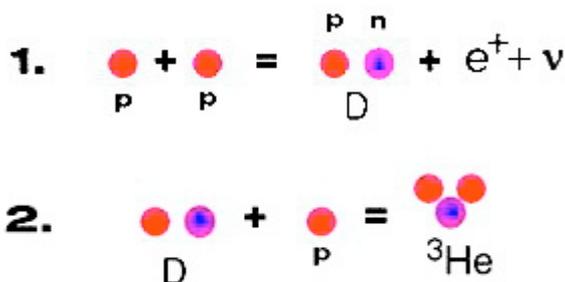


## Verso la Sequenza Principale (11/11/09)

Bruciati il Deuterio (con una breve fermata della contrazione) e il Litio (senza fermarsi perché ce n'è proprio poco) ormai bisogna cominciare a prendere in considerazione la catena Protone – Protone.

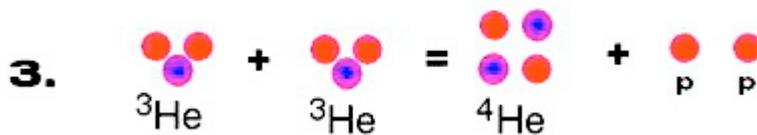
Continuando a contrarre e riscaldarsi al centro, la stella raggiunge via via temperature sempre più alte. Quando giunge a circa 5 milioni di gradi, Comincia lentamente ad attivarsi la prima di queste reazioni e, immediatamente dopo, la seconda.



Ragioniamoci sopra con calma, perché c'è un trucco da capire. Le collisioni “vicine” tra due protoni, a quelle temperature, sono frequentissime, specie considerando che la densità è ormai superiore a quella dell'acqua. Con il termine “vicine” intendo parlare di collisioni tali per cui le due particelle si avvicinano abbastanza da entrare nella regione in cui è attiva la codina della forza nucleare di colore. Come mai ogni collisione non porta a un qualche genere di fusione? La risposta la sappiamo: perché la forza di repulsione elettrostatica tra i due protoni supera, anche se di poco, la forza attrattiva nucleare, e dunque non si forma un nucleo legato. Affinché ciò avvenga, occorre che, durante il brevissimo istante della collisione, scatti anche la forza nucleare debole, che trasforma uno dei due protoni in neutrone, dando così luogo al nucleo di Deuterio, che è stabile. Questo processo, però, è rarissimo, in quanto richiede che due quark, appartenenti a due protoni diversi, passino a una distanza ravvicinatissima tra loro; più o meno un millesimo del raggio di un protone. Allora, e solo allora, può scattare la forza nucleare debole, e si ha la trasformazione. Si noti come, nella reazione, venga emesso anche un elettrone positivo (antiparticella) e un neutrino (particella) per conservare sia la carica elettrica, sia il numero totale di particelle / antiparticelle.

È da notare una curiosità di tipo “antropico”: se la forza nucleare di colore fosse stata solo del 10% maggiore, la coppia protone – protone sarebbe stata stabile e, dunque, ogni collisione avrebbe creato un nucleo di  ${}^2\text{He}$  già all'epoca del Big Bang, per cui oggi non ci sarebbero stelle che possono erogare energia per lungo tempo. Infatti, l' ${}^2\text{He}$ , durante i primi tre minuti, si sarebbe fuso immediatamente con altri, generando elementi sempre più pesanti. Dunque, niente Idrogeno, e niente reazioni nucleari. Le stelle sarebbero state sfere di puro Ferro e, tutt'al più, contraendosi oltre ogni limite, avrebbero dato luogo a esplosioni di supernova, ma non certo all'erogazione di energia stabilmente, per tempi lunghi.

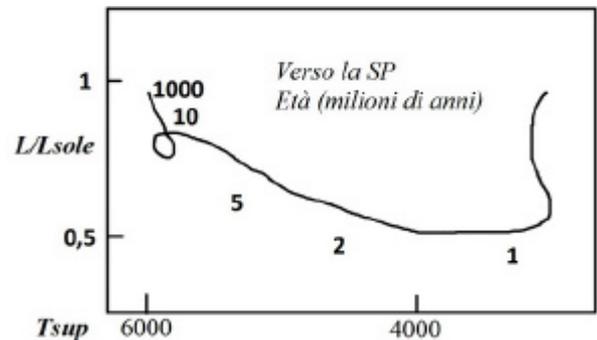
Quando si forma un nucleo di Deuterio, questo reagisce immediatamente col primo protone che gli capita dando luogo ad  ${}^3\text{He}$ . Infatti, se questa reazione è efficiente già a un milione di gradi, a queste temperature diventa circa  $10^{16}$  volte più rapida di quella tra i due protoni e, dunque, nella stella in fase di accensione comincia ad accumularsi  ${}^3\text{He}$ . Bisogna arrivare almeno a 8 – 10 milioni di gradi perché anche l' ${}^3\text{He}$  cominci a bruciare con sé stesso, secondo la terza delle reazioni che vediamo nella figura 3. Infatti, la carica elettrica di questo nucleo è doppia di quella dell'Idrogeno, e dunque bisognerà superare una barriera di potenziale elettrostatico maggiore; per farlo occorrerà più energia cinetica, e dunque una temperatura maggiore. Tra l'altro, non è solo questione di temperatura: affinché ci sia una probabilità significativa che questa reazione abbia luogo, occorre che si sia formata una quantità di  ${}^3\text{He}$  sufficiente. Nel caso del Sole, prima che la reazione prenda il via, al centro si raggiunge una concentrazione di  ${}^3\text{He}$  pari a circa l'1%.



Come si vede, di tutte queste reazioni, solo la prima ha richiesto l'intervento della forza nucleare debole; tutte le altre richiedono la sola forza nucleare di colore. L'energia liberata in questo modo è in piccola parte persa dal neutrino che scappa via, ma tutte le altre reazioni liberano la loro energia sotto forma di raggi  $\gamma$ . Questi entrano immediatamente in collisione con gli elettroni e i protoni circostanti, e scaldano la materia, per cui la stella deve ricorrere sempre meno alla contrazione gravitazionale per scaldarsi e tenere alta la pressione.

Quando c'è un bilancio sostanziale tra l'energia liberata dalla superficie sotto forma di radiazione, e l'energia che viene fuori, al centro, dalle reazioni nucleari, la stella non deve più contrarre affatto, e comincia la lunga fase della Sequenza Principale. Ma vediamo cosa succede al Sole nel diagramma HR. Abbiamo detto che l'inizio delle reazioni di fusione p – p ha luogo a circa 5 milioni di gradi. Nel diagramma, ciò avviene quando la stella ha circa 2 milioni di anni. Quando la stella raggiunge i 5 milioni di anni, già la fusione dell'Idrogeno contribuisce per circa il 10%

all'energetica globale, e dunque il restante 90% deve venire ancora dalla contrazione. A 8 milioni di anni il contributo della fusione sale al 50%, dopodiché s'incontra uno strano cappio nel diagramma HR. Lo vedremo la prossima volta, perché ha a che fare con il ciclo CNO, sebbene nel Sole questo ciclo contribuisca, al momento attuale, solo per il 2% al bilancio energetico. Quando l'età del Sole è circa 10 milioni di anni, la sua temperatura centrale sale a 13 – 14 milioni di gradi e, a quel punto, anche le reazioni  $^3\text{He} + ^3\text{He}$  sono ormai rapidissime, e la catena protone – protone è ormai completa. Essa contribuisce alla luminosità della stella per il 100%, la contrazione si arresta completamente, e per questo motivo la posizione della stella nel diagramma HR si ferma. La distanza tra il punto in cui il Sole aveva solo 10 milioni di anni, e quello in cui ha un miliardo di anni, è irrilevante. Il lentissimo movimento residuo è dovuto al fatto che, al centro, la composizione chimica cambia; via via che si brucia Idrogeno si accumula Elio, e perciò la struttura della stella si modifica col tempo. Questa modifica, causa il lentissimo movimento lungo la Sequenza Principale. Quando il Sole cominciò a bruciare, al centro aveva circa il 70% d'Idrogeno; oggi ce n'è rimasto solo il 35%.



Domanda: è tutto campato per aria, o ci sono riscontri osservativi a questi discorsi? La risposta è che i riscontri ci sono: si vede perfino lo stop dovuto al bruciamento del Deuterio. A volte non tutto è ancora a posto, come per la frazione di  $^7\text{Li}$  che si vede alla superficie del Sole (due o tre volte di più), ma anche in quei casi si hanno buoni indizi su dove cercare.

Altra domanda: quali sono i neutrini solari che si vedono nei telescopi a neutrini? Quelli della prima reazione? Solo in parte, e li vedremo la prossima volta in un salotto dedicato appositamente a questo argomento. Tra l'altro, i neutrini permettono di eseguire osservazioni dirette del centro del Sole!