, come nel sole, la lunghezza d'onda che descrive la probabilità di presenza della particella, è più grande della particella.

Per particelle pesanti e ad alta energia il σ diventa la sezione geometrica delle particelle.

Le densità di particelle n_1 e n_2 si riferiscono nel caso della fusione tra due protoni allo stesso tipo di particelle. Tenendo conto che ogni protone può reagire con ogni altro protone, si ottiene:

$$n_1 n_2 = \frac{1}{2} n^2$$

Dove n è la densità di protoni.

Le reazioni nucleari sono possibili unicamente nella finestra di Gamow. In questo caso il $\sigma_{\text{geometrico}}$ diventa $\sigma_{\text{particelle}}(v) \times \text{fattore di Gamow}(v)$.

Con questo si ottiene il numero di protoni, che attraverso l'effetto tunnel sono effettivamente in contatto tra di loro per unità di volume e di tempo.

Questo sarebbe sufficiente a calcolare la reattività in cui il contatto tra due nuclei porta comunque a una fusione (occorre aggiungere un fattore che esprime il fatto che la fusione è possibile solo per certi casi di orientamento reciproco degli assi di rotazione delle particelle). Nel caso della fusione tra due protoni non è così. Il prodotto della fusione non è un 2He (che sarebbe un isotopo dell'elio senza neutroni) che non esiste (come detto prima, non esiste alcuno stato legato tra due protoni), ma è il deuterio. Nel momento del contatto quindi uno dei due protoni si deve trasformare in un neutrone.

La teoria delle probabilità dei decadimenti beta è stata sviluppata da Enrico Fermi. In questa teoria si applica l'operatore dell'interazione debole ai stati di partenza (due protoni) e di arrivo (una particella di deuterio, un positrone e un neutrino).

Questo calcolo è introvabile. La reattività della fusione di due protoni che è l'inizio delle reazioni nucleari che producono l'energia nel sole risulta sconosciuta. (in un libro di fisica si trova la nota: "Non preoccupatevi, il sole funziona lo stesso").

Si può invece eseguire il calcolo "rovescio": Invece di partire dalla fisica nucleare si parte dal calore sviluppato dal sole:

Si può calcolare la effettiva reattività della reazione tra due protoni con l'assunzione dei seguenti dati:

Temperatura al centro del sole	15 000 000 K
Densità	150 000 kg/m ³
Percentuale di idrogeno	60% approssimativo

Quindi:

Numero di protoni al metro cubo	5,37691x10 ³¹
Parte dei protoni nella finestra Gamow	0,000178
Numero di protoni nella finestra Gamow	9,57 x 10 ²⁷ /m ³
Numero di protoni che reagisce in un secondo	2,52 x 10 ¹⁴ /m ³ /s
Vita media dei protoni che sono nella finestra di Gamow, cioè che possono reagire	1 204 000 anni (!)

Per confronto: La vita media di un neutrone, che tramite un decadimento beta si trasforma in un protone, è di 884,4 secondi (attenzione: la vita media e il tempo di dimezzamento non sono la stessa cosa, il tempo di dimezzamento del neutrone è di 613 secondi).

Conclusione: Manca la comprensione del processo di fusione tra due protoni.

4. La stabilità termica del sole e il confinamento gravitazionale

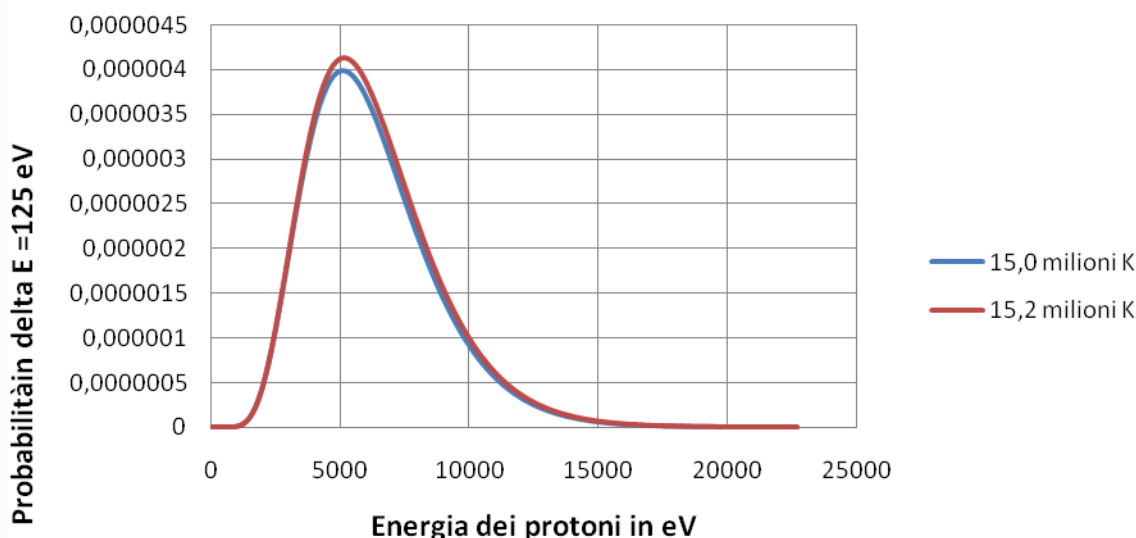
I processi (sia di chimica, sia di chimica nucleare) esotermici, cioè che producono calore, e che sono innescati dalla temperatura sono instabili. O si innescano e diventano esplosivi – per questi si usa il termine “runaway” - o si fermano. La questione è l'equilibrio tra il calore prodotto e il calore asportato. Nella chimica vale la regola empirica: se la reattività aumenta più del doppio per un aumento di temperatura di dieci gradi, il processo rischia di essere del tipo runaway. La reazione in questi casi viene tenuta sotto controllo con il dosaggio di una dei componenti della reazione (nel caso del forno a legna o carbone si regola il flusso dell'aria).

Il processo della catena di fusioni che trasformano idrogeno in elio nel sole si tratta di un processo esotermico ad innesco termico. Non esiste alcun controllo sul dosaggio delle materie reagenti. Eppure il sole, come le stelle della sequenza principale del diagramma Hertzsprung Russell brucia in maniera stabile. Non esplose e non si ferma.

La reazione termonucleare di fusione tra due protoni con le seguenti reazioni che portano all'elio, è una reazione debolissima. Si stima che nel cuore del sole la potenza media sia intorno a 40 Watt al metro cubo, al centro si stima in 276 Watt al metro cubo. In un metro cubo al centro ci sono 150 tonnellate di materia.

La probabilità di reazione tra due protoni, che determina la reattività del sole, cresce poco con l'aumento della temperatura. Il grafico seguente mostra la variazione della finestra di Gamow per un aumento di temperatura di 200 000 gradi.

Finestra di Gamow per due protoni a due temperature diverse



La reattività invece cresce in maniera decisa – al quadrato – con la densità dell'idrogeno.

Conclusione: La reazione tra due protoni non è del tipo “runaway”. Non si mantiene da sola.

Questo è vero anche per le stelle più grandi, di 100 masse solari, a temperature ben più alte di quelle del sole. L'idrogeno, a livello nucleare, non esplose mai. Quando hanno fatto esplodere, nel 1962, una bomba termonucleare nel mare, lo sapevano (si spera). Il rischio che i protoni dell'acqua del mare partecipassero alla reazione non c'era. Altrimenti

Perché il sole – e le stelle della sequenza principale del diagramma Hertzsprung – Russell bruciano l'idrogeno in maniera stabile?

Quando la stella nasce, la pressione e la temperatura al centro causate dalla compressione gravitazionale arrivano a valori che rendono possibile la reazione di fusione. La reazione non si autoinnesca, ma parte per effetto della pressione gravitazionale. La stella perde energia per radiazione. Quando il calore prodotto dalla fusione termonucleare arriva a essere uguale all'energia persa per radiazione, la compressione gravitazionale si ferma.

Se la compressione gravitazionale andasse avanti, aumenterebbe la quantità di energia prodotta dalla fusione, quindi aumenterebbero temperatura e pressione nel centro della stella. La pressione termodinamica e la pressione gravitazionale non sarebbero più uguali, la stella si espanderebbe, la densità scenderebbe e la reattività, che dipende al quadrato dalla densità diminuirebbe. Questo fenomeno potrebbe essere la causa di oscillazioni, dato che l'espansione avviene con un ritardo rispetto all'aumento di temperatura. Questa oscillazione dovrebbe essere visibile dall'intensità di produzione di neutrini. Finora non l'ha vista nessuno.

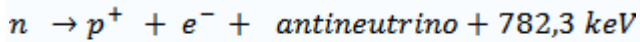
Il fatto che le condizioni idonee alla fusione sono imposte dalla pressione gravitazionale viene chiamato “confinamento gravitazionale”.

Nel sole la fusione nucleare non fa altro che ritardare il collasso gravitazionale – di dieci miliardi di anni. La fusione compensa l'energia persa per radiazione. Non aumenta la temperatura. Se la aumentasse la temperatura la reazione si fermerebbe a causa della diminuzione della densità.

5. Ipotesi di reazione di antineutrini con protoni

Il decadimento beta del neutrone si può invertire?

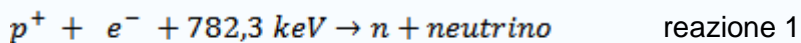
Neutroni decadono in protoni, elettroni e antineutrini:



La emivita del neutrone è 10 minuti 14 secondi. La creazione dell'elettrone richiede un'energia di 511 keV. C'è un avanzo di energia di 782,3 keV che si divide in maniera casuale tra le energie cinetiche dell'elettrone e dell'antineutrino. Lo spettro degli impulsi degli elettroni mostra un massimo approssimativamente a metà dell'impulso massimo. Lo spettro delle energie degli elettroni ha un massimo spostato verso energie basse rispetto alla metà dell'energia massima, lo spettro energetico degli antineutrino mostra un massimo spostato verso energie più alte.

(<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/particles/proton.html#c4>)

L'inversione del decadimento beta del neutrone può seguire vari modi:



La reazione 1 vuol dire che protoni possono catturare elettroni con un'energia sopra 782,3 keV. L'eventuale eccesso di energia va al neutrino. Nel sole non c'è nessun elettrone con questa energia. Nelle formule delle reazioni è stato considerato che l'assorbimento di un elettrone significa un apporto di energia di 511 keV, corrispondente alla massa di riposo dell'elettrone.

La reazione 2 vuol dire che l'elettrone assorbito può avere qualsiasi energia bassa e che l'energia mancante viene dall'antineutrino.

Perché questa reazione, che trasforma protoni in neutroni non avviene sulla terra? Non si può stabilire che non avvenga. L'esperienza dice solo che è tanto rara che non si nota.

Si può spiegare perché sulla terra è estremamente rara o inesistente: L'elettrone da catturare è sempre l'elettrone legato chimicamente. La sua energia è perfettamente determinata. L'antineutrino deve portare l'energia complementare per arrivare a 782,3 keV. La precisione con cui l'antineutrino deve avere questa energia complementare è di 10^{-19} eV (si calcola con la relazione di indeterminazione di Heisenberg e dalla vita media del neutrone di 884,4 secondi).

Bisognerebbe sapere qualcosa di più della spettroscopia degli antineutrini che sono in giro dappertutto.

Esaminando la provenienza degli antineutrini si può fare qualche approssimazione grossolana.

Gli antineutrini vengono soprattutto dalle supernovae. Nella prima fase della supernova, quella del collasso, protoni si trasformano in neutroni. In quantità, cioè masse solari abbondanti. Nella seconda fase quella del rimbalzo di neutroni dal nucleo duro, neutroni si incontrano con elementi che cadono verso il nucleo. Questi elementi assorbono i neutroni, anche in numero elevatissimo ("processo R"). Gli elementi che nascono mostrano un grande eccesso di neutroni e fanno decadimenti beta. Ogni decadimento beta produce anche un antineutrino. La tempistica delle emissioni è molto diversa: I neutrini nella prima fase della supernova partono in un tempo dell'ordine di grandezza del decimo di secondo. Gli antineutrini dalla seconda fase hanno la tempistica dei decadimenti beta, all'inizio l'intensità è alta, la coda va fino a tempi lunghissimi, cioè miliardi di anni. Tutte le supernovae dell'universo messo insieme sono sorgente di un flusso relativamente regolare di antineutrini.

Però: Gli antineutrini, prima di arrivare alla terra o al sole devono attraversare nubi di idrogeno di massa galattica. In questi nubi gli elettroni sono legati a atomi di idrogeno. Gli antineutrini con l'energia complementare precisa per essere assorbiti dagli atomi di idrogeno, quando arrivano alla terra o al sole, questa reazione l'hanno già fatta. Si può ipotizzare che gli antineutrini con questa energia precisa manchino nello spettro.

Qualcuno potrebbe esserci ancora e potrebbe trasformare qualche protone sulla terra in un neutrone. Questo fenomeno, se esiste, sparisce nel fondo di neutroni che sono presenti ovunque. I neutroni di fondo sulla terra (che sono causa del limite del metodo C14 di circa 40000 anni), nascono dal bombardamento di nuclei leggeri con particelle alfa, che vengono dalle catene di decadimenti dell'uranio 238, dell'uranio 235 e del torio 232. Inoltre vengono da fissioni spontanee dei nuclei pesanti, esempio: uranio 238.

Nel centro del sole le condizioni ambientali non sono quelle della terra. A 15 milioni di gradi, al centro del sole nessun elettrone è legato a un protone. Gli elettroni si muovono liberamente, le loro energie cinetiche sono quelle dello spettro termico. Il picco dell'energia termica è intorno a 625 eV, ma si trova un numero ancora apprezzabile di elettroni fino a 50 keV. L'energia di questi elettroni da sola è insufficiente per trasformare un protone in un neutrone, ma se un antineutrino porta l'energia mancante, questa trasformazione può succedere. Gli antineutrini con queste energie ci sono. Non hanno traversato nubi di idrogeno caldo. Quelle nubi non ci sono.

Se dall'assorbimento simultaneo di un elettrone e di un antineutrino nasce un neutrone, la prossima reazione è immediata: L'assorbimento dell'neutrone da parte di un protone con la conseguente nascita di un nucleo del deuterio.

L'ipotesi è che questo processo entri in concorrenza con la fusione di due protoni, descritta in precedenza.

Questa reazione potrebbe anche spiegare l'irregolarità del comportamento del sole. Il flusso di antineutrini è irregolare. Le irregolarità istantanee di reazioni all'interno del sole appaiono sulla superficie del sole ridistribuite su circa 100000 anni. Questo può spiegare perché la costante solare nonostante tutto è abbastanza costante.

Questa reazione potrebbe anche spiegare perché dal sole arrivano molto meno antineutrini di quelli che dovrebbero nascere dalla fusione di due protoni. Le spiegazioni attuali che dicono che i neutrini si trasformano, mancano di conferme sperimentali.

6. Le reazioni del deuterio

Nel nucleo del sole il deuterio, nato dalla fusione $p - p$, è circondato soprattutto da idrogeno e da elio 4. La concentrazione del deuterio sulla superficie del sole è dell'ordine di grandezza di una particella su diecimila. Si stima che al centro la sua concentrazione sia ancora più bassa.

La reazione principale, deuterone + protone:

Le probabilità di trovarsi nella finestra di Gamow, cioè l'integrale sulla finestra di Gamow, a 15 milioni di gradi::

Deuterone protone: $6,488 \times 10^{-5}$

Per confronto

Protone protone: $1,78 \times 10^{-4}$

Dalla reazione deuterone protone nasce un nucleo di elio 3. C'è un problema: In questa reazione avanza un energia di 4,786 MeV e l'elio 3 non ha nessun livello eccitato. Il nucleo intermedio che possa tenere questo eccesso di energia non esiste. Per questa reazione occorre un'emissione simultanea di un quanto gamma con l'eccesso di energia. L'interazione elettromagnetica che determina l'emissione del quanto di raggi gamma è abbastanza veloce (ordine di grandezza: intorno a 10^{-14} s) e la reazione avviene facilmente. Si scrive questa reazione: $d(p,\gamma)3\text{He}$.

La reazione di fusione tra deuterio e elio 4 non può funzionare, manca l'energia necessaria.

Le reazioni tra nuclei presenti in basse concentrazioni:

Fusioni deuterio e trizio

Fusione deuterio e elio 3

Fusioni deuterio – deuterio

6.1 La reazione deuterio – trizio

Questa è la reazione di fusione nucleare meglio nota sulla terra. E' alla base della bomba termonucleare, che funziona, ed è alla base della fusione controllata che dovrebbe produrre energia elettrica. Gli impianti pilota diventano sempre più grandi, ma nessun'impianto ha prodotto più del 40% dell'energia consumata per farlo funzionare.

Nel sole questa reazione è marginale. I nuclei di partenza sono tutt'e due di bassa concentrazione.

Questa reazione nei testi tradizionali viene descritta come $T(d,n)4\text{He}$, tralasciando il nucleo intermedio, elio 5. Questo nucleo intermedio fino a poco fa non era noto. Sulla mappa dei nuclidi (Karlsruher Nuklidkarte, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH), edizione 1995 è segnato ancora come campo bianco, cioè inesistente. Di recente si sa che esiste (Nudat 2 e Karlsruher Nuklidkarte edizione 2005).

Il nucleo di elio 5 è estremamente instabile. Decade con l'emissione di un neutrone in $0,76 \times 10^{-21}$ secondi (tempo di dimezzamento). Livelli eccitati dell'elio 5 non sono noti, ma la vita brevissima del nucleo ha come conseguenza che i livelli eccitati sarebbero comunque estremamente larghi.

Il neutrone emesso dal nucleo di elio 5 ha un'energia di 14,1 MeV. La maggior parte dei neutroni nati da questa reazione va assorbita da protoni che così diventano deuteri.

6.2 La reazione deuterio elio3

In tutta la letteratura si trova che questa reazione produce elio 4 e un protone. Senza indicare nessun nucleo intermedio, come se fosse una reazione diretta. Il motivo: Il nucleo intermedio, litio 5, non era noto. Nella Nuklidkarte, edizione 1995, è inesistente. Nella Nuklidkarte edizione 2005 c'è. Emivita: $0,37 \times 10^{-21}$ secondi. Vita un po' breve. Decade in elio 4 e un protone. Livelli eccitati: sconosciuti, ma data la brevità della vita, si può praticamente contare su un continuo di energie assorbibili. L'energia liberata nella formazione del litio5 e di 14,56 MeV.

Tanto bene ovviamente non va questa reazione. L'elio 3 sul sole c'è, non è consumato del tutto. Si trova nel vento solare. Si è depositato sulla luna. La NASA sostiene che verrebbe la pena portarlo sulla terra, sarebbe utile per reattori a fusione. Non è chiaro come. La reazione da usare sarebbe deuterio + elio3. In un reattore la reazione deuterio – deuterio sarebbe prevalente e l'elio 3 avanzerebbe, sarebbe inutile.

6.3 La reazione tra due nuclei di deuterio

La reazione di due deuteri tra di loro porta a un nucleo intermedio di elio 4, eccitato. Questo modo di descrivere la reazione è insolita, per il motivo che i livelli eccitati dell'elio 4 non erano noti fino a poco fa. La reazione era sempre descritta come reazione diretta con due possibilità di risultato. C'è però il fatto che le reazioni dirette non ci sono alle bassissime energie. La fusione di due nuclei di deuterio che porta all'elio 4 è esoterma. L'eccesso di energia è di 23,85 MeV.

Con questo eccesso di energia sono raggiungibili tre livelli eccitati diversi dell'elio 4:

Energia livello	Larghezza livello	Decadimenti livello
21,010 MeV	0,84 MeV	24% emissione neutrone, 76% emissione protone
21,840 MeV	2,01 MeV	37% emissione neutrone, 63% emissione protone
23,330 MeV	5,01 MeV	47% emissione neutrone, 53% emissione protone

Fonte: Nudat 2, <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>

Il raggiungimento del livello 21,010 MeV è da considerarsi trascurabile rispetto agli altri due.

Il raggiungimento del livello base dell'elio4 tramite l'emissione di un quanto di radiazione gamma è proibita (proibito anche nella fisica nucleare non vuol dire che non succede. Anche la fisica nucleare distingue tra proibito e impossibile). Viene stimato che avviene in meno di uno su un milione di casi.

Dalla reazione di due nuclei di deuterio quindi nasce in prevalenza trizio e un po' di meno elio3.

6.4 Dalla reazione deuterio - elio 4 nascerebbe il litio 6, se ci fosse

Ma nel sole il litio 6 praticamente non c'è. Un controllo del calore di questa reazione ha come risultato che questa reazione sarebbe endotermica. La stabilità dei nuclei di partenza, deuterio e elio 4 è superiore a quella del litio 6. Questa reazione non c'è.

7. Le reazioni degli isotopi dell'elio e del litio

Il nucleo del sole è composto circa al 40% da elio 4. Poi ci sono tracce di elio 3. L'elio 4 non viene eliminato da nessuna reazione nucleare, l'elio 3 c'è perché viene eliminato solo lentamente, si trova anche sulla superficie del sole e nel vento solare e quindi sulla superficie lunare.

Le reazioni nucleari dei due isotopi dell'elio:

Fusione tra due nuclei di elio 3

Fusione tra un nucleo di elio 3 con uno di elio 4, le reazioni seguenti sono le reazioni degli isotopi del litio

Fusione tra due nuclei di elio 4

Cattura di un elettrone da parte di un nucleo di elio 3

L'integrale sulla finestra Gamow per la fusione $\text{He3} - \text{He3}$ è di $1,8 \times 10^{-16}$, per la fusione $\text{He3} - \text{He4}$ è di $4,7 \times 10^{-18}$. La finestra di Gamow per $\text{He3} - \text{He4}$ sta in mezzo. Questi valori sono indici di una reattività scarsa.

7.1 La fusione tra due nuclei di elio 3

Dalla fusione di due nuclei di elio 3 nasce un nucleo intermedio di berillio 6. Questo è una novità. Il nucleo intermedio di berillio 6 fino a poco tempo fa era ignoto. Con un tempo di dimezzamento di 5×10^{-21} secondi questo nucleo decade con l'emissione di due protoni. Resta un nucleo di elio 4. Tradizionalmente la reazione veniva scritta in maniera che la fusione tra due nuclei di elio 4 porta direttamente all'elio 4 e a due protoni. Attualmente la ricerca sta cercando livelli eccitati del berillio 6 che potrebbero entrare in risonanza nella fusione $\text{He3} - \text{He3}$.

La fusione $\text{He3} - \text{He3}$ è argomento di ricerca del progetto LUNA (sotto il Gran Sasso).

7.2 La fusione tra elio 3 e elio 4

Dalla fusione tra elio 3 e elio 4 nasce il berillio 7. In questa reazione avanza un'energia di 1,584 MeV. Il berillio 7 ha livelli eccitati a 0,429 MeV e a 4,57 MeV (Nudat2). Nessuno di questi livelli eccitati può essere raggiunto direttamente nella fusione. Ci vuole una simultanea emissione di un quanto di raggi gamma. Questo riduce notevolmente la probabilità di questa fusione ed è una causa per la presenza di elio 3 nel sole.

Il nucleo che nasce, il berillio 7, è famoso nella fisica nucleare. È instabile, fa un decadimento beta più e diventa litio 7. Il dislivello energetico tra berillio 7 e litio 7 è di 0,861 MeV. Il tempo di dimezzamento è di 53,22 giorni – in condizioni terrestri normali. Il decadimento avviene unicamente tramite la cattura di un elettrone. Il berillio 7 è uno dei pochissimi nuclei in cui è possibile modificare la semivita del decadimento. Normalmente il questo nucleo cattura uno degli elettroni più interni del guscio di elettroni. Se all'atomo si tolgono gli elettroni, cioè si ionizza totalmente, il nucleo non è più in grado di catturare un elettrone e diventa stabile (Nel GSI, a Darmstadt, in Germania, possono mettere in cerchi di stoccaggio elementi con qualsiasi tipo di ionizzazione).

Il tempo di dimezzamento del berillio 7 nel sole potrebbe essere molto diverso da quello misurato sulla terra. La densità di elettroni nel sole è molto più alta e gli elettroni non sono legati. Sulla terra l'elettrone da catturare ha un'unica energia, fissa e molto precisa. Gli elettroni nel centro del sole hanno una distribuzione termica di energie. Il numero di "canali" di reazione è estremamente più alto.

Il berillio 7 con la cattura di un elettrone e la emissione di un neutrino si trasforma in litio 7.

7.3 Le reazioni nucleari del litio 7 e del litio 6

Litio 7 sul sole praticamente non c'è. Perché? Viene subito eliminato, reagisce con i protoni.

La finestra di Gamow per la fusione tra il litio 7 e un protone: Integrale sulla finestra di Gamow: $3,176 \times 10^{-11}$. La finestra di Gamow è molto meno aperta di quella per la reazione tra due protoni (0,000178). La reazione nucleare invece è favorita: L'energia di reazione è di 16,617 MeV, il nucleo creato di berillio 8 ha un livello eccitato a 16,626 MeV, largo 0,108 MeV. La reazione tra litio 7 e un protone avviene in condizioni di "risonanza" perfetta. Il nucleo di berillio 8, sconosciuto fino a poco tempo fa, è instabile: Con un tempo di dimezzamento di $6,7 \times 10^{17}$ secondi si spezza in due nuclei di elio 4.

Il litio 6 invece nel centro del sole non può reagire con i protoni. La reazione consumerebbe energia invece di produrla. L'energia termica nel sole è insufficiente per fornire l'energia necessaria. Il litio 6 viene distrutto da un altro processo: Il litio è molto efficace nell'assorbimento di neutroni. La sezione di interazione del litio 6 per neutroni termici è di 941 barn. Per confronto: Anche i protoni assorbono neutroni, la sezione per l'assorbimento di neutroni termici è di 0,332 barn. Un nucleo di litio 6 assorbe neutroni come 2834 nuclei di idrogeno. L'eccesso di energia in questa reazione è di 5,8103 MeV. Il nucleo di litio 7 ha un livello eccitato a 6,680 MeV, largo 0,88 MeV, che viene raggiunto in questa reazione. Anche questa reazione avviene in risonanza, senza l'intervento di un'interazione debole o elettromagnetica. Il livello eccitato del litio 7 a 6,680 MeV non fa emissioni gamma, non si raggiunge il livello base del nucleo. Invece il nucleo di litio 7 eccitato a questa energia si spezza in due: In un nucleo di elio 4 e un nucleo di trizio. Con questa reazione il trizio viene prodotto anche sulla terra.

Le reazioni dei due isotopi del litio sono preferenziali rispetto alla reazione tra due nuclei di idrogeno. In una stella come il nostro sole, quando nasce, prima che si innesca la reazione tra i protoni, si innescano le reazioni tra litio 7 e protoni e litio 6 e neutroni. Da dove vengono i neutroni: Il trizio nato dal litio 6 successivamente fa una fusione con un deutero con l'emissione di un neutrone.

7.4 La fusione tra due nuclei di elio 4

Dalla fusione di due nuclei di elio 4 nasce un nucleo di berillio 8. Da due nuclei molto stabili ne nasce uno non stabile (tempo di dimezzamento: $6,7 \times 10^{17}$ secondi. Decade in due nuclei di elio 4). Questa fusione non produce energia, ma ne consuma.

Ci sono due punti di vista divergenti su questo tipo di fusione:

L'astrofisica sostiene che fusioni endotermiche non possono esistere.

La fisica nucleare dice che funzionano, premesso che l'energia necessaria venga fornita, per esempio o con un acceleratore o come energia termica.

Il nucleo berillio 8 ancora nel 1995 era considerato inesistente (Karlsruher Nuklidkarte, edizione 1995). Nel 2005 era conosciuto.

La fusione tra due nuclei di elio 4 richiede un'energia di 93,2 keV. A 15 milioni di gradi la probabilità che una coppia di nuclei abbia un'energia uguale o superiore a questa (fattore di Boltzmann) è di 5×10^{-32} . La finestra di Gamow ha un massimo a 20 keV. A 93,2 keV la finestra di Gamow non c'è. Il sole è troppo freddo per questa reazione.

La cosa cambia nelle giganti rosse, cioè stelle che nel centro hanno esaurito l'idrogeno e bruciano l'elio. Le temperature sono dieci volte più alte. Adesso il fattore di Boltzmann è di $7,4 \times 10^{-4}$. L'energia necessaria per la fusione tra due nuclei di elio 4 si trova nell'energia termica.

A cosa serve se il nucleo di berillio 8 nel giro di $6,7 \times 10^{-17}$ secondi decade in due nuclei di elio 4? Tutto come prima?

No. In questi $6,7 \times 10^{-17}$ secondi c'è una possibilità che il nucleo di berillio 8 fa una fusione con un ulteriore nucleo di elio 4. Questo è la nascita del carbonio 12, che avviene nelle giganti rosse.

L'astrofisica sostiene che si tratta di una fusione simultanea di tre nuclei di elio 4. Si evita così la fusione endotermica. Ma questo processo è di ordini di grandezza meno probabile del processo attraverso il nucleo di berillio 8.

7.5 La cattura di un elettrone da parte di un nucleo di elio3

Il trizio fa una decadimento beta meno e diventa elio 3. (Per trovare l'elio 3 non c'è bisogno di andare sulla luna. Il trizio, usato negli anni sessanta per la produzione di bombe termonucleari, nel frattempo per la maggior parte si è trasformato in elio3.)

La caratteristica di questo decadimento beta meno:

Energia, divisa tra l'energia cinetica dell'elettrone e dell'antineutrino: 18,6 keV

Emivita 12,32 anni.

Questa reazione può essere invertita in vari modi.

Uno è: Cattura di un elettrone da parte di un nucleo di elio 3 e emissione di un neutrino. In questo caso occorre fornire, come energia cinetica dell'elettrone, un'energia da 18,6 keV in su. Nella distribuzione delle energie termiche nel sole, a 15 milioni di gradi, questa energia c'è. Il fattore di Boltzmann, che dice quale è la parte delle particelle che hanno un'energia superiore a questa, è di $5,64 \times 10^{-7}$. La reazione di cattura di elettroni (normalmente non considerata nell'astrofisica) da parte dell'elio 3 all'interno del sole c'è. E' un modo in cui nasce il trizio.

8. Ipotesi di reazione di antineutrini con elio 3

Nel capitolo nr. 7 delle reazioni nucleare nel sole è stata trattata l'inversione del decadimento beta meno del trizio. In quel caso il nucleo di elio 3 assorbe un elettrone con un energia uguale o superiore a 18,6 keV e emette un neutrino con l'eventuale eccesso di energia.

C'è un ulteriore modo di inversione della reazione (ancora più "eretico", cioè non considerato dall'astrofisica attuale):

La cattura simultanea di un elettrone e di un antineutrino. Questo processo sulla terra è talmente raro che non può essere osservato. L'elettrone da assorbire è sempre un elettrone legato al nucleo dell'elio 3 e l'energia dell'antineutrino dovrebbe essere il complimento di questa energia. Antineutrini con l'energia necessaria sono quindi una parte infinitesimale dello spettro degli antineutrini. Dal tempo di decadimento del trizio in elio 3 è possibile calcolare con la relazione di Heisenberg quanto è la parte dello spettro che può essere assorbita.

Nel sole le condizioni sono diverse. Gli elettroni non hanno un'unica energia, ma dimostrano una distribuzione termica di energie, che vanno anche oltre l'energia che corrisponde al dislivello energetico di 18,6 keV tra trizio e elio3. L'antineutrino deve portare l'energia complementare all'energia dell'elettrone. Gli antineutrini con energie tra 0 e 18,6 keV possono essere assorbiti.

Nel sole, ogni volta che un protone si trasforma in un neutrone, può essere emesse un neutrino o assorbito un antineutrino.

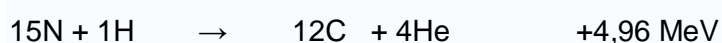
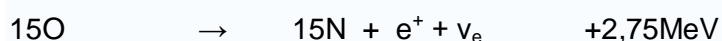
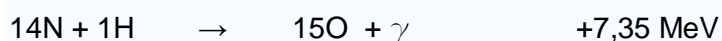
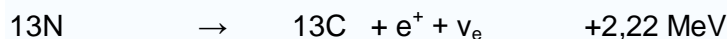
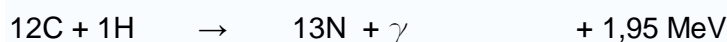
Il numero di neutrini osservati provenienti dal sole è inferiore rispetto al numero di protoni trasformati in neutroni. L'attuale spiegazione di questo fenomeno è che i neutrini elettronici si trasformano in neutrini muonici e tau e che quindi i sensori usati non li possono vedere. (http://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino_oscillations). Una spiegazione notevolmente più semplice sarebbe che quelli non osservati non sono mai nati, o almeno in parte.

Nel capitolo 5 è stato spiegato da dove vengono tutti questi antineutrini.

Una valutazione quantitativa del fenomeno dell'assorbimento simultaneo di elettroni e antineutrini dovrebbe essere possibile. C'è qualcuno capace di farlo?

9. Il ciclo Bethe – Weizsäcker oppure CNO

Hans Bethe e Carl Friedrich von Weizsaecker (fratello del ex presidente della Repubblica Federale Tedesca) hanno elaborato indipendentemente il ciclo CNO:



Hans Bethe, tedesco emigrato nel 1933 a causa delle leggi razziali, era il capo del gruppo teoria del progetto Manhattan che nella seconda guerra mondiale ha sviluppato la bomba a fissione.

Carl Friedrich von Weizsaecker aveva l'incarico di sviluppare la bomba a fissione nel Terzo Reich. Lui di seguito diceva che non era possibile per mancanza di risorse e che era contento così. Ha negato la versione che lui avrebbe sabotato questo sviluppo.

Qualche analisi delle reazioni:

9.1 la fusione $12\text{C} + 1\text{H}$

L'integrale sulla finestra di Gamow a 15 milioni di gradi è di $2,544 \times 10^{-18}$. Per confronto: L'integrale sulla finestra di Gamow per la reazione di fusione tra due nuclei di elio 3 è di $1,06 \times 10^{-14}$.

L'esotermia: 1,95 MeV

Il nucleo che nasce, il 13N , ha il primo livello eccitato a 2,3649 MeV, largo 31,7 keV. Dalla reazione questo livello eccitato non può essere raggiunto, l'energia (esotermia) è insufficiente. Si raggiunge direttamente lo stato fondamentale del azoto 13. Questo riduce ulteriormente la reattività, perché simultaneamente l'energia in eccesso dev'essere consumata con l'emissione di un quanto gamma, cioè un'interazione elettromagnetica.

Al ciclo Bethe Weizsaecker si attribuisce lo 1,7% della produzione dell'energia del sole. Come questo è stato calcolato è introvabile.

9.2 Il decadimento beta del azoto 13

L'azoto 13, nato dalla fusione carbonio 12 + idrogeno, fa un decadimento beta più, con l'emissione di un positrone e un neutrino. L'azoto 13 si trasforma in carbonio 13. Dimezzamento in condizioni terrestri: 10 minuti.

In condizioni terrestri un solo modo di decadimento beta è osservabile: L'emissioni di un positrone e di un neutrino. Il nucleo di azoto 13 invece di emettere un positrone potrebbe assorbire anche un

elettrone. L'elettrone disponibile è un elettrone interno (1s) dell'atomo. La sua energia è precisamente determinata. Il numero di canali del decadimento "normale" è talmente superiore che la cattura di un elettrone non può essere osservata. Nel centro del sole la densità di elettroni in confronto a quella terrestre è alta e la loro energia è termica. Gli elettroni non sono legati. La probabilità di cattura di un elettrone può essere superiore per svariati ordini di grandezza.

C'è un ulteriore modo di decadimento beta non considerato normalmente:

La cattura simultanea di un elettrone e di un antineutrino. Anche questa reazione sulla terra non è osservabile. Il numero di "canali" di reazione è piccolissimo. Nel sole invece questo numero di "canali" di reazioni è alto. Questo tipo di decadimento potrebbe essere una delle cause dei neutrini solari in numero troppo piccolo. Ogni volta che viene assorbito un antineutrino, manca un neutrino.

Questo decadimento beta nel sole è più veloce che sulla terra.

9.3 La fusione $^{13}\text{C} + ^1\text{H}$

L'integrale sulla finestra di Gamow: $2,33 \times 10^{-18}$. Esotermia: 7,54 MeV

Anche in questa fusione non è raggiungibile un livello eccitato del azoto 14. Procede con l'emissione di un quanto gamma verso un livello inferiore a 7,54 MeV. Tutti questi livelli decadono con l'emissione di quanti gamma verso lo stato fondamentale dell'azoto 14.

9.4 La fusione $^{14}\text{N} + ^1\text{H}$

L'integrale sulla finestra di Gamow: $1,98 \times 10^{-20}$. Un po' piccolo. Si vedono la repulsione elettrostatica maggiore e l'effetto tunnel più modesto. Esotermia: 7,35 MeV

Nasce un nucleo di ossigeno 15. Non c'è alcun livello eccitato in corrispondenza con l'energia liberata dalla reazione. Tramite l'emissione di un quanto gamma livello di energia inferiore sono raggiungibili, che decadono tutti verso lo stato fondamentale dell'ossigeno 15.

9.5 Il decadimento beta del ossigeno 15

L'ossigeno 15 è un nucleo usato in medicina nucleare. Emette positroni e neutrini. I positroni si annientano immediatamente con elettroni dell'ambiente. Nascono due quanti gamma con 511 keV ciascuno che vanno in direzioni esattamente contrapposte.

La semivita dell'ossigeno 15 in condizioni terrestri è di 122,4 secondi. Diventa azoto 15.

Il decadimento beta più con l'emissione di un positrone trova sempre la concorrenza del assorbimento di un elettrone. L'assorbimento di elettroni sulla terra diventa visibile nelle condizioni in cui l'emissione di un positrone diventa impossibile per mancanza di energia. Se l'emissione del positrone è possibile, l'energia di questo copre tutto lo spettro dell'energia disponibile, mentre l'assorbimento di un elettrone è possibile con un'unica energia precisa, quello dell'elettrone legato.

Nel sole c'è da aspettarsi un assorbimento di elettroni molto più efficace. Il tempo di dimezzamento dell'ossigeno 15 nel sole sarà più breve del tempo terrestre.

C'è un'ulteriore possibilità: anche in questo caso invece dell'emissione di un neutrino, il nucleo può catturare un antineutrino.

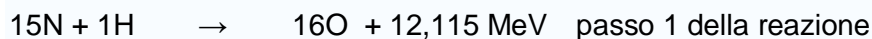
9.6 La fusione del N15 con un protone

Tradizionalmente questa reazione è scritta così:

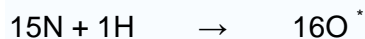


Come se si trattasse di una reazione diretta. Un errore storico. Il nucleo intermedio è ossigeno 16. Era inconcepibile che il nucleo di ossigeno 16, uno dei più stabili, facesse un decadimento alfa esclusivo. Invece è proprio così.

La reazione è da riscrivere:



Oppure



16O^* significa che viene popolato un livello eccitato dell'ossigeno 16. Questo livello si trova a 11,6 MeV ed è largo 0,8 MeV. La reazione di fusione tra azoto 15 e idrogeno 1 avviene in risonanza. Cammina.

Il livello eccitato 11,6 MeV dell'ossigeno 16 è un 3-(3 è l'impulso di rotazione, "meno" sta per la parità, una particolarità della funzione d'onda del nucleo). Significa che il nucleo gira veloce. L'impulso rotativo è di tre unità. Non può decadere con l'emissione di un quanto gamma verso lo stato fondamentale dell'ossigeno (è proibito, ma non impossibile). Potrebbe decadere con una cascata di due o tre emissioni gamma verso questo stato fondamentale. Invece fa un decadimento alfa verso il carbonio 12. Si può scrivere il secondo passo della reazione:



Questa reazione può popolare il livello base del carbonio 12 oppure il primo livello eccitato a 4,439 MeV

In tutt'e due i casi l'eccesso di energia va in energia cinetica dei nuclei creati, soprattutto nella particella alfa (= nucleo di elio4).

Nel ciclo Bethe Weizsaecker il carbonio 12 viene "riciclato", fa da catalizzatore. La sua concentrazione nel centro del sole dovrebbe restare costante.

Però:

La concentrazione di carbonio 12 sulla superficie del sole: 3 ppm

Carbonio 12 su giovè: tre volte tanto

Ossigeno 16 su giovè: trenta volte di meno rispetto al sole

Probabilmente al centro del sole la concentrazione del carbonio 12 è ancora più basso. Basato sull'assunzione che le concentrazioni degli elementi su Giove siano uguali a quelle del sole prima dell'innesco delle reazioni nucleari.

Il carbonio nel sole si è consumato. Si è trasformato in ossigeno 16. Come?

La transizione dal nucleo eccitato 11,6 MeV dell'ossigeno verso lo stato fondamentale dell'ossigeno 16 è solo proibita, ma non impossibile. Tanto rara che sulla terra non è stata osservata. Ma nel sole nel giro di 4,6 miliardi di anni questa transizione può aver consumato del carbonio 12.

Ci sarebbe un altro modo per eliminare il carbonio 12:

La fusione tra carbonio 12 e elio 4. Risultato ossigeno 16. L'integrale sulla finestra di Gamow per questa reazione a 15 milioni di gradi è di $1,001 \times 10^{-43}$. Questo significa che nel sole questa reazione non c'è. Ma nelle stelle più grandi e più calde del sole si trova.

Conclusione: Dalle differenze di presenza di carbonio 12 e ossigeno 16 tra Giove e il sole si possono trarre due conclusioni: Il ciclo Bethe Weizsaecker funziona ed ha un "buco". Il riciclo del carbonio 12 non è perfetto. Trasforma una piccola parte in ossigeno 16.

Elmar Pfletschinger

Febbraio 2011