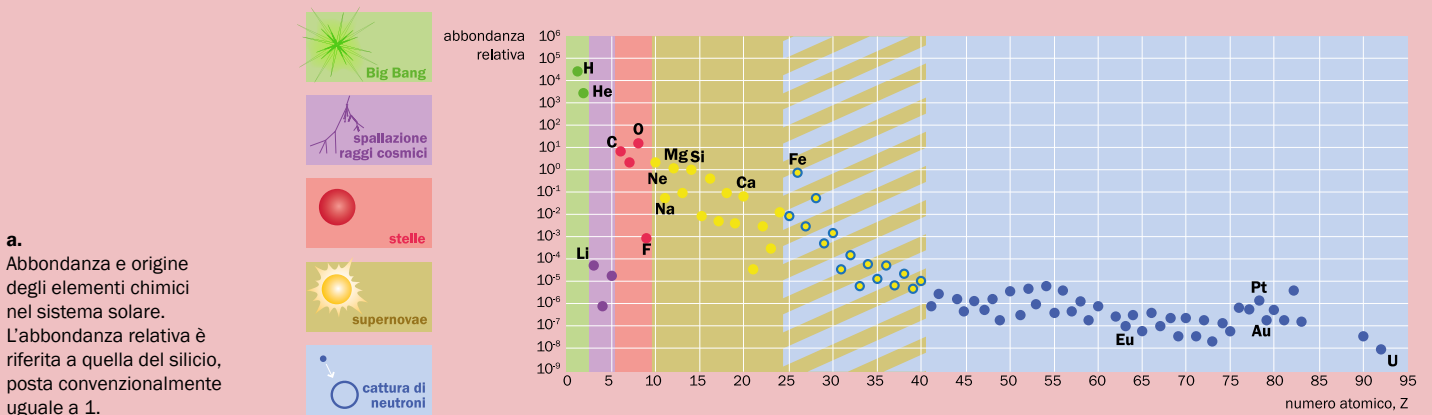


Polvere di stelle

La genesi degli elementi chimici

di Francesca Matteucci



All'inizio ci fu il Big Bang, l'evento che ha dato origine al nostro universo, e nei primi tre minuti a partire dal Big Bang si formarono gli elementi primordiali, ovvero l'idrogeno, l'elio, il deuterio e il litio. Gli elementi chimici sono caratterizzati da due numeri: il numero atomico, ovvero il numero di protoni nel nucleo, che identifica un particolare elemento, e il numero di massa che rappresenta la somma di neutroni e protoni nel nucleo. Uno stesso elemento può avere vari isotopi che hanno lo stesso numero di protoni ma diverso numero di neutroni e quindi diverso numero di massa. Da qui in poi useremo solo il numero di massa. L'idrogeno ha numero di massa 1, il deuterio 2 e l'elio 4. Il litio che si formò nel Big Bang ha numero di massa uguale a 7, il numero di massa 8 non è stabile così come non lo è il 5, e tutti gli elementi con numero maggiore di 8 sono stati formati in seguito. In particolare, tutti gli elementi dal carbonio, che ha numero di massa 12, fino all'uranio e ai transuranici sono stati creati dalle reazioni nucleari che avvengono nelle stelle. Gli elementi con numero di massa 6, 9, 10 e 11 si sono formati attraverso processi di "spallazione", ovvero interazione tra raggi cosmici e atomi di carbonio, azoto e ossigeno presenti nel mezzo interstellare. Durante il Big Bang le temperature erano altissime e i nuclei degli elementi leggeri si sono iniziati a formare nell'intervallo di temperatura tra un miliardo e cento milioni di kelvin. La temperatura infatti iniziò a diminuire a partire dal Big Bang poiché l'universo si stava espandendo. Il carbonio e gli altri elementi pesanti non si formarono a quell'epoca, perché dopo la formazione degli atomi di elio, che sono i mattoni per costruire il carbonio, le condizioni di temperatura e densità nell'universo non erano sufficienti per la fusione dell'elio, che avvenne in seguito nelle stelle. Solo dopo la formazione delle prime stelle iniziò la formazione di tutti

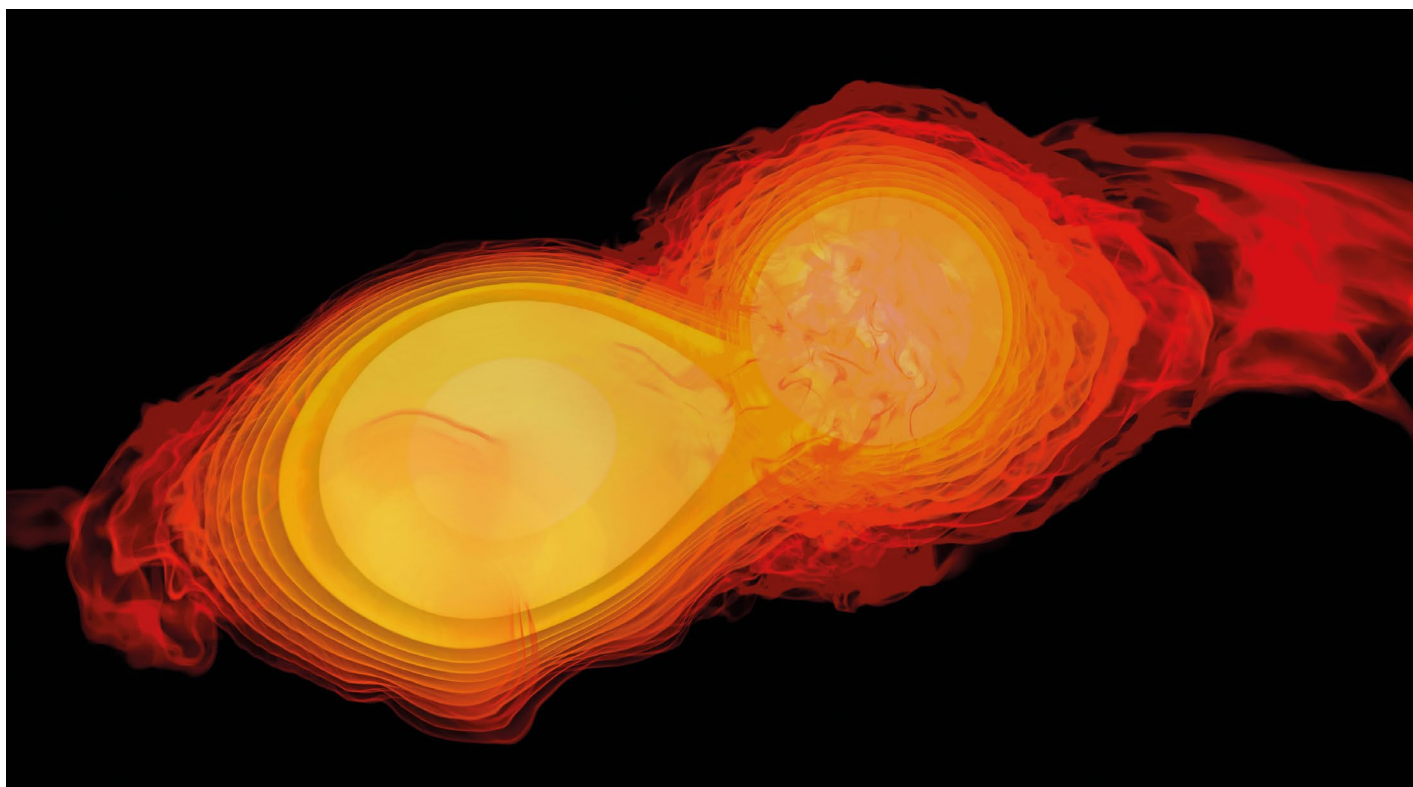
gli elementi chimici che conosciamo e che formano la tavola periodica di Mendeleev. È interessante dunque studiare come si sono formati e distribuiti questi elementi nel cosmo. In particolare, essi sono maggiormente concentrati nelle galassie dove si trova la maggioranza delle stelle che sono le fucine nucleari per la produzione degli elementi. La maggior parte delle stelle ha una massa simile al nostro Sole ma esistono anche stelle molto più massicce del Sole, da 10 a 100 volte di più. Sono proprio queste stelle massicce che producono la maggior parte degli elementi pesanti a partire dal carbonio. Ma per capirci di più dobbiamo sapere come vivono e muoiono le stelle di varie masse. Stelle come il nostro Sole trasformano idrogeno in elio al loro centro attraverso una catena di reazioni nota col nome di "catena protone-protone". All'inizio della catena due protoni si fondono per dare origine a un nucleo di deuterio, poi il deuterio cattura a sua volta un protone per formare elio con numero di massa 3. Dopo di che, due nuclei di elio 3 si fondono per dare origine all'elio 4 che è l'isotopo più abbondante. Questa catena avviene con produzione di energia e di neutrini. L'energia del Sole deriva proprio da questa catena di reazioni. Una stella come il Sole, quando ha esaurito l'idrogeno al centro, inizia a contrarre il proprio nucleo che si scalda fino ad accendere la reazione che produce il carbonio a partire da tre nuclei di elio. All'esaurimento dell'elio rimane un nucleo stellare di carbonio e ossigeno che non sarà mai più in grado di accendere le successive reazioni di fusione, poiché il nucleo della stella è troppo piccolo per riuscire, contraendosi, a raggiungere le temperature necessarie alla fusione del carbonio. Pertanto, queste stelle muoiono come nane bianche di carbonio e ossigeno, dopo aver espulso il mantello esterno ricco di idrogeno ed elio in un evento noto con il nome di "nebulosa planetaria".

Le nane bianche sono oggetti molto densi: con una massa come il Sole concentrata nelle dimensioni della Terra, la loro densità è pari a quella di una zolletta di zucchero che pesa come un camion. Le stelle più piccole del Sole muoiono anch'esse come nane bianche di carbonio e ossigeno, ma solo se hanno massa superiore a 0,5 masse solari. Le stelle al di sotto di questa massa muoiono come nane bianche di elio. Per le stelle maggiori di 10 masse solari, invece, il destino è diverso: dopo aver superato le fasi di fusione dell'idrogeno e dell'elio, esse bruciano il carbonio per formare neon e, in seguito, il neon forma ossigeno per fotodisintegrazione (un processo in cui fotoni altamente energetici interagiscono col neon) e durante queste fasi si formano alcuni elementi chiamati "alfa", ottenuti da reazioni di fusione nucleare che convertono nuclei di elio in nuclei più pesanti, fino al silicio che ha numero di massa pari a 28. Anche il silicio si accende a temperature dell'ordine dei miliardi di kelvin e si formano gli altri elementi alfa fino al ferro. Il ferro, infatti, è il nucleo che possiede la massima energia di legame per nucleone.

Con la formazione del ferro le reazioni di fusione nucleare si bloccano, poiché oltre il ferro non è più possibile fondere nuclei leggeri in nuclei più pesanti. Ma allora chi ha formato gli elementi molto più pesanti dal ferro? Chi ha fatto l'oro dei nostri anelli? E l'uranio? Questi elementi vengono sempre formati dentro le stelle ma non attraverso la serie di reazioni di fusione descritte sopra, bensì per cattura di neutroni su nuclei di ferro. Questi elementi si chiamano "elementi-s" ed "elementi-r" a seconda della rapidità di cattura neutronica in relazione al tempo di decadimento beta dei nucleoni (protoni che si trasformano in neutroni e viceversa nei nuclei) (vd. asimmetrie n. 26 p. 15, ndr). In questo modo si sono formati tutti gli elementi chimici che conosciamo e la concentrazione degli elementi pesanti è cresciuta dal Big Bang ad oggi attraverso un processo che chiamiamo evoluzione chimica: le stelle nascono, vivono e muoiono restituendo al mezzo interstellare gli elementi pesanti sintetizzati nel loro interno, e così ogni nuova generazione di stelle nasce con un contenuto di elementi pesanti (detti "metalli" dagli astronomi) sempre maggiore.

b.
Una piccola sezione della nebulosa Velo, osservata dal telescopio spaziale Hubble. Questa nebulosa è un antico resto di supernova.





I maggiori produttori di metalli sono le supernovae, potentissime esplosioni di stelle che immettono i prodotti dei bruciamenti nucleari nel gas interstellare da cui si formeranno nuove stelle. Le supernovae rappresentano la morte delle stelle con massa superiore a 10 masse solari, che esplodono quando si trovano con un nucleo di ferro che non può più accendersi e può solo contrarsi fino a raggiungere l'equilibrio o come stella di neutroni (materia densa come una goccia di pioggia che contenga tutta la popolazione del mondo) o come buco nero. Durante l'esplosione la supernova espelle tutti gli elementi formati nei bruciamenti precedenti, in particolare gli elementi alfa (carbonio, ossigeno, neon, magnesio, silicio, calcio), un po' di elementi con masse vicine a quella del ferro e gli elementi-r. Altre supernovae derivano da nane bianche in sistemi binari che esplodono catastroficamente per accrescimento di gas dalla stella compagna, il quale accende il carbonio e l'ossigeno della nana bianca ad altissime temperature innescando le reazioni che portano fino al ferro. Pertanto, questi oggetti immettono soprattutto ferro nel mezzo interstellare. La loro peculiarità è che non lasciano nulla dietro di sé poiché la nana bianca viene completamente distrutta nell'esplosione. Va detto che riguardo alla produzione degli elementi-r (oro, platino, europio) si pensa che la fusione di due stelle di

neutroni o di una stella di neutroni e un buco nero in sistemi binari possa essere il canale preferenziale, come osservato nell'evento di onde gravitazionali avvenuto il 17 agosto 2017. Gli elementi-s invece (ad esempio il bario) vengono massimamente prodotti da stelle di massa piccola (da 1 a 3 masse solari) durante la fase di bruciamento dell'elio, nel corso della quale agiscono reazioni che producono neutroni che poi vengono catturati da nuclei come il ferro preesistenti nella stella. In conclusione, se nei primi tre minuti dal Big Bang si sono formati gli elementi leggeri e più diffusi in natura, come l'idrogeno e l'elio, tutti gli elementi pesanti sono stati formati dalle reazioni di fusione nucleare nelle stelle. In quegli elementi c'è la vita, ci siamo noi, i figli delle stelle.

c.
Rielaborazione grafica di una collisione di due stelle di neutroni.

Biografia

Francesca Matteucci è professore ordinario presso l'Università di Trieste e ha lavorato nel campo della formazione degli elementi chimici nelle stelle e dell'evoluzione chimica delle galassie. È socio nazionale dell'Accademia dei Lincei e socio corrispondente dell'Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.28.5