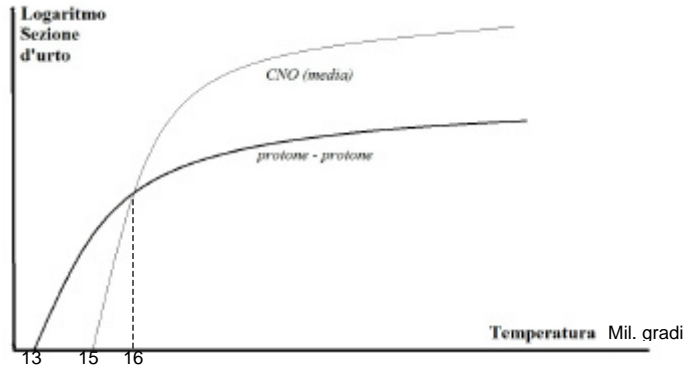


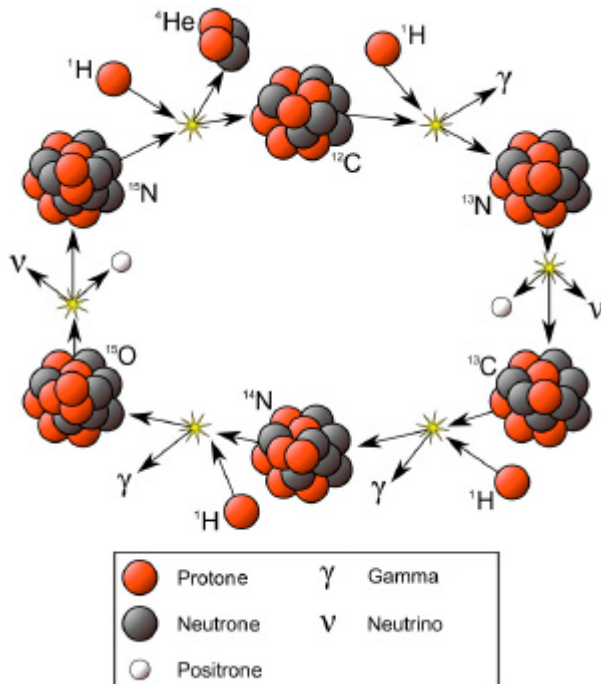
Il ciclo CNO – I parte (16/12/09)

Veniamo finalmente al ciclo CNO. Per introdurlo, dobbiamo parlare un po' delle sezioni d'urto. Queste sono "finzioni matematiche" che corrispondono alla "superficie utile" di un nucleo per una certa reazione, posto che ci sia una distribuzione di velocità dei nuclei in equilibrio termico. In realtà, quest'area "equivalente" cambia di molti ordini di grandezza al cambiare della temperatura, e quindi è opportuno considerarla come una pura e semplice "probabilità di reazione", svincolata dal concetto di area. Nella figura accanto, vediamo come variano le sezioni d'urto per la reazione protone – protone, e per la prima delle CNO, la $^{12}\text{C} + ^1\text{H}$, al variare della temperatura, considerando che la scala verticale è logaritmica, e dunque il tratto mostrato copre una ventina di ordini di grandezza.



Come si vede, a temperature basse sale per prima la reazione protone – protone ma, appena un po' più in alto (attorno a 17 milioni di gradi), la sezione d'urto della reazione $^{12}\text{C} + ^1\text{H}$ scatta più in alto di diversi ordini di grandezza. Così, a causa della ripidità della curva, in un brevissimo intervallo di masse stellari si passa da stelle dominate dalla reazione protone – protone a quelle dominate dal CNO. Nella figura accanto vediamo il ciclo CNO completo a bassa temperatura (ce ne sono diversi, a temperature sempre più alte, via via che si attivano altre reazioni, e li vedremo nei prossimi salotti), e possiamo esaminarlo in dettaglio. In primo luogo, soffermiamoci sulla reazione $^{13}\text{C} + ^1\text{H}$. Questa è di gran lunga la più veloce di tutte. Così veloce che è addirittura più veloce della protone – protone, e infatti è la responsabile del piccolo cappio che, se ricordate, abbiamo visto nel diagramma **HR** all'inizio della Sequenza Principale. Cosa succedeva? Che la materia di cui era composto il Sole, conteneva del ^{13}C in piccola quantità, ereditato dalla supernova che aveva dato

inizio alla formazione del Sole. Questo ^{13}C , a temperatura di circa 9 – 10 milioni di gradi, cominciava a fondere rapidamente coll'Idrogeno, dando luogo a ^{14}N e a molta energia. La struttura scopriva all'improvviso di avere al centro una enorme generazione di energia, la contrazione si fermava e, anzi, la stella si espandeva un po', causando un relativo ritorno indietro nel diagramma **HR**. Ma siccome il ^{13}C era poco, la cosa durava 1 – 2 milioni di anni, e poi finiva; la stella riprendeva a contrarre come se niente fosse stato, e alla fine si innescavano completamente le reazioni protone – protone.



decade nel ^{13}C il quale, quasi immediatamente, succhia un protone e si trasforma in ^{14}N . Quest'ultimo nucleo ha una sezione d'urto molto bassa e, quindi, reagisce molto lentamente,

almeno a queste temperature. Dunque, si ha un accumulo di ^{14}N ; praticamente tutti gli elementi del ciclo CNO si trasformano in ^{14}N , per cui le loro abbondanze diminuiscono molto, mentre aumenta quella dell' ^{14}N . Comunque, sebbene lentamente, anche l' ^{14}N reagisce con un protone formando ^{15}O . Pure questo è instabile e, in circa 2 minuti decade in ^{15}N , emettendo un positrone e un neutrino. A sua volta, l' ^{15}N cattura un protone e, emettendo un nucleo di ^4He , si trasforma nuovamente in ^{12}C il quale può riprendere il ciclo. Dunque, mentre le reazioni protone – protone erano una “catena” che, partendo dall' ^1H e costruendo elementi sempre più pesanti, alla fine conduceva all' ^4He , per il CNO si può parlare di vero e proprio “ciclo” in quanto, partendo dal ^{12}C , si costruiscono via via nuclei più pesanti che, però, alla fine emettono pure loro l' ^4He , ma ricreando l'elemento di partenza.

Se fin qui è tutto chiaro, torniamo al grafico delle sezioni d'urto e notiamo una particolarità: quella del CNO è, nella regione in cui si attiva, più “ripida” di quella protone – protone. Come conseguenza, per le stelle che bruciano secondo il ciclo CNO (e cioè per quelle con massa superiore a $1.2 - 1.3 M_{\odot}$), la generazione di energia avviene tutta in una zona ristretta vicinissima al centro, di pochi centesimi della massa stellare, poiché allontanandosi dal centro la temperatura diminuisce, e le reazioni si spengono subito. Invece, nel caso protone – protone, la generazione di energia avviene in una zona più ampia, circa il 15 – 20 % della massa stellare. Questa differenza porta a una conseguenza importante: nelle stelle che bruciano CNO, il flusso di energia nelle zone centrali è elevatissimo e, per trasportarlo verso l'esterno, occorre che la materia entri in ebollizione. Dunque, le stelle di tipo solare non hanno un nucleo convettivo, quelle di massa un po' maggiore, invece, hanno un nucleo convettivo, la cui estensione cresce al crescere della massa della stella.

Anche questa può sembrare una differenza di poco, ma non lo è. Infatti, nel Sole l'Idrogeno centrale non si esaurirà “di botto”, ma gradualmente, e non ci sarà una discontinuità nel momento in cui il massimo del bruciamento si sposterà un po' verso l'esterno, e alla fine il centro si spegnerà del tutto. Nelle stelle con nucleo convettivo, invece, tutto l'idrogeno presente in questo nucleo si esaurirà all'improvviso e, siccome la temperatura al bordo del nucleo di Elio che si è appena formato sarà piuttosto bassa (pochi milioni di gradi), la stella si troverà sbilanciata, senza più energia nucleare, e ricomincerà a contrarre velocemente finché, scaldandosi l'interno, non si potrà accendere la combustione CNO ai bordi del vecchio nucleo di Elio. Questa prima differenza di comportamento si tradurrà in differenze sempre più accentuate nel seguito della vita delle stelle.