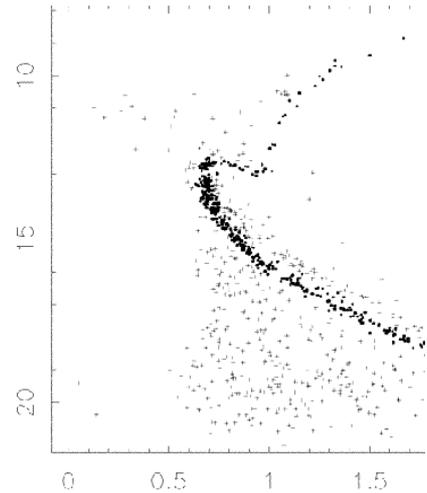


Il bruciamento dell'Elio (27/01/10)

Siamo finalmente giunti al momento in cui, al centro di stelle di tipo solare, e cioè che non hanno mai posseduto un nocciolo convettivo poiché bruciavano Idrogeno secondo la catena protone-protone, l'Idrogeno si va esaurendo. Il bruciamento nucleare, senza soluzione di continuità, comincia ad avere il proprio massimo un po' fuori centro, e in tempi ancora lunghi (decine di milioni di anni) finisce per spegnersi del tutto al centro, e bruciare in un "guscio". Si forma un minuscolo nocciolo di puro Elio, che comincia ad aumentare in massa via via che il guscio di bruciamento vi riversa sopra altro Elio, spostandosi verso l'esterno.

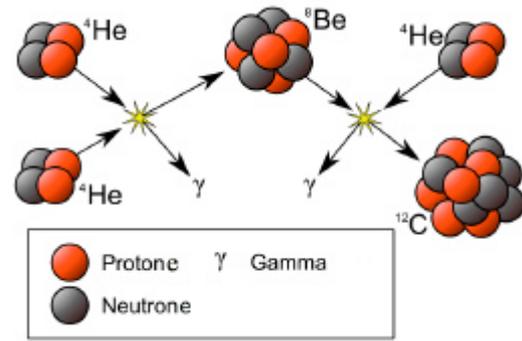
In superficie, questo evento si fa sentire. Il fatto che il picco di generazione di energia si sposti dal centro verso l'esterno, fa espandere gli strati sovrastanti, e la superficie della stella aumenta di raggio, diminuendo di temperatura. Nel diagramma HR, si parla di punto di "Turn Off", come vediamo accanto, per l'ammasso aperto **M67**, nel quale si trovano oggi al Turn Off proprio stelle di massa solare o poco superiore. Sugli assi sono riportati: l'indice di colore B-V (ascisse) e la magnitudine visuale V(ordinate). Come si vede, l'uscita dalla Sequenza Principale è delineata chiaramente.



Il piccolo nocciolo di Elio, alle temperature (circa 20 milioni di gradi) e densità (circa 10.000 g/cc) locali, non si comporta come un plasma normale, ma è "degenere". Ciò vuol dire che la maggior parte del contributo alla pressione è dato dagli elettroni, e la loro distribuzione in energia cinetica segue la statistica di Fermi, nella quale la pressione è determinata solo dalla densità, e non dalla temperatura. Ciò comporta che, pure se il nocciolo si raffreddasse fino allo zero assoluto, il profilo di equilibrio della pressione sarebbe mantenuto. Questo nocciolo, dunque, non contrae per riscaldarsi e mantenersi in equilibrio, come fanno le stelle normali in assenza di energia nucleare, ma si stabilizza e, via via che gli piove altro Elio sopra, aumenta lentamente di temperatura e densità, mantenendosi però di dimensioni lineari più o meno costanti. Dunque, il bruciamento continua a spostarsi sempre più verso la superficie, gli strati esterni si raffreddano ma, oltre un certo limite, non possono più raffreddare. Il limite è dato dal momento in cui, da un livello pochissimo sopra al guscio di bruciamento, fino alla superficie, la stella diventa tutta convettiva. Nel diagrammino di **M67**, il punto è ben delineato dal fatto che le stelle che si stavano spostando verso destra (temperature sempre più basse), all'improvviso cominciano a girare verso l'alto, e s'inerpicano per il "Ramo delle Giganti". Per motivi strutturali non banali da spiegare, e sui quali sorvoleremo, è come se la convezione rappresentasse una sorta di vincolo rigido aggiuntivo: se la stella vuole diminuire ancora di più la propria temperatura superficiale e gonfiarsi per rispondere all'avvicinarsi del bruciamento alla superficie, può farlo solo aumentando contemporaneamente di luminosità. Questo "muro" invalicabile nel diagramma HR prende il nome di "Traccia di Hayashi". Dunque, il guscio di bruciamento aumenta di temperatura e densità per produrre sempre più luminosità, e il nocciolo di Elio cresce rapidamente di massa, aumentando sempre in temperatura e densità, ma mantenendosi degenere. Gli strati esterni della stella sono sempre più tenui, e cominciano a evaporare con velocità crescente. Una stella come il Sole, in questa fase, può perdere tranquillamente al 40% della propria massa.

Alla fine, la temperatura nel nocciolo di Elio raggiunge i 100 milioni di gradi, mentre la densità può essere circa 1 milione di volte quella dell'acqua. La degenerazione è sempre presente, ma a questo punto comincia il bruciamento dell'Elio. Sappiamo che due nuclei di Elio possono, per breve tempo, unirsi sotto forma di nucleo di ${}^8\text{Be}$ il quale, sfortunatamente, è instabile e si scinde rapidamente nei due nuclei costituenti. È però possibile che, durante la breve vita del ${}^8\text{Be}$, questo

collida con un terzo nucleo di Elio, formando il ^{12}C , e questo è stabile. Affinché ciò avvenga è necessario che la temperatura sia così alta da fornire ai nuclei l'energia cinetica necessaria a oltrepassare la barriera di energia elettrostatica, ma anche che la densità sia così alta da rendere probabile un "urto a tre".



Prima di procedere col racconto delle fasi evolutive della stella, vale però la pena di raccontare un aneddoto, poiché questo sembra rappresentare la prima e, finora, unica applicazione del cosiddetto "Principio Antropico" a una scienza qualsiasi.

Nei primi anni '50, Fred Hoyle, dalla semplice constatazione che nell'universo esiste il Carbonio, cercò di calcolare come si potesse formare. Purtroppo, il processo che abbiamo appena delineato sarebbe stato lentissimo, anche perché si pensava che la vita del ^8Be fosse molto più breve di quanto sia in realtà, e comunque ogni nucleo di Carbonio così prodotto si sarebbe spezzato di nuovo nei costituenti o, nel migliore dei casi, sarebbe stato trasformato immediatamente in Ossigeno per assorbimento di un ulteriore nucleo di Elio, lasciando quindi l'universo senza una sorgente di Carbonio. Tutto ciò, se non si fosse verificata una coppia di coincidenze la cui probabilità era praticamente nulla. La prima, era che il ^8Be si formasse in uno "stato eccitato" tale da allungargli la vita di ordini di grandezza. Solo più tardi, Salpeter riuscì a dimostrare che era proprio così. Ma c'era un altro ostacolo: l'energia liberata dalla fusione **3a** (questo è il nome che si assegna al processo) è circa 7,3 Mev e, come abbiamo già detto, un nucleo di ^{12}C che viene generato con questo eccesso di energia, tende a sua volta a liberarsene spezzandosi nei nuclei costituenti, a meno che ...

A meno che, il nucleo di ^{12}C possieda a sua volta una struttura interna tale, che un suo stato eccitato abbia, per l'appunto, un'energia molto vicina a 7,3 Mev. In questo caso, il nucleo di ^{12}C si formerebbe nello stato eccitato, perfettamente stabile, e poi si libererebbe dell'energia in eccesso emettendo un raggio g con comodo, e ricadendo nello stato fondamentale.

Per farla breve, Salpeter e Fowler cominciarono a tormentare gli sperimentali del California Institute of Technology finché questi ultimi, esasperati, eseguirono nel loro acceleratore un test sul ^{12}C , trovando proprio lo stato eccitato cercato. L'insieme delle due coincidenze, fissa il valore della costante moltiplicativa della forza nucleare entro tre o più cifre decimali; se quest'ultima avesse avuto un valore leggerissimamente diverso, addio Carbonio e addio vita!

L'accensione delle reazioni **3a** all'interno del nocciolo degenerare di Elio segna un punto di non ritorno nella vita della stella. Infatti, le reazioni producono calore, e la temperatura aumenta. La pressione, però, non dipende dalla temperatura, e non aumenta, così il nocciolo non si espande raffreddandosi, fino a stabilizzare il bruciamento. Quest'ultimo, perciò, all'aumentare della temperatura accelera esponenzialmente e, in pochi secondi dalla prima accensione, si ha un'esplosione che genera circa 10^{11} volte la luminosità del Sole: come una supernova. Ma l'esplosione, chiamata "Flash dell'Elio", resta all'interno della stella; riesce finalmente a scaldare il nocciolo fino a farlo uscire dalla degenerazione, farlo espandere e raffreddare, e così tutta questa energia viene assorbita come energia gravitazionale. In superficie non si vede nulla, almeno al momento. Ma, quando il bruciamento **3a** si è stabilizzato, la stella ha doppia sorgente di energia: al centro, come se fosse una Sequenza Principale dell'Elio, e in uno strato esterno, però molto attenuato rispetto a prima, a causa dell'espansione e raffreddamento degli strati esterni. In tempi relativamente brevi (migliaia di anni? I calcoli di questa fase sono difficili), la posizione della stella sulla diagramma HR scende in luminosità e aumenta in temperatura superficiale, fino a stabilizzarsi sul "Braccio Orizzontale". Prima di parlare di questa fase, però, sarà necessario parlare delle stelle che, durante la Sequenza Principale, bruciano CNO al centro, e dunque hanno un nocciolo convettivo. Vedremo tutto la prossima volta.