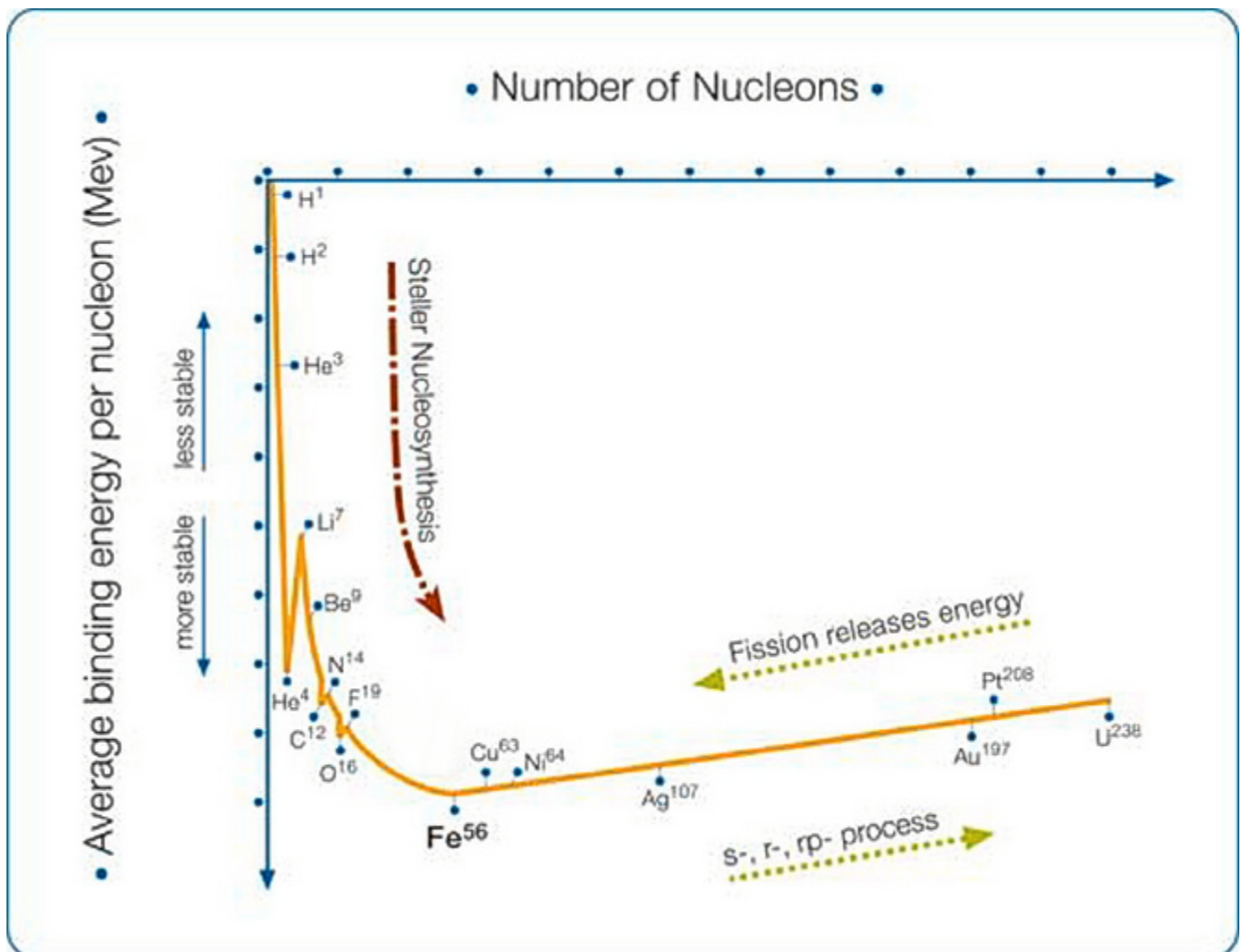


## L'energia dei nuclei atomici (28/10/09)

Avendo capito quali siano i meccanismi in base ai quali protoni e neutroni riescono a stare assieme in un nucleo atomico, e perché esiste una “valle di stabilità” tale per cui i nuclei che hanno troppi protoni o neutroni tendono a “decadere” rotolando via via verso il fondovalle, siamo in grado di affrontare il discorso relativo all'energia interna dei nuclei atomici, e quindi a capire per quale motivo la fusione nucleare produce energia all'interno delle stelle, le supernove scoppiano, e i reattori a fissione producono energia sulla Terra. Introduciamo il concetto di “energia di legame”.

Questa, altro non è che l'energia totale che occorrerebbe spendere per spostare tutti i nucleoni dall'interno di un nucleo atomico fino all'infinito. Chiaramente, più grande è un nucleo, maggiore è quest'energia di legame. Per i nostri scopi è meglio introdurre l'energia di legame “per nucleone” (binding energy per nucleon), e cioè l'energia di legame totale divisa per il numero di nucleoni. Ma incontriamo subito un problema nel definire questa energia per il nucleo dell'atomo d'idrogeno, ovvero per il protone isolato. Quanta energia ci vuole per estrarlo dal nucleo? Zero, ovviamente, e dunque metteremo a zero l'energia del singolo protone, e vediamo come si comportano gli altri nuclei.



In questo diagramma vediamo, sull'asse orizzontale, il numero di nucleoni di ciascun nucleo, dall'idrogeno (H<sup>1</sup>) all'uranio (U<sup>238</sup>), mentre su quello verticale c'è l'energia di legame per ciascun nucleone dove l'idrogeno, come abbiamo detto, fissa lo zero. In un certo senso, possiamo pensare a questo diagramma come al fondovalle della valle di stabilità. Ora, noi sappiamo che ogni sistema fisico tende all'energia minima possibile, e dunque i nuclei più leggeri tenderanno a rotolare (appena le condizioni locali lo consentano, e non è facile) verso il Fe<sup>56</sup>, che è il nucleo più stabile in assoluto, e per fare ciò dovranno fondersi tra loro per aumentare il numero di nucleoni in ciascun

nucleo. In questo gioco perderanno energia, e questo è il motivo per cui la fusione nucleare libera energia all'interno delle stelle. Al contrario, i nuclei più pesanti tenderanno a spezzarsi in nuclei più leggeri (ma anche questo non è banalissimo da ottenere), e in tale processo libereranno energia pure loro, come succede all'interno dei reattori nucleari. Notiamo anche questo: essendo il fondovalle della valle di stabilità in salita, aumentando il numero di nucleoni, da un certo punto in poi la tendenza a "scivolare in giù" frammentandosi aumenterà e, arrivati a nuclei molto grandi, questi ultimi non saranno più "stabili", ma spontaneamente radioattivi, e rotoleranno verso il basso per decadimenti successivi, fino a raggiungere nuclei definitivamente stabili. Così, l' $U^{238}$  è naturalmente instabile e, con una vita media di circa 4 miliardi di anni si trasforma in piombo. Il nucleo successivo all'Uranio sarebbe il Plutonio e, probabilmente, nel materiale espulso dalla supernova che ha innescato la formazione del Sistema solare, ce n'era una piccola quantità, ma siccome la sua vita media è solo 24.000 anni, sulla Terra ormai ha fatto in tempo a decadere del tutto. Altri nuclei più pesanti si riescono a formare solo nei reattori nucleari o negli acceleratori, ma le loro vite medie sono sempre più corte e, mentre ai primi veniva assegnato un nome, ormai si denominano solo in base al loro numero di protoni e neutroni.

Ma torniamo alla parte iniziale di questo diagramma; quella che porta dall'Idrogeno al Ferro. Come si vede, passando dall'Idrogeno al Deuterio, si libera una buona quantità di energia (in realtà, il doppio di quella in figura, perché quest'ultima è solo l'energia di legame per singolo nucleone, e il Deuterio ha due nucleoni). Anche passando all' $He^3$  si libera molta energia, e ancora di più passando all' $He^4$ . Per questo, la fusione dell'Idrogeno in Elio è la principale fonte di energia delle stelle, e la Sequenza Principale dura molto più a lungo di tutte le altre fasi di bruciamento nucleare. Ora, seguitiamo a procedere verso nuclei di massa maggiore. Notiamo che il  $Li^7$  ha un'energia maggiore di quella dell' $He^4$ . Come mai?

La risposta si trova nella regolazione fine delle forze nucleari. Il nucleo dell'Elio, con due protoni e due neutroni, è quello che si lega in modo ottimale. Degli altri nuclei, quelli che possono essere considerati "multipli" di un nucleo di Elio sono i più stabili, perché al loro interno esiste una struttura in cui le particelle di Elio si legano tra loro a gruppi di tre o quattro, mantenendo però una loro stabilità. Così, vediamo che il  $C^{12}$  e l' $O^{16}$  sono più stabili (hanno energia più bassa) rispetto ai nuclei immediatamente contigui. Poi, questa caratteristica si nota sempre di meno.

Il problema, in tutta questa discussione, è quello del  $Be^8$ . Dovrebbe essere il secondo nucleo più stabile, no? Invece succede questo: siccome le due particelle  $He^4$  che lo compongono non hanno alcun genere di simmetria spaziale oltre quella che le vede allineate, in pratica continuano a restarsene ciascuna per conto proprio, interagendo pochissimo tra loro. Come risultato di ciò, l'energia di legame del  $Be^8$  è praticamente la stessa della somma dei due nuclei di  $He^4$ . Per cui, il  $Be^8$ , come si forma, si disintegra di nuovo in tempi brevissimi; può essere considerato come una forma molto rara, di brevissima durata, di forte avvicinamento tra due nuclei di Elio. Occorre aggiungergli un neutrone, e formare il  $Be^9$ , per avere un nucleo stabile, in quanto il neutrone da un lato spezza la simmetria, e dall'altro fornisce un collante aggiuntivo. Questo è il motivo per cui, durante il Big Bang, non si sono formati elementi più pesanti dell' $He^4$ . Bisognava passare per un elemento troppo instabile, e dunque non si è andati oltre. La reazione  $He^3 + He^4$  è riuscita a formare minime quantità di  $Li^7$ , e questo è stato il massimo. Vedremo come questo problema si risolve nelle stelle, consentendo la formazione di nuclei più pesanti.

Arriviamo adesso al  $Fe^{56}$ . Andandoci per fusione nucleare, si liberano quantità sempre minori di energia, ma comunque se ne ottiene sempre un po'. Se, però, vogliamo fondere tra loro due nuclei di  $Fe^{56}$ , non è che non ci si possa riuscire, ma il nucleo risultante avrà più energia, e non meno, per cui la fusione non libera più energia ma, al contrario, ne richiede. Dunque, quando una stella si trova in condizioni di fondere il  $Fe^{56}$  al suo centro, si troverà all'improvviso un vuoto di energia e crollerà su sé stessa. Di qui l'esplosione di supernova.

Ma non è che, con queste quattro chiacchiere, abbiamo concluso il discorso sulle reazioni nucleari nelle stelle. Anzi: siamo solo in procinto di poterlo cominciare nel prossimo salotto, prendendo in considerazione quali siano le condizioni necessarie affinché una fusione nucleare abbia luogo, e le primissime reazioni di fusione nelle stelle.