

2019

ANNO INTERNAZIONALE DELLA TAVOLA PERIODICA

Minicorso di Nucleosintesi Stellare per Principianti

di Sergio Cristallo^{1,2,*}

¹ Osservatorio Astronomico d'Abruzzo, via Maggini snc, Teramo

² Sezione INFN di Perugia, via A. Pascoli, Perugia

* sergio.cristallo@inaf.it

ELENCO CAPITOLI

Pag. 2: La Tavola Periodica ieri e oggi

Pag. 5: La distribuzione degli elementi nel Sole

Pag. 7: Il bruciamento dell'idrogeno

Pag. 9: Il bruciamento dell'elio

Pag. 12: Dal carbonio al ferro

Pag. 14: Le Supernovae

Pag. 17: I processi di cattura neutronica

Pag. 21: Le stelle AGB

Pag. 23: I sistemi binari di stelle di neutroni

Pag. 26: Gli elementi, le stelle ed un moderno cellulare

Capitolo 1: La Tavola Periodica ieri e oggi

Il 2019 è stato dichiarato dall'UNESCO "Anno Internazionale della Tavola Periodica", per celebrare il 150° anniversario dalla pubblicazione della Tavola degli Elementi da parte del chimico russo Dmitrij Mendeleev. Il 6 marzo 1869, infatti, Mendeleev presentò formalmente alla Società Russa di Chimica la sua classificazione degli elementi chimici, che intitolò: "La dipendenza tra le proprietà dei Pesì Atomici degli Elementi".

Mendeleev non fu il primo in assoluto a proporre la classificazione degli elementi chimici. In quel periodo, infatti, erano già state pubblicate altre tavole in cui gli elementi chimici erano ordinati in base al numero atomico crescente o raggruppando gli elementi in categorie con proprietà chimiche simili. Uno dei tratti caratterizzanti del lavoro di Mendeleev consiste nel fatto che egli lasciò alcune caselle vuote, basandosi sulle proprietà periodiche che aveva identificato. Per esempio, ipotizzò l'esistenza di tre elementi, che nominò eka-silicio, eka-alluminio ed eka-boro, in quanto si trovano esattamente una casella sotto i rispettivi elementi già noti al tempo (si veda **Figura 1**). Questi elementi furono scoperti negli anni a venire (sono rispettivamente il germanio, il gallio e lo scandio).

Reihen	Gruppo I. — R ⁰	Gruppo II. — R ⁰	Gruppo III. — R ⁰ ³	Gruppo IV. RH ⁴ R ⁰ ³	Gruppo V. RH ⁵ R ⁰ ³	Gruppo VI. RH ⁶ R ⁰ ³	Gruppo VII. RH R ⁰ ⁷	Gruppo VIII. — R ⁰ ⁴
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=86	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

Figura 1: LA TAVOLA PERIODICA ORIGINALE DI MENDELEEV

A quell'epoca erano noti più di 60 elementi chimici; al giorno d'oggi, il numero è pressoché duplicato (**Figura 2**). Gli ultimi 4 elementi (nihonio, moscovio, tennessinio e oganessio) sono stati presentati ufficialmente nel 2016.

La Tavola Periodica degli Elementi a fumetti

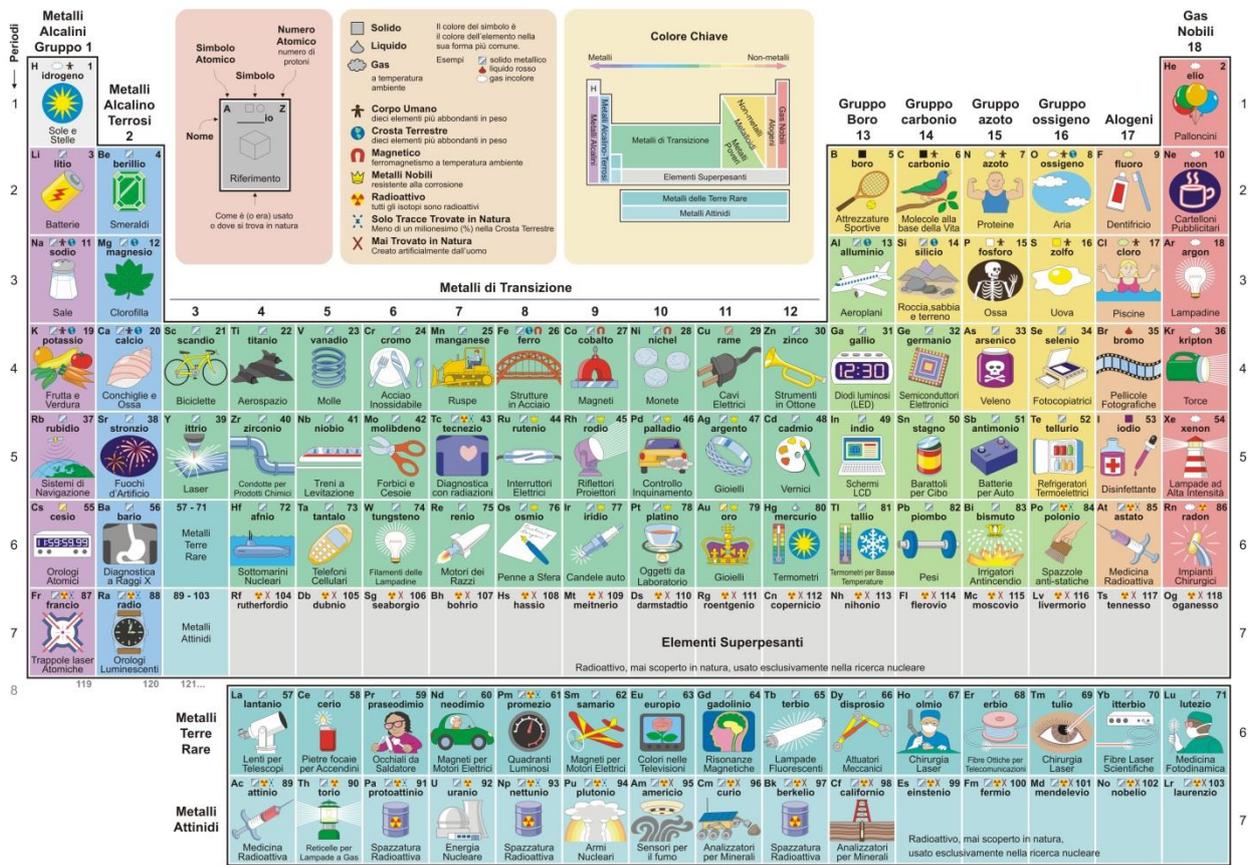


Figura 2: LA TAVOLA PERIODICA OGGI

La tavola periodica include sia elementi stabili (cioè con tempo di vita infinito), sia elementi instabili (ossia elementi che nel tempo si trasformano in un elemento chimico diverso). In natura si possono trovare tutti gli elementi, ad eccezione di quelli superpesanti, che sono creati artificialmente dall'uomo ed hanno tempi di vita estremamente brevi. Nella Tavola Periodica, gli elementi sono ordinati per numero atomico crescente (indicato con il simbolo Z), ossia in base al numero crescente di "protoni" all'interno dei vari nuclei. Il protone è una delle particelle subatomiche fondamentali, avente massa pari a 1.7×10^{-24} gr (circa 2000 miliardesimi di miliardesimi di grammo) e carica positiva pari a 1.6×10^{-19} C (cioè 16 miliardesimi di miliardesimi di Coulomb, che è la quantità di carica elettrica trasportata in 1 secondo dal flusso di corrente di 1 Ampere). Gli atomi sono

globalmente neutri, perché intorno ai nuclei (carichi positivamente) orbitano gli elettroni, che hanno carica negativa. All'interno dei nuclei sono presenti anche i neutroni, ossia particelle con massa quasi uguale a quella dei protoni, ma senza carica. Un atomo è dunque costituito da un nucleo (contenente protoni e neutroni), immerso in una "nuvola" di elettroni. La carica di un nucleo è indicata dal numero atomico (Z); la sua massa è invece solitamente rappresentata dalla somma dei suoi nucleoni ($A = \text{protoni} + \text{neutroni}$: la massa degli elettroni è infatti trascurabile rispetto a quella dei nuclei).

Ogni elemento chimico ha una sua caratteristica "composizione isotopica". Gli "isotopi" sono atomi che hanno lo stesso numero atomico, ma un numero diverso di neutroni. Esistono elementi che hanno un singolo isotopo stabile (come il fluoro o l'oro), elementi con molti isotopi stabili (lo stagno, è quello che ne ha di più: ben 10!) ed elementi senza alcun isotopo stabile (come il tecnezio, che si trasforma in molibdeno).

Il lettore interessato può esplorare la Tavola Periodica degli Isotopi IUPAC disponibile sul sito <https://www.isotopesmatter.com/applets/IPTEI/IPTEI.html> .

Capitolo 2: La distribuzione degli elementi nel Sole

Una delle domande che si sono posti i fisici e gli astrofisici negli ultimi 100 anni è: da dove provengono gli elementi chimici? Sulla Terra non esistono condizioni fisiche naturali per creare alcun nuovo elemento, sostanzialmente perché sono necessarie temperature decisamente più elevate (almeno dell'ordine del milione di gradi). Di conseguenza, gli elementi che osserviamo sulla Terra erano già presenti al momento della formazione della Terra stessa (nonché del Sole, visto che il nostro pianeta è costituito dello stesso materiale da cui si è formata la nostra stella).

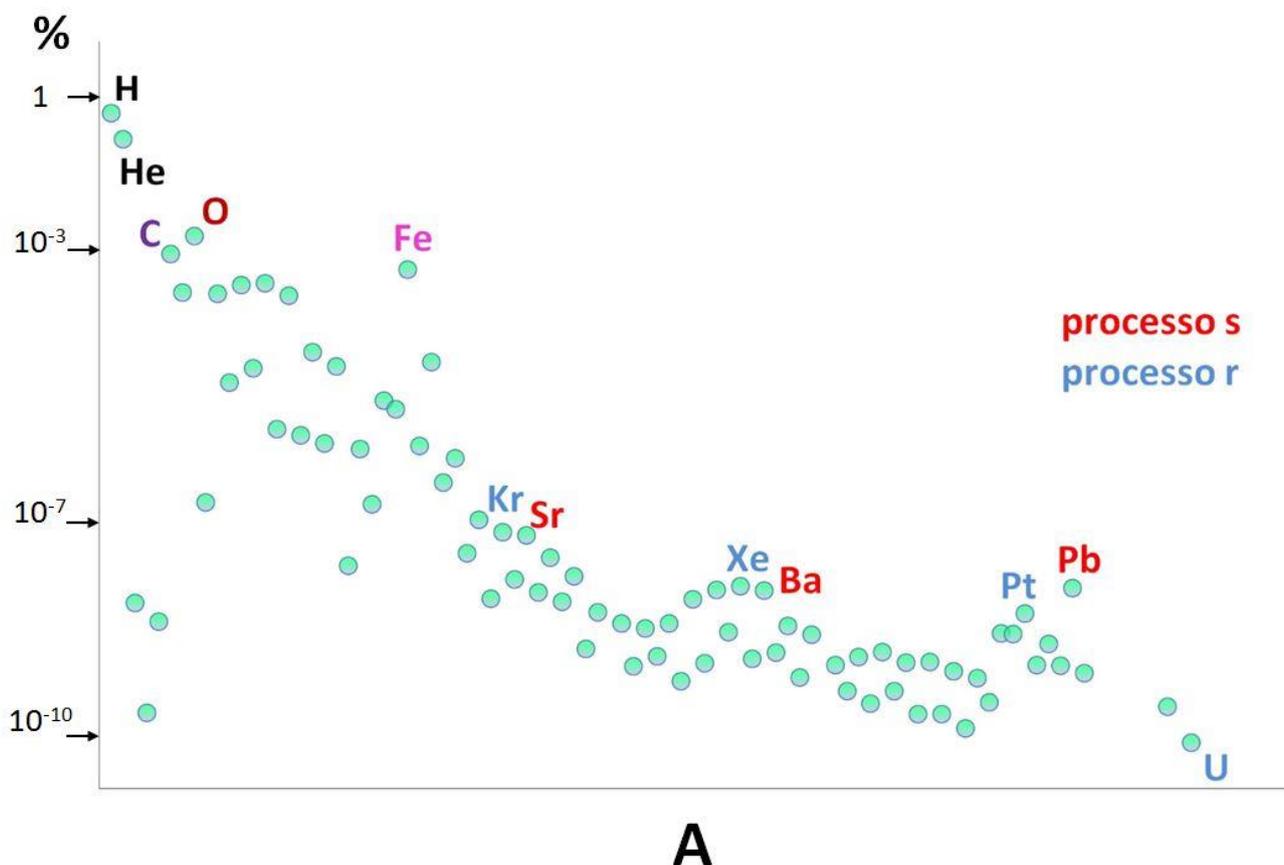


Figura 3: LA DISTRIBUZIONE DEGLI ELEMENTI CHIMICI NEL SOLE

Prendiamo il Sole come riferimento per capire quali sono gli elementi più abbondanti, in massa, nell'Universo. Nel Sole, i due elementi più leggeri (idrogeno ed elio) rappresentano circa il 98% della sua massa (H per circa il 70%, He per il restante 28%). In **Figura 3** sono riportate le abbondanze chimiche osservate sulla superficie del Sole (o misurate da altre sorgenti, quando l'elemento non è direttamente misurabile). L'asse delle ordinate è in scala logaritmica, necessaria per

poter visualizzare propriamente in una singola immagine abbondanze che variano di 10 ordini di grandezza (dall'idrogeno sino all'uranio, circa 10 miliardi di volte meno abbondante).

L'origine di idrogeno ed elio, così come quella del litio, risale alla prima ora di vita dell'Universo, che ancora si stava velocemente raffreddando in seguito al Big Bang. Tutti gli altri elementi sono stati prodotti da stelle formatesi nel corso dei successivi miliardi di anni. Uniche eccezioni sono il berillio ed il boro, che sono stati principalmente prodotti attraverso processi di spallazione indotti dai raggi cosmici.

Capitolo 3: Il bruciamento dell'idrogeno

Le stelle sono in grado di produrre tutti gli elementi chimici ad esclusione dell'idrogeno (la cui creazione richiede le condizioni fisiche estreme del Big Bang). Prima di parlare di bruciamenti nucleari, tuttavia, bisogna introdurre il concetto di "plasma". Quando un atomo si trova a temperature superiori al milione di gradi (condizione tipica degli interni stellari), gli elettroni, che in condizioni terrestri orbitano attorno al proprio nucleo, possono viaggiare liberamente senza essere intrappolati dai relativi nuclei. Il gas stellare è quindi formato da ioni positivi (i nuclei) e ioni negativi (gli elettroni). Di conseguenza, diventa "ionizzato" e lo si definisce un "plasma".

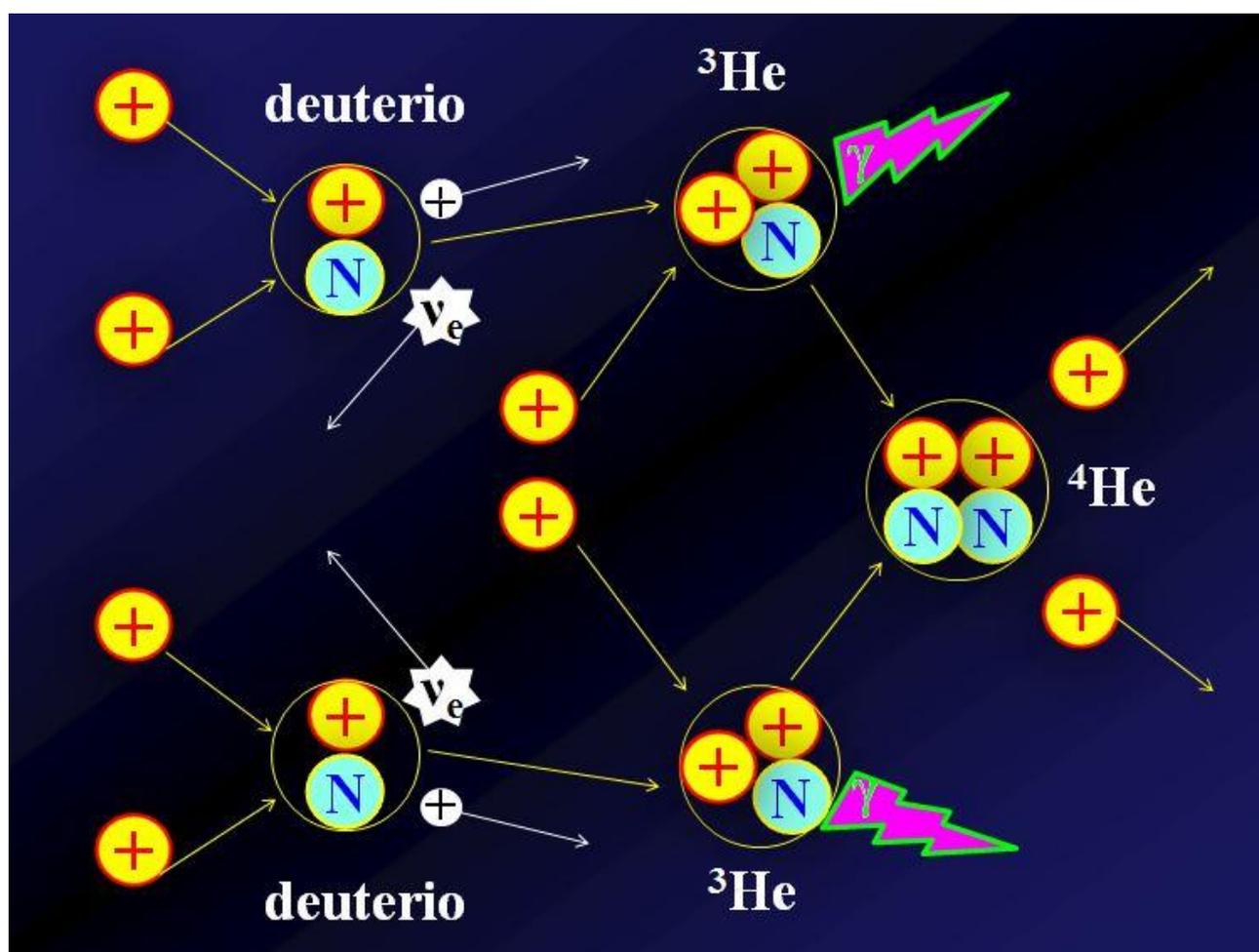


Figura 4: SCHEMA DELLA COMBUSTIONE DELL'IDROGENO

Poiché il Sole è rappresentativo della maggioranza delle stelle che brillano in cielo, lo prendiamo come riferimento per introdurre il concetto di bruciamento

termonucleare. L'energia prodotta nel suo nucleo deriva dalla conversione di 4 atomi di idrogeno in 1 atomo di elio (al ritmo di circa 4 milioni di tonnellate al secondo). Il primo a teorizzare che l'energia necessaria alle stelle per controbilanciare la forza di gravità provenisse dal bruciamento termonucleare dell'idrogeno fu Sir Arthur Eddington nel 1920. Durante questo processo si producono altri due tipi di particelle nucleari: i positroni (simili agli elettroni, ma con carica positiva) ed i neutrini (particelle particolarmente "fuggevoli", poiché non interagiscono praticamente con nulla, e decisamente numerose, siccome in miliardi attraversano una superficie grande come un'unghia ogni secondo).

Il processo di trasformazione di H in He avviene attraverso tre fasi successive (si veda **Figura 4**). Durante la prima, due atomi di idrogeno si fondono, producendo un nucleo di deuterio (formato da 1 protone ed 1 neutrone). Durante questo processo uno dei due protoni si è dunque trasformato in un neutrone. E' avvenuto quello che in gergo si definisce "decadimento β ", ossia un processo che vede come protagonista principale la forza nucleare debole. A sua volta, il deuterio cattura un protone e forma un nucleo di ^3He (2 protoni ed 1 neutrone). Infine, due nuclei di ^3He si fondono, producendo un nucleo di ^4He (costituito da 2 protoni e 2 neutroni) e rilasciando due protoni. La massa del nucleo di elio, però, è minore della somma delle masse dei 4 nuclei di idrogeno. La differenza di massa si è tramutata in energia, secondo la ben nota equazione di Einstein $E=mc^2$ (in sintesi esprime il fatto che massa ed energia non sono altro che le due facce della stessa medaglia).

Da ben 4.6 miliardi di anni il Sole produce energia con una potenza di 4 miliardi di miliardi di miliardi di watt.

Capitolo 4: Il bruciamento dell'elio

La produzione degli elementi più pesanti dell'elio è decisamente più complessa, in quanto non esistono nuclei stabili in natura aventi massa atomica $A=5$ ed $A=8$. Quindi non si può immaginare di produrre elementi più pesanti attraverso semplici catture protoniche.

Nel 1951, prima Ernst Opik, e poi in modo più dettagliato Edwin Salpeter (premio Craaford 1997), ipotizzarono che nelle stelle Giganti l'energia necessaria per controbilanciare la gravità provenisse dal bruciamento di 3 nuclei di elio. Nel Sole questo tipo di reazione non può avvenire perché il nucleo solare è troppo freddo e, di conseguenza, prevale la repulsione Coulombiana (è il principio secondo il quale particelle con carica uguale tendono a respingersi).

Il bruciamento dell'elio avviene in due fasi successive. Nella prima, due particelle α ; (un acronimo per indicare i nuclei di elio) si fondono in un nucleo di ${}^8\text{Be}$, il quale a sua volta cattura un'altra particella α , producendo ${}^{12}\text{C}$. Il problema connesso a questa teoria sta nel tempo di vita del ${}^8\text{Be}$, che si ritrasforma in due particelle α in circa 2×10^{-16} secondi (ossia in un intervallo di tempo di 20 milionesimi di miliardesimo di secondo). La soluzione a questo problema fu proposta nel 1953 dal cosmologo inglese Fred Hoyle (premio Craaford 1997), che ipotizzò l'esistenza di un livello energetico risonante nella struttura atomica del ${}^{12}\text{C}$. Questo stato risonante fu confermato sperimentalmente in seguito nei laboratori Kellogg del California Institute of Technology, dal gruppo di fisici nucleari guidato da William Fowler (Premio Nobel 1983). A questo livello è stato assegnato in passato l'epiteto di "livello della vita", perché l'esistenza del carbonio ha reso possibile lo sviluppo della vita, per come la conosciamo. La biologia umana, infatti, si basa sul ciclo del carbonio.

Una volta prodotto, tuttavia, il ${}^{12}\text{C}$ può catturare a sua volta un'altra particella α e produrre ${}^{16}\text{O}$. Compare dunque un nuovo isotopo/ elemento: l'ossigeno! Inutile soffermarsi sull'importanza dell'ossigeno per noi (tanto per cadere nel banale, senza ossigeno non esisterebbe l'acqua, la cui formula stechiometrica è $\text{H}_2\text{O}!!!$). Nel Sole, dopo idrogeno ed elio, l'ossigeno è l'elemento chimico più abbondante (seguito a ruota dal carbonio; si veda **Figura 3**). Nella crosta terrestre invece è addirittura

l'elemento più abbondante (si veda **Figura 5**): questo dimostra come la distribuzione degli elementi in un pianeta è profondamente diversa rispetto a quella delle stelle (e se guardassimo altri pianeti del Sistema Solare, troveremmo ulteriori importanti differenze).

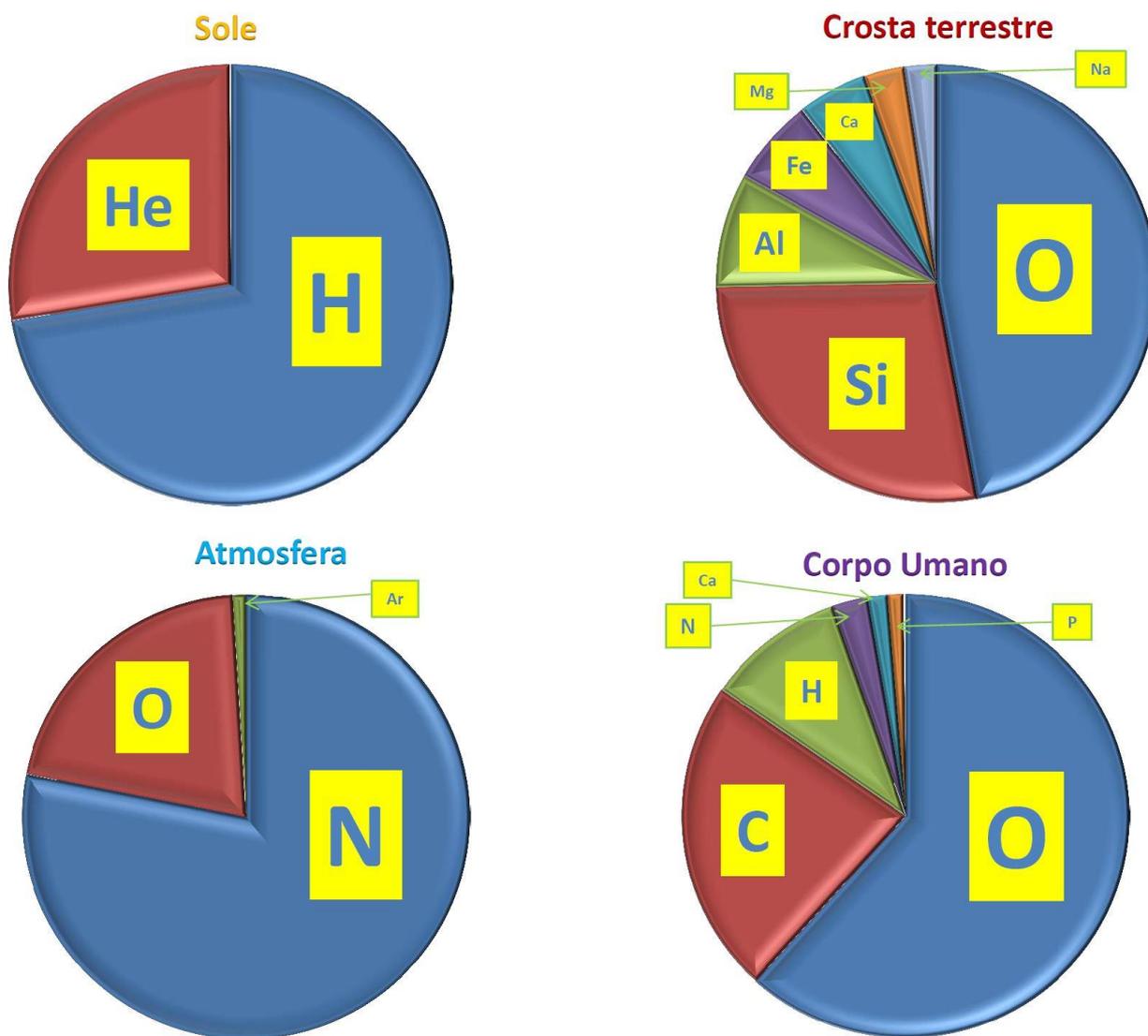


Figura 5: COMPOSIZIONI CHIMICHE A CONFRONTO

Come si può apprezzare da **Figura 5**, anche la composizione dell'atmosfera è profondamente diversa da quella della Crosta Terrestre. Nel primo caso, infatti, l'elemento dominante è l'azoto. L'azoto si forma attraverso il cosiddetto "ciclo CNO", ovvero un tipo di bruciamento dell'idrogeno alternativo a quello che avviene nel Sole. Questo processo, studiato nel dettaglio da Hans Bethe (premio Nobel 1967), ha bisogno di una massa stellare leggermente più grande di quella del Sole per essere attivato in modo efficiente.

E ulteriormente diversa è la composizione del corpo umano, dove ossigeno, carbonio ed idrogeno sono i tre elementi dominanti (tutto sommato non abbiamo bisogno di elementi così complessi per sopravvivere...anche se, come si suol dire, "il diavolo si nasconde nei dettagli"!). E' piuttosto curioso pensare che, mentre i nostri corpi sopravvivono solitamente meno di un secolo, gli atomi che li compongono (qualche miliardo di miliardo di miliardo) sono vecchi ALMENO 5 miliardi di anni!!!

Capitolo 5: Dal carbonio al ferro

Ovviamente, la nucleosintesi cosmica non si riduce agli elementi precedentemente descritti. Infatti, nelle stelle con massa sufficientemente grande (almeno 10 volte la massa del Sole), la temperatura centrale è sufficientemente alta da innescare una nutrita sequenza di cattura di particelle α . Di conseguenza, elementi sempre più pesanti vengono sintetizzati: neon (^{20}Ne), magnesio (^{24}Mg), silicio (^{28}Si), zolfo (^{32}S), argon (^{36}Ar), calcio (^{40}Ca), titanio (^{44}Ti), cromo (^{48}Cr), ferro (^{52}Fe) ed infine nichel (^{56}Ni). Quest'ultimo isotopo è instabile e decade, in circa 70 giorni, nel suo isobaro stabile ^{56}Fe (passando attraverso il ^{56}Co).

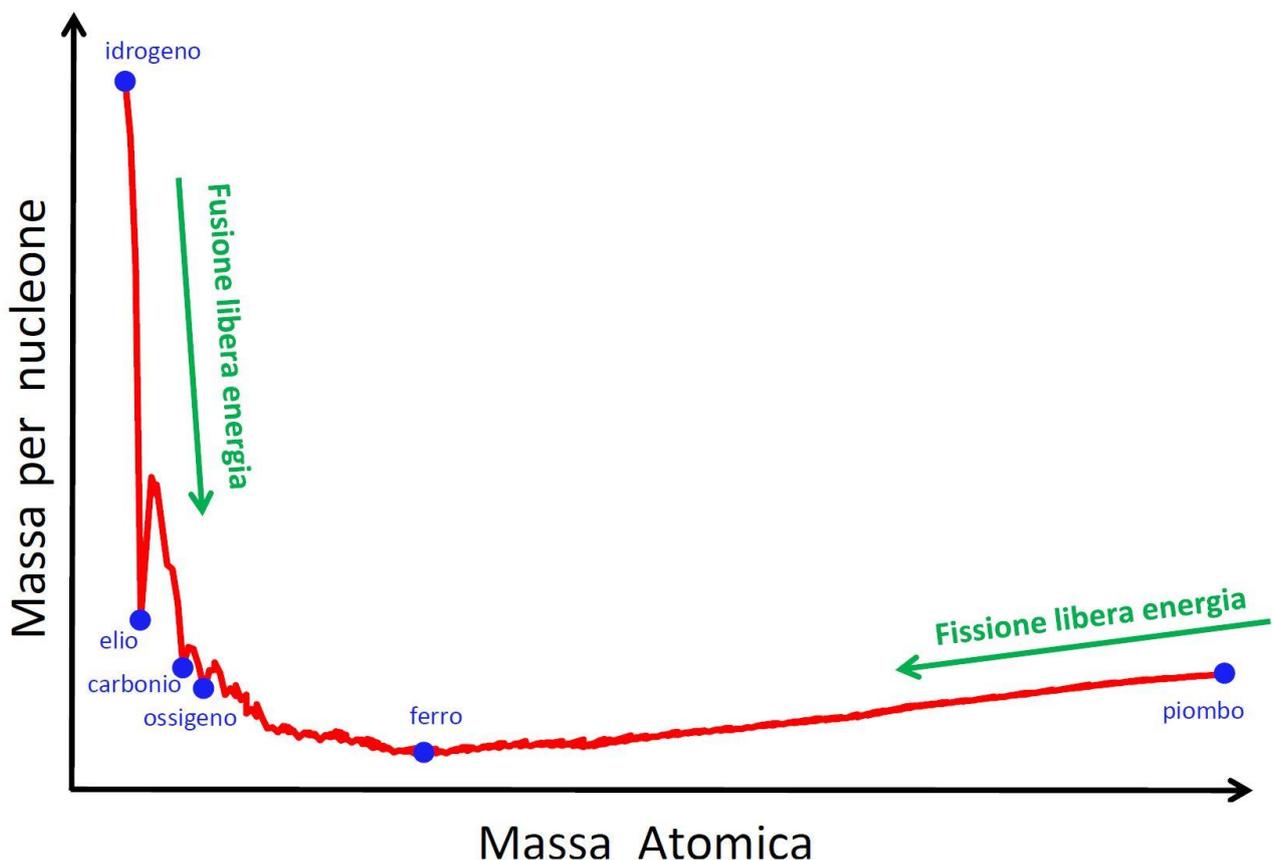


Figura 6: LA STABILITA' DEGLI ELEMENTI CHIMICI

Come si può vedere in **Figura 6**, il ferro possiede una tra le più basse masse nucleari medie per nucleone (detto in modo diverso: è tra i nuclei più stabili, perché possiede una grande energia di legame per nucleone). In pratica, significa che la produzione di isotopi più pesanti del ^{56}Fe attraverso processi nucleari tra particelle cariche

(come quelli precedentemente descritti) richiede energia, invece di produrne (il processo in questo caso si dice “endoenergetico”). Inoltre, all’aumentare della carica dei reagenti (ossia il numero di protoni dei due nuclei), aumenta anche la loro repulsione Coulombiana. Di conseguenza, non è possibile produrre elementi più pesanti del ferro attraverso reazioni tra particelle cariche.

Una soluzione alternativa potrebbe venire dalla fissione nucleare. Mentre in un processo di fusione due nuclei si fondono per crearne uno più grande, nella fissione avviene esattamente il contrario, ossia un nucleo pesante si scompone in componenti più piccole, liberando energia (questo principio fisico è alla base del funzionamento dei reattori nucleari). Il problema è il processo di fissione richiede la presenza di nuclei instabili molto pesanti (i cosiddetti Attinidi), che sono proprio gli elementi che vorremo produrre. Quindi nemmeno la fissione risolve il problema.

Quanto sopra asserito è confermato dalla distribuzione degli elementi osservati sulla superficie del Sole (precedentemente descritta in **Figura 3**). Come si può notare, in corrispondenza del ferro si ha un vero e proprio picco (dopo idrogeno, elio, ossigeno e carbonio, infatti, il ferro è l’elemento più abbondante nell’Universo).

Capitolo 6: Le Supernovae

Viene naturale chiedersi come una stella massiccia, che è riuscita a produrre il ferro (nonché altri elementi più leggeri), possa espellere nel mezzo interstellare i prodotti della nucleosintesi avvenuta nei suoi strati interni.

Una volta terminati i bruciamenti nucleari precedentemente descritti, non vi è più nessuna reazione nucleare che controbilanci il processo di contrazione del nucleo (che avviene a causa dell'elevatissima forza di gravità). Quando gli elettroni presenti nel nucleo incominciano ad essere catturati dai protoni (producendo neutroni), il nucleo della struttura (ricco di nichel e ferro) perde il contributo alla pressione fornito dagli elettroni. A questo punto inizia un processo irreversibile, con il nucleo che inizia a collassare su se stesso mentre il materiale sovrastante gli cade sopra con sempre maggiore intensità. A un certo punto il nucleo è talmente denso che diventa incompressibile ed il materiale sovrastante gli "rimbalza" letteralmente addosso.



Figura 7: RAPPRESENTAZIONE STILIZZATA DI UNA SUPERNOVA DI TIPO II

Siamo di fronte al fenomeno esplosivo di “Supernova di tipo II” (SN II). Durante questo immane scoppio cosmico (la luce emessa dalla SN II è pari a quella della Galassia che la ospita), molti degli elementi all’interno della struttura vengono espulsi nel mezzo interstellare (questo processo è rappresentato idealmente in **Figura 7**).

Uno degli elementi più importanti prodotti dalle SN II è ovviamente l’ossigeno (di cui abbiamo già illustrato l’importanza), ma vi è anche una consistente produzione di magnesio, silicio, calcio, ed ovviamente ferro (attraverso l’espulsione del ^{56}Ni). Se controlliamo le percentuali dei vari elementi chimici nel corpo umano, potremmo concludere che ciò che gli elementi chimici prodotti dalle SN II sono sufficienti per lo sviluppo della vita per come la conosciamo. Ci sono però ancora un paio di problemi da risolvere.

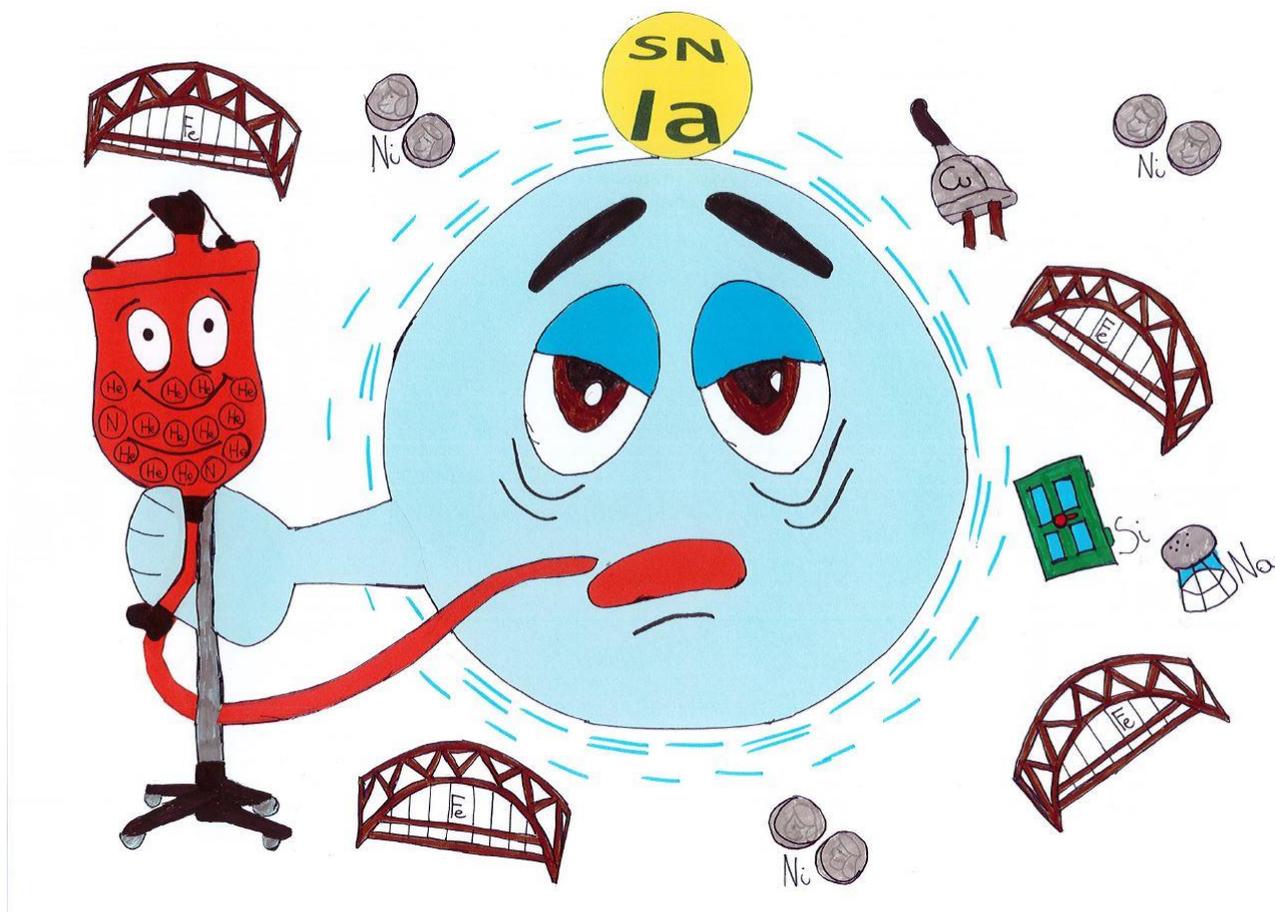


Figura 8: RAPPRESENTAZIONE STILIZZATA DI UNA SUPERNOVA DI TIPO Ia

In primo luogo, il ferro osservato nella nostra Galassia richiede un ulteriore canale di produzione, perché quello prodotto dalle SN II non è sufficiente. Questo canale è fornito dalle “Supernovae di tipo Ia” (SN Ia, rappresentate idealmente in **Figura 8**). A

differenza delle SN II, che scoppiano quando il loro nucleo non è più in grado di controbilanciare la forza di gravità, per avere una SN Ia sono necessarie due stelle che formino un sistema binario (la maggior parte delle stelle che vediamo in cielo non sono stelle singole, ma appartengono a sistemi stellari composti da due stelle che ruotano attorno al centro di massa del sistema). Nel caso delle SNe Ia, le due stelle sono già evolute (entrambe sono nane bianche), ma una delle due viene letteralmente “risucchiata” dall’altra. Quando all’interno della stella che accresce massa si raggiungono le condizioni fisiche per l’innesco del bruciamento del carbonio (o dell’elio), quest’ultimo avviene in modo reazionato positivamente (cioè all’aumentare della temperatura aumenta sempre più l’energia) e la stella esplose. Questi sistemi non sono solo i principali produttori del ferro galattico, ma producono altri elementi del picco del ferro, quali nichel e rame (si veda **Figura 8**). Inoltre sono anche espulsi materiali più leggeri, come silicio e calcio.

Il secondo problema che emerge ci interessa più direttamente ed è legato alla tecnologia. Infatti, se la nucleosintesi cosmica si fosse fermata al ferro, mancherebbero all’appello un sacco di elementi chimici (molti dei quali indispensabili per il funzionamento degli odierni apparati tecnologici). Come possiamo uscire da questa impasse? L’unica via è richiedere l’intervento di una particella nucleare che abbiamo introdotto in precedenza: il NEUTRONE.

Capitolo 7: I processi di cattura neutronica

Il neutrone è una particella di massa quasi identica a quella di un protone, ma con carica elettrica neutra. Non risentendo degli effetti della barriera Coulombiana, i neutroni sono i candidati migliori per la risoluzione del nostro problema. Tuttavia, negli interni stellari i neutroni esistono solo all'interno dei nuclei atomici. La forza nucleare forte infatti non permette ai neutroni di staccarsi spontaneamente da un nucleo stabile. Inoltre, poiché un eventuale neutrone libero decadrebbe rapidamente in un protone (ci vogliono circa 8 minuti), abbiamo bisogno di una sorgente di neutroni che mantenga un flusso neutronico che duri nel tempo. Infine, per poter attivare efficientemente i processi di cattura neutronica, la quantità di neutroni liberi deve essere assai consistente.

Le abbondanze degli elementi pesanti osservati nelle stelle si possono riprodurre ipotizzando l'esistenza di due soli processi di cattura neutronica: il processo di cattura neutronica lento (o processo s , dall'inglese "slow") ed il processo di cattura neutronica veloce (o processo r , dall'inglese "rapid"). I flussi neutronici che li caratterizzano sono di circa 10 milioni di neutroni per centimetro cubico e più di 1 miliardo di miliardi di miliardi di neutroni per centimetro cubico, rispettivamente.

La teoria nucleare dei processi s ed r è ben nota da tempo, ossia da quando, nel 1957, gli scienziati Margareth e Geoffry Burbidge, insieme a William Fowler e Fred Hoyle, pubblicarono un articolo sulla rivista *Reviews of Modern Physics* dal titolo "Synthesis of the Elements in Stars". Questo articolo rappresenta, a tutti gli effetti, la Bibbia dell'Astrofisica Nucleare.

In **Figura 9** è riportato un estratto della cosiddetta "valle di stabilità β ", che traccia le posizioni degli isotopi stabili lungo la tavola periodica degli elementi. Nel piano (A,Z) , gli isotopi stabili dei vari elementi chimici si posizionano lungo un percorso quasi rettilineo, a partire dall'atomo di idrogeno (che ha $A=Z=1$) sino all'atomo di piombo ($A=208$ e $Z=83$, ossia un nucleo con 208 nucleoni, di cui 83 sono protoni). In **Figura 9** sono indicati esclusivamente gli isotopi stabili, mentre gli spazi vuoti sono occupati da isotopi instabili (quindi se un isotopo non è esplicitamente rappresentato, non significa che non esista!).

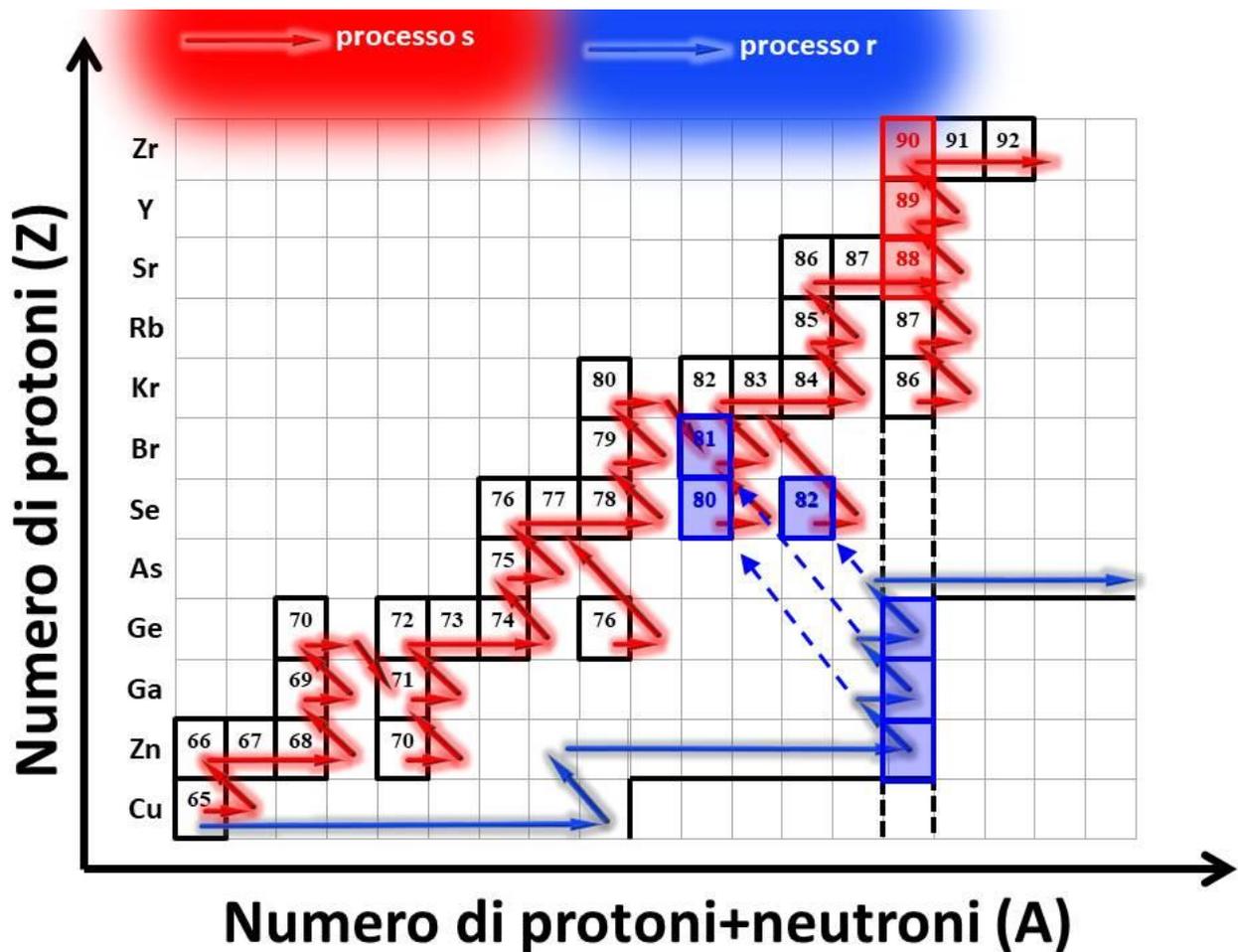


Figura 9: I PROCESSI DI CATTURA NEUTRONICA LENTA E VELOCE

Per fissato numero atomico (Z), al progressivo allontanarsi dagli isotopi stabili (verso sinistra, cioè per masse atomiche minori, oppure verso destra, cioè per masse atomiche maggiori), i tempi di decadimento dei vari isotopi diminuiscono sempre più, sino a raggiungere valori infinitesimi. E' quindi intuitivo immaginarsi la valle di stabilità β come una valle molto stretta, con gli isotopi stabili distribuiti sul fondovalle e gli isotopi instabili lungo le pareti, a diverse altezze in base al loro tempo di decadimento (sempre più rapidi a mano a mano che ci si allontana dal fondo). Di qui il nome di valle di stabilità β .

Il processo s, costituito dalla sequenza di freccette orizzontali rosse (ognuna di esse rappresenta una cattura neutronica), avviene SEMPRE in prossimità della valle di stabilità β . Quando un nucleo stabile cattura un neutrone creando un isotopo instabile, quest'ultimo ha il tempo di decadere nel suo isobaro stabile (ossia un nucleo stabile avente la stessa massa atomica, ma un diverso numero di protoni) prima di catturare un altro neutrone. Questi decadimenti possono essere di tipo $\beta+$

(un protone si trasforma in un neutrone: frecce rosse verso il basso) oppure β^- (un neutrone si trasforma in un protone: frecce rosse verso l'alto).

Lungo il percorso del processo s, esistono nuclei le cui configurazioni nucleari particolarmente stabili (sono detti nuclei "magici") fanno sì che i rispettivi elementi si accumulino rispetto a quelli vicini (caselle rosse colorate). Di conseguenza, vengono a crearsi veri e propri "picchi" nella distribuzione degli elementi pesanti creati attraverso il processo s (in corrispondenza di numeri di neutroni $N=50$, $N=82$ ed $N=126$). Questo è illustrato in **Figura 3**, che mostra come il processo s presenti 3 picchi ben distinti: il primo in corrispondenza del gruppo stronzio-ittrio-zirconio (Sr-Y-Zr), il secondo del gruppo bario-lantanio-cerio-neodimio (Ba-La-Ce-Nd) ed il terzo in corrispondenza del piombo (Pb). Il processo s produce circa la metà degli elementi più pesanti del ferro presenti nell'Universo.

La restante metà è creata attraverso il processo di cattura neutronica rapido (processo r). In questo caso, attraverso una serie di catture neutroniche successive su un singolo isotopo stabile si possono produrre isotopi molto lontani dalla valle di stabilità β (frecce orizzontali blu in **Figura 9**). Infatti, a causa dell'elevatissimo flusso di neutroni, infatti, i nuclei instabili appena sintetizzati non hanno il tempo di decadere e sono costretti a loro volta a catturare un neutrone. Questa successione di catture neutroniche procede sino a creare nuclei con tempi di vita infinitesimi (millesimi di secondo). A questo punto il decadimento β è più veloce della cattura neutronica e il nucleo può decadere, aumentando la propria carica (frecce blu verso l'alto). In corrispondenza dei nuclei magici di neutroni (vedi sopra) abbiamo nuovamente l'accumulo di alcuni elementi (caselle blu colorate). Una volta terminato il flusso di neutroni, questi isotopi possono poi decadere nei relativi isobari stabili lungo la valle di stabilità. In **Figura 3**, di conseguenza, appaiono altri tre picchi, caratteristici del processo r: il primo in corrispondenza di selenio-bromo-kriptone (Se-Br-Kr), il secondo di tellurio-iodio-xenone (Te-I-Xe) ed il terzo di iridio-platino-oro (Ir-Pt-Au). Infine, facciamo notare che anche gli elementi radioattivi terrestri con vita media molto lunga (come il torio e l'uranio) sono stati creati attraverso il processo r.

Abbiamo visto come i due processi di cattura neutronica appena descritti siano estremamente diversi. E' strabiliante come tutti gli elementi chimici pesanti siano stati creati in condizioni così differenti e uniche (vi sono altri processi intermedi, la cui rilevanza è però decisamente trascurabile rispetto alle due componenti principali

s ed r). Resta ancora un argomento da sviscerare: DOVE avvengono questi processi? Questa domanda ha tenuto occupati gli astrofisici nucleari negli ultimi 40 anni...e ancora fa passare loro notti insonni!!!

Due sono gli ambienti stellari di nostro interesse: le stelle di piccola massa durante la loro fase evolutiva di Ramo Asintotico (per il processo s) ed i sistemi binari composti da due stelle di neutroni (per il processo r).

Capitolo 8: Le stelle AGB

La fase evolutiva di ramo asintotico (Asymptotic Giant Branch, AGB) riguarda stelle di massa piccola e intermedia, che hanno già esaurito nel loro nucleo sia l'idrogeno sia l'elio, ma che non hanno massa abbastanza grande per attivare tutta la serie di bruciamenti termonucleari che portano alla produzione del ferro.

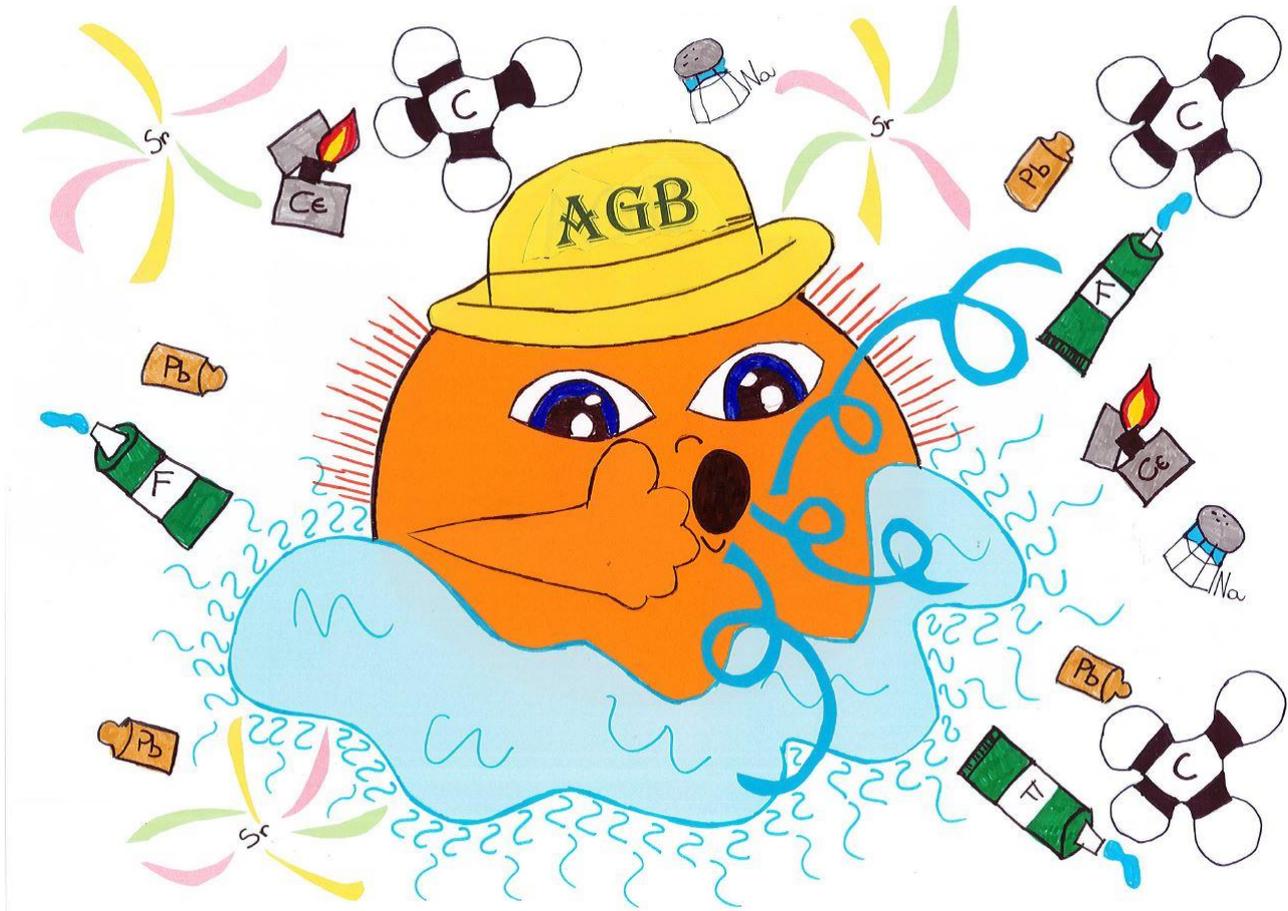


Figura 10: RAPPRESENTAZIONE STILIZZATA DI UNA STELLA AGB

Le stelle AGB somigliano ad enormi cipolle, perché la loro struttura è letteralmente a strati. Il nucleo, composto da carbonio e ossigeno (le “ceneri” del precedente bruciamento di elio), è circondato da uno strato stellare in cui brucia l'elio e, ancora più esternamente, da un'altra sottile regione in cui brucia l'idrogeno. Il tutto è immerso in un involuppo (termine che deriva dall'inglese “envelope”, cioè busta) dominato dalla convezione, le cui dimensioni sono enormi (in proporzione il nucleo della stella sarebbe grande come una nocciolina dentro una mongolfiera larga 100 metri!!!). Queste stelle sono estremamente luminose (10000 volte più del Sole) e

piuttosto fredde (la temperatura in superficie è tipicamente intorno ai 3000 gradi, da confrontare con i 5500 gradi della superficie del Sole). Una temperatura esterna così bassa permette la formazione di molecole complesse, che a loro volta si fondono in strutture sempre più grandi, sino a diventare veri e propri granelli di polvere (grandi qualche milionesimo di metro). Le stelle AGB sono i produttori di polvere più efficienti nell'Universo. Questi granelli interagiscono con la luce emessa dalla stella centrale e possono allontanarsi, trascinando con loro il gas stellare. Questo fenomeno è dunque all'origine della perdita di massa delle stelle AGB, che risultano essere tra i più importanti "inquinatori chimici" del mezzo interstellare. Gran parte degli elementi formati al loro interno viene dunque ridistribuita nello spazio (il processo è idealmente rappresentato in **Figura 10**).

Uno dei principali prodotti delle stelle AGB è il carbonio: si pensa infatti che la maggior parte del carbonio nell'Universo provenga da questi oggetti stellari. Oltre al carbonio, però, queste stelle producono molti altri elementi leggeri, come l'azoto (di cui è principalmente composta l'atmosfera terrestre), il fluoro (una componente essenziale dei dentifrici) o il sodio (come si vivrebbe senza sale?). Per non parlare degli elementi pesanti: senza queste stelle non avremmo il piombo, un elemento noto all'umanità da più di 3000 anni, o elementi meno noti come lo stronzio (senza il quale però nessun bambino potrebbe assistere ad uno spettacolo pirotecnico).

Capitolo 9: I sistemi binari di stelle di neutroni

Una stella di neutroni è ciò che resta di una stella massiccia (ossia grande almeno 10 volte il nostro Sole), una volta terminati i bruciamenti termonucleari che portano alla produzione di ferro. La massa di una stella di neutroni è solo 2-3 volte la massa del Sole, perché se fosse più grande, la struttura collasserebbe in un buco nero (N.B.: molta della massa iniziale è stata persa durante le fasi evolutive precedenti).

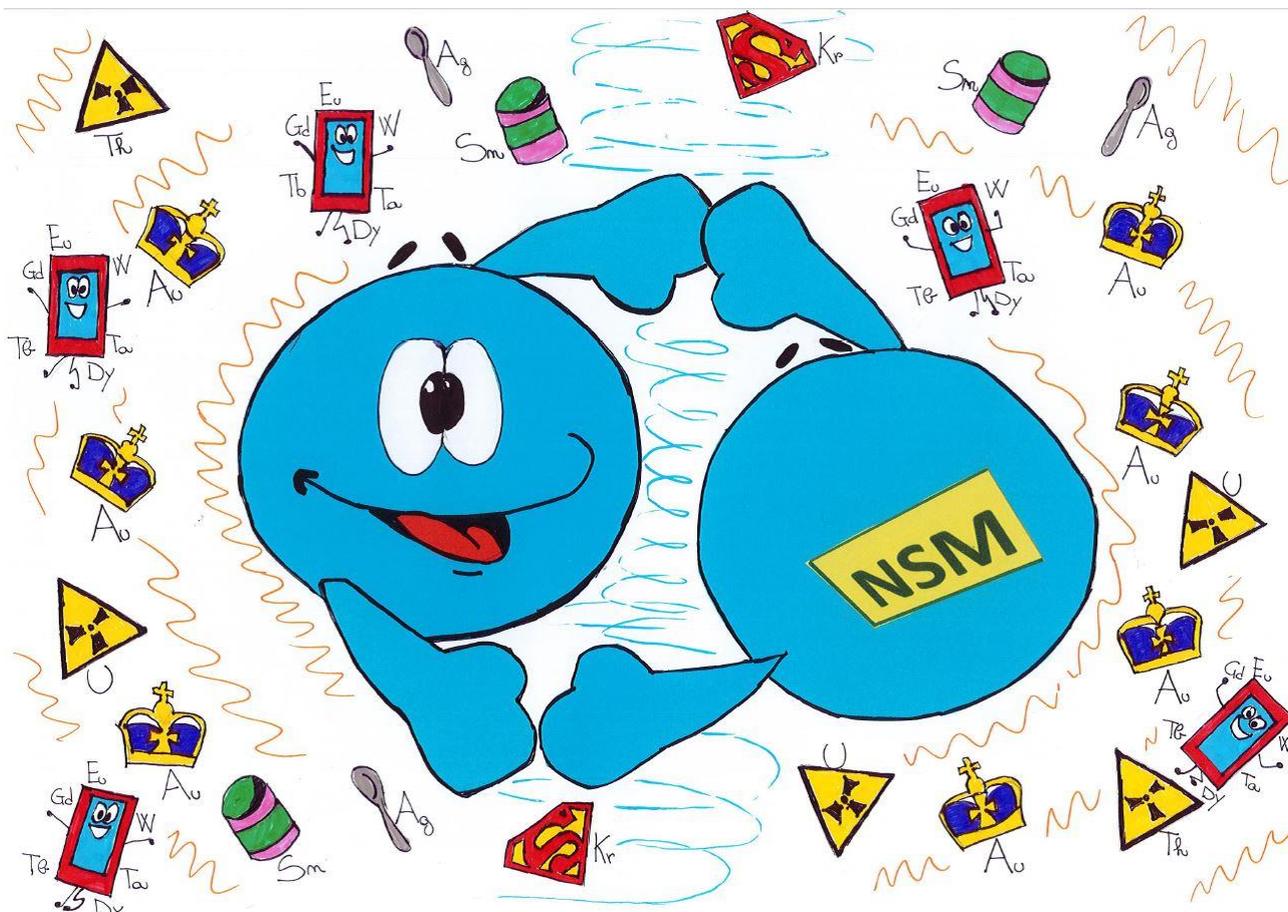


Figura 11: RAPPRESENTAZIONE STILIZZATA DI UN SISTEMA BINARIO DI STELLE DI NEUTRONI

In una stella di neutroni la densità è spaventosamente elevata (un centimetro cubo pesa circa 200 milioni di tonnellate, che sulla Terra equivarrebbero a un cubo di marmo con lati lunghi più di 400 metri!!!). Le estreme condizioni fisiche di questo sistema (in particolare l'elevatissima gravità, cento miliardi di volte più intenso che sulla Terra) fa sì che al suo interno sia presente un grande numero di neutroni (cosa che, come abbiamo visto, non avviene nelle altre stelle o nelle fasi evolutive

precedenti). E' quindi facile immaginare che all'interno di queste stelle si possa sviluppare una ricca nucleosintesi. Il problema però è che la densità così elevata non permette la produzione di alcun elemento (in pratica la struttura è "congelata"). La situazione risulterebbe però completamente diversa se di stelle di neutroni ce ne fossero due, ossia quando siamo in presenza di un sistema binario di stelle di neutroni. In questi sistemi, le due stelle di neutroni spiraleggiano una intorno all'altra sino a che avviene il contatto e le due strutture si fondono (Neutron Stars Merger, NSM, idealmente rappresentato in **Figura 11**). A quel punto si produce un'immane esplosione cosmica (per farla semplice, in realtà le cose sono un pochino più complesse). Al momento del contatto si producono, tra le altre cose, onde gravitazionali (ipotizzate da Albert Einstein circa 100 anni fa).

Il 17 agosto del 2017, gli interferometri VIRGO e LIGO hanno osservato onde gravitazionali provenienti da un NSM distante più di mille miliardi di miliardi di chilometri dalla Terra (la luce proveniente da quel cataclisma ha impiegato circa 130 milioni di anni per arrivare a noi...ciò significa che quell'evento è avvenuto quando sulla Terra c'erano ancora i dinosauri, durante il Cretaceo).

Nei giorni successivi alla scoperta di onde gravitazionali provenienti da GW180817 (questo il nome che è stato assegnato alla sorgente), praticamente tutti i telescopi del mondo hanno puntato in quella direzione. Il motivo è semplice: tentare di osservare un incremento nella curva di luce dell'evento a 4-5 giorni dal primo contatto tra le due stelle (si vedano per esempio le pagine della collaborazione italiana INAF GRAWITA; <https://www.grawita.inaf.it/>). Questo aumento dell'intensità luminosa (poi effettivamente osservato) è la prova inconfutabile che durante la fusione delle due stelle di neutroni si produce un'enormità di elementi pesanti attraverso il processo r. La presenza di questi metalli (in particolare i lantanidi), infatti, fa sì che la struttura sia riscaldata dal loro decadimento (durante un decadimento viene infatti prodotta energia luminosa, che interagisce con il gas stellare e lo riscalda).

In realtà la nucleosintesi del processo r è più complessa, in quanto l'elevato flusso neutronico permette di produrre anche gli Attinidi. Questi isotopi hanno tempi di vita estremamente brevi, perché fissionano spontaneamente (o in seguito ad una cattura neutronica), cioè si spezzano in nuclei più leggeri, producendo nuovi neutroni. I "pezzi" di un attinide che ha appena fissionato, però, possono nuovamente catturare i neutroni appena prodotti. Si instaura così un processo

ciclico, che viene detto “riciclo di fissione”. Questo processo fa sì che la nucleosintesi, in particolare per gli isotopi più pesanti, sia quasi indipendente dalle condizioni fisiche a cui avviene il processo stesso.

I NSMs producono una pletera di elementi chimici (si veda **Figura 11**). Alcuni di questi elementi sono noti (nonché molto preziosi, come l’oro o l’argento), mentre altri sono del tutto sconosciuti ed hanno nomi quasi impronunciabili. Senza di essi, però, molta dell’attuale tecnologia non si sarebbe potuta sviluppare: a titolo d’esempio si potrebbero menzionare l’eurobio (indispensabile per creare i colori nei televisori moderni) o l’erbio (senza il quale non avremmo fibre ottiche veloci). Ma vogliamo parlare anche dei moderni cellulari...?

Capitolo 10: Gli elementi, le stelle ed un moderno cellulare

Il cellulare è forse il caso più emblematico della complessità della chimica (e della sua origine stellare) nella società: per costruirne uno, infatti, ci vogliono più di 50 elementi chimici diversi (come mostrato in **Figura 12**).

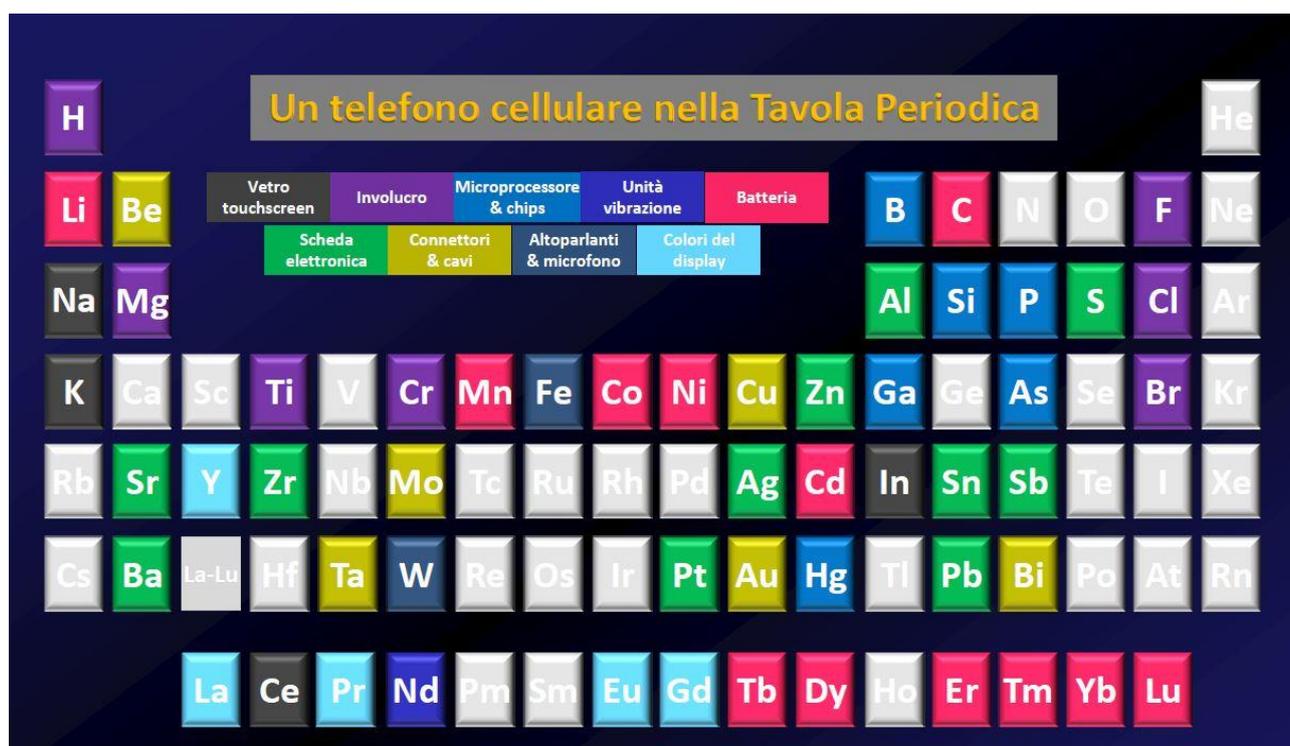


Figura 12: ELEMENTI CHIMICI PRESENTI IN UN CELLULARE

E' curioso realizzare come un singolo cellulare richieda la presenza di elementi chimici creati in ognuna delle classi stellari precedentemente descritta. Infatti, i NSMs hanno prodotto elementi indispensabili per il vetro touchscreen (indio e stagno, che aiutano a condurre elettricità), per la realizzazione dei colori del display (europio e gadolinio), per il buon funzionamento delle batterie (disproso, erbio, itterbio e tulio), della scheda elettronica (argento e platino), nonché per la costruzione di connettori e cavi (oro e tantalio).

Le stelle AGB sono ugualmente importanti, visto il loro contributo alla scheda elettronica (stronzio, bario e piombo), nonché per certi tipi di colore del display (lantano e praseodimio), senza dimenticare il neodimio dell'unità di vibrazione.

Infine, vi sono tutti gli elementi provenienti dalle Supernovae, senza le quali non si potrebbe costruire l'involucro (magnesio, titanio e cromo), i cavi (rame) nonché tutte le componenti contenenti ferro.

Quindi possiamo concludere che non solo siamo biologicamente FIGLI DELLE STELLE, ma senza di loro non potremmo nemmeno fare cose semplicissime che caratterizzano la nostra vita quotidiana, come usare un computer, accendere la TV o fare una banale telefonata!

Per domande e/o curiosità ecco il mio contatto: sergio.cristallo@inaf.it

Un grazie particolare al professor Sebastiano (per la critica revisione dei contenuti effettuata dall'alto...o basso...dei suoi 10 anni) e al mio stimato collega Luciano. Ringrazio anche Egizia, per la realizzazione degli splendidi disegni, e le mie due gioie Sabrina e Sarastella, per il supporto morale!