

Siamo “polvere di stelle”: come la chimica costruisce l’Universo

Giuseppe Bellomo¹

e-mail: Giuseppe.bellomo2@studio.unibo.it

Abstract. This work examines the connection between Chemistry and Astronomy, showing how the chemical composition of matter is the result of cosmic evolution. Primordial nucleosynthesis produced only the lightest elements, while successive generations of stars synthesized heavier elements through nuclear fusion. Supernovae explosions and Neutron Stars mergers dispersed these elements into the interstellar medium, enabling the formation of chemically enriched stars and planetary systems. The Sun is discussed as a second-generation star whose composition reflects this cumulative process. Finally, the study considers the future evolution of the Sun and the fate of the Earth, highlighting that planetary systems and their chemistry represent temporary stages in the continuous evolution of matter in the Universe.

Keywords: nucleosintesi; evoluzione stellare; supernovae; stelle di neutroni; la fine della Terra

1. Introduzione

Chimica e astronomia vengono spesso considerate discipline distinte: la prima si occupa della struttura e delle trasformazioni della materia su scala microscopica, mentre la seconda studia l’Universo su scale spaziali e temporali immensamente più ampie. Questa distinzione, tuttavia, è in larga parte convenzionale. La composizione chimica della materia osservabile sulla Terra è, infatti, il risultato diretto di processi avvenuti nel corso della storia cosmica e non può essere compresa appieno senza inserirla nel contesto della sua origine. Gli atomi che costituiscono pianeti, atmosfere e organismi viventi non sono entità immutabili, ma il prodotto di condizioni fisiche ben definite, caratterizzate da temperature estreme, densità incredibilmente elevate, intensi campi gravitazionali e tempi dell’ordine di miliardi di anni. Sotto questo punto di vista, la chimica rappresenta una disciplina profondamente legata con l’evoluzione dell’universo in cui la possibilità che certi elementi o strutture esistano, persistano o si trasformino dipende in modo inequivocabile dall’ambiente in cui si trovano. Questo lavoro analizza il legame profondo tra le due discipline mostrando come l’origine, l’abbondanza e la distribuzione degli elementi siano il risultato di una lunga evoluzione che procede da miliardi di anni. In quest’ottica, il Sole, la Terra e più in generale il sistema solare non rappresentano né un punto di partenza né un punto di arrivo, ma una configurazione temporanea della materia all’interno di un ciclo estremamente più vasto.

2. Nucleosintesi primordiale e condizioni iniziali della chimica cosmica

La storia del legame tra chimica e astronomia inizia nei primissimi istanti dell’universo, in un’epoca in cui le condizioni fisiche erano radicalmente diverse da quelle osservabili oggi. Nei primi secondi dopo il Big Bang, lo spazio era caratterizzato da temperature superiori a 10^{10} kelvin e da densità estremamente elevate. In queste condizioni, la materia non poteva esistere sotto forma di atomi o

¹ Giuseppe Bellomo, laureato in Fisica e Astronomia, è attualmente laureando in Didattica e Comunicazione delle Scienze Naturali presso l’Alma Mater Studiorum-Università di Bologna. Insegna Matematica e Fisica presso il Liceo Artistico “R. Cottini” di Torino e divulga temi e curiosità astronomiche sui suoi canali social con il nome *Astrodoc999*.

nuclei stabili: protoni e neutroni si formavano e si distruggevano continuamente all'interno di un plasma dominato da particelle elementari e radiazione. Con l'espansione dell'Universo e il conseguente raffreddamento, si creò però, per la prima volta, la possibilità di ottenere una struttura nucleare stabile. Quando la temperatura scese al di sotto del miliardo di kelvin, protoni e neutroni poterono combinarsi formando i primi nuclei atomici. Questa fase, nota come nucleosintesi primordiale, avvenne tra circa il primo e il ventesimo minuto dopo il Big Bang. I protoni, già formati nei primi istanti e molto più abbondanti dei neutroni, erano stabili: per questo gran parte di essi non trovò neutroni con cui legarsi, e il Prozio (^1H cioè l'isotopo di idrogeno costituito da un solo protone e privo di neutroni), rimase l'elemento dominante dell'universo. Solo una piccola parte di protoni riuscì a catturare un neutrone, formando deuterio, il primo "mattoncino" fondamentale per i processi successivi. Una volta che l'universo si raffreddò ulteriormente le reazioni poterono proseguire con efficienza, portando alla formazione di elio-3, elio-4 e piccole tracce di litio-7.

Il risultato finale di questa fase fu una composizione chimica sorprendentemente semplice, ma molto ben definita: circa il 75% di idrogeno e il 25% di elio, con tracce minime di litio. Questa distribuzione non fu arbitraria, ma il risultato diretto dell'equilibrio tra tre fattori fondamentali: la temperatura dell'universo, la densità della materia e la rapidità dell'espansione cosmica. Una variazione anche minima di uno solo di questi parametri avrebbe prodotto un universo chimicamente molto diverso, con conseguenze radicali sull'evoluzione successiva delle strutture cosmiche. La nucleosintesi primordiale impose, quindi, limiti estremamente rigidi: il breve tempo disponibile prima che l'espansione diluisse la materia impedì qualsiasi percorso verso una chimica più complessa. Questo spiega perché elementi fondamentali come carbonio, ossigeno e altri fino al ferro non possano avere avuto origine primordiale, ma debbano necessariamente essere stati prodotti in fasi successive. Un aspetto fondamentale di questo stadio è che esso ha stabilito le condizioni per tutta la chimica futura, poiché l'abbondanza di alcuni elementi rispetto ad altri ha determinato la formazione e la composizione di nubi di gas da cui si sono formate le prime stelle e ha influenzato direttamente la loro evoluzione. In particolare, la scarsità di elementi più pesanti ha limitato fortemente i meccanismi di raffreddamento delle nubi stesse, rendendo più difficile il collasso gravitazionale e favorendo, nelle prime epoche cosmiche, la formazione di astri molto massicci. Ogni ulteriore processo, dalla fusione nucleare nelle stelle fino alla nascita dei pianeti, è stato dunque vincolato da questo stato iniziale della materia.

3. Dalla materia primordiale alle stelle di Popolazione III

Una volta conclusa la nucleosintesi primordiale, l'universo entrò in una fase radicalmente diversa della sua evoluzione, durante la quale la composizione chimica rimase sostanzialmente invariata per centinaia di milioni di anni e le strutture su larga scala iniziarono molto lentamente a formarsi sotto l'azione della gravità. In questo periodo, la materia era costituita quasi esclusivamente da idrogeno ed elio neutri, distribuiti in modo pressoché uniforme, con leggere fluttuazioni di densità ereditate dalle prime fasi dell'espansione. Queste fluttuazioni, seppur inizialmente minime, giocarono un ruolo importante. Le lievi variazioni di densità presenti nel gas primordiale furono amplificate dalla gravità: le regioni appena più dense esercitavano infatti un'attrazione gravitazionale leggermente maggiore, catturando ulteriore materia e diventando progressivamente più compatte a tal punto da innescare la formazione delle prime nubi. Tale processo segnò l'inizio della transizione da un universo chimicamente semplice, ma strutturalmente omogeneo, a un cosmo in cui la materia cominciava a organizzarsi in sistemi complessi. Un fattore determinante di questa fase, come accennato precedentemente, fu l'assenza quasi totale di elementi pesanti. Gli atomi di idrogeno ed elio hanno strutture elettroniche molto semplici, con pochi stati eccitati disponibili, per cui possono emettere radiazione solo attraverso un numero limitato di transizioni energetiche e riescono a dissipare calore in modo poco efficiente. In assenza di un raffreddamento adeguato, la pressione termica ha contrastato il collasso gravitazionale, rallentando la formazione delle prime strutture compatte. Inoltre, il raffreddamento del gas primordiale fu possibile praticamente solo grazie all'idrogeno molecolare, H_2 , capace di emettere radiazione a queste temperature. Tuttavia, la sua formazione era rara e inefficiente, quindi il gas

riusciva a perdere energia molto lentamente. Si impose dunque un vincolo fondamentale: solo nubi molto massicce potevano accumulare una quantità sufficiente di materia da superare la pressione termica e collassare sotto il proprio peso. Di conseguenza, le prime stelle che si formarono non furono simili a quelle osservabili attualmente, ma oggetti estremamente massicci oggi noti come stelle di Popolazione III. Esse hanno rappresentato la prima generazione di oggetti celesti del nativo universo caratterizzate dall'assenza totale di metalli. Ciò fece sì che la loro composizione rispecchiasse direttamente quella fissata dalla nucleosintesi primordiale, mentre il limitato raffreddamento radiativo ne favorì la crescita fino a valori probabilmente compresi tra alcune decine e qualche centinaio di masse solari (Figura 1).



Figura 1. Probabile confronto fra una stella di Popolazione III e il Sole

Inoltre, tali dimensioni portarono a temperature interne estremamente elevate, sufficienti a innescare rapidamente le reazioni di fusione nucleare. Le stelle di Popolazione III ebbero, quindi, vita molto breve, dell'ordine di pochi milioni di anni, rispetto ai miliardi di anni tipici delle stelle di massa minore. Pur essendo formate quasi esclusivamente da idrogeno ed elio, esse furono i primi ambienti in cui divenne possibile la produzione sistematica di elementi più pesanti. La fine della vita delle stelle di Popolazione III fu altrettanto importante quanto la loro formazione: molte di esse terminarono il proprio ciclo vitale in violente esplosioni, disperdendo nello spazio interstellare gli elementi prodotti durante la loro esistenza. Il materiale arricchito si mescolò poi al gas primordiale circostante, modificandone la composizione chimica e rendendo possibile la formazione di nuove generazioni stellari con caratteristiche differenti.

Esse hanno pertanto segnato il passaggio da un cosmo dominato da una chimica estremamente semplice a un ambiente in cui la varietà degli elementi ha cominciato ad aumentare progressivamente. Senza questa prima generazione stellare, non sarebbe stato possibile alcun ulteriore sviluppo, né tanto meno la formazione di stelle simili al Sole.

4. Evoluzione stellare: stelle di Popolazione II e I

Con la dispersione nel mezzo interstellare degli elementi prodotti dalle stelle di Popolazione III, l'universo entrò in una nuova fase della propria evoluzione. Il gas, pur rimanendo dominato da idrogeno ed elio, non fu più chimicamente primordiale: la presenza anche di quantità molto piccole di elementi più pesanti modificò in modo sostanziale il comportamento fisico della materia e, di conseguenza, i processi di formazione ed evoluzione successiva. Questo arricchimento segnò la transizione verso

la formazione di nuove stelle, che si svilupparono in ambienti a basso contenuto metallico, ma non del tutto privi di elementi più pesanti. Dal punto di vista fisico, la presenza soprattutto di carbonio e ossigeno introdusse nuovi canali di raffreddamento radiativo. Atomi e ioni con strutture elettroniche più complesse poterono emettere radiazione in modo più efficiente rispetto all'idrogeno e all'elio, consentendo al gas di dissipare energia più rapidamente durante il collasso gravitazionale. Una conseguenza diretta di questo processo fu la nascita di stelle con una distribuzione di masse diverse da quella delle generazioni precedenti chiamate stelle di Popolazione II. Queste ultime erano formate sia da oggetti celesti di grande massa, capaci di evolvere rapidamente, sia da astri di massa intermedia o piccola, caratterizzate da tempi di vita molto più lunghi. Questa diversificazione ha avuto un impatto fondamentale sulla chimica dell'universo, poiché ha determinato quali reazioni nucleari sarebbero potute avvenire e su quali scale temporali. All'interno delle stelle di Popolazione II, la fase di sequenza principale è stata (e lo è tutt'ora) dominata dalla fusione dell'idrogeno in elio. Nelle stelle meno massicce la fusione dell'idrogeno procede soprattutto tramite la catena protone-protone, mentre in quelle con massa maggiore diventa dominante il ciclo carbonio-azoto-ossigeno (CNO). Anche in questo caso la storia cosmica lascia un'impronta decisiva: le reazioni nucleari che una stella può sostenere dipendono direttamente dalla composizione del gas da cui hanno avuto origine. Questi elementi non rimangono necessariamente confinati nel nucleo: processi di mescolamento interno, come i fenomeni convettivi, possono trasportare parte del materiale sintetizzato verso gli strati più esterni dell'astro, arricchendone l'involucro superficiale. Nei corpi celesti più massicci l'evoluzione prosegue dunque oltre la fusione dell'elio: l'aumento della temperatura e della densità nel nucleo permette l'attivazione di stadi successivi, in cui vengono coinvolti nuclei via via più pesanti. L'interno di questi oggetti assume così una struttura a strati concentrici, ciascuno sede di una specifica reazione di fusione. Il continuo arricchimento del mezzo interstellare porta, infine, alla formazione delle stelle di Popolazione I, tipiche delle regioni più giovani delle galassie, come il disco della Via Lattea. Tali oggetti celesti si formano in ambienti ricchi di metalli e mostrano una chimica molto più complessa rispetto alle generazioni precedenti. La maggiore quantità di metalli favorisce un raffreddamento ancora più efficiente del gas, rendendo possibile la formazione di stelle di massa relativamente piccola, come il Sole, con tempi di vita dell'ordine di miliardi di anni. Chimicamente, le stelle di Popolazione I svolgono un ruolo complementare rispetto alle stelle massicce delle popolazioni precedenti. Pur non raggiungendo le condizioni estreme necessarie per produrre gli elementi più pesanti, contribuiscono in modo significativo alla distribuzione di elementi intermedi attraverso venti stellari e fasi evolutive avanzate. Questo processo arricchisce ulteriormente il mezzo e prepara il materiale da cui si formeranno i sistemi planetari. Se le stelle di Popolazione III avviano la chimica complessa, quelle di Popolazione II la ampliano e la diversificano, mentre le stelle di Popolazione I ne consolidano i risultati su scale temporali molto lunghe. Questo intreccio costituisce il contesto indispensabile per capire perché certi elementi siano abbondanti nell'Universo e perché altri richiedano invece condizioni ancora più estreme per formarsi.

5. La soglia energetica del ferro e l'esplosione di supernova

L'evoluzione delle stelle più massicce conduce inevitabilmente a una fase in cui la produzione di energia nucleare non è più in grado di sostenere l'equilibrio idrostatico. Come discusso nel paragrafo precedente, nelle stelle sufficientemente massicce l'aumento progressivo della temperatura e della densità nel nucleo consente l'innescio di reazioni nucleari successive alla fusione dell'elio. Queste reazioni coinvolgono nuclei sempre più pesanti e avvengono in fasi via via più brevi, riflettendo una crescente instabilità dell'intero sistema stellare. Il punto fondamentale di questa evoluzione è la produzione del ferro: i nuclei di questo gruppo occupano infatti una posizione particolare, poiché possiedono la massima energia di legame per nucleone. Ciò significa che fonderli non libererebbe energia ma ne richiederebbe. Quando nel nucleo di un astro massiccio si accumula una quantità significativa di questo elemento, la fusione non può più sostenere la gravità: la pressione termica crolla rapidamente e il core comincia a collassare. In questa fase, l'evoluzione stellare non è

più governata da un equilibrio quasi statico, ma da un processo dinamico estremamente rapido che provoca il collasso della parte interna in tempi dell'ordine di frazioni di secondo. A causa di questo violentissimo processo la gravità comprime la materia fino a densità enormi, tali che gli elettroni vengono forzati a combinarsi con i protoni attraverso reazioni di cattura elettronica, producendo neutroni ed emettendo neutrini. Tale fenomeno riduce ulteriormente la pressione interna, accelerando il collasso. La materia a questo punto perde quasi del tutto la struttura atomica ordinaria e i nuclei vengono compressi in uno stato ancora più denso, dominato dalle interazioni nucleari fondamentali. Il collasso non procede, però, indefinitamente: quando infatti la densità del nucleo raggiunge valori comparabili a quelli dei nuclei atomici, la materia diventa praticamente incompressibile e il brusco arresto del collasso produce un'onda d'urto che si propaga verso l'esterno. Inizialmente, tale onda tende a smorzarsi, ma l'enorme flusso di neutrini prodotti durante il collasso trasferisce energia agli strati circostanti, contribuendo a riattivare e rafforzare l'onda stessa. Il risultato finale è l'esplosione della stella in supernova (Figura 2) che rappresenta uno degli eventi più energetici dell'universo. In pochi secondi viene rilasciata un'energia paragonabile a quella emessa da una stella come il Sole nell'arco di tutta la sua vita. Gli strati esterni dell'astro vengono espulsi nello spazio interstellare a velocità di migliaia di chilometri al secondo, trasportando con sé gli elementi prodotti durante le diverse fasi dell'evoluzione.

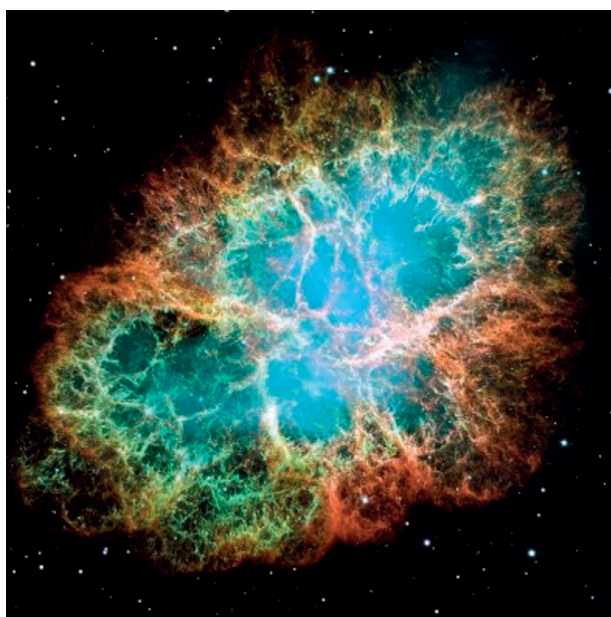


Figura 2. Ciò che resta della Supernova del Granchio (SN 1054) osservata per la prima volta a partire dal 4 luglio 1054

Dal punto di vista chimico, le supernovae hanno un ruolo insostituibile, perché liberano nel mezzo interstellare tutti gli elementi prodotti durante la vita della stella, dal carbonio fino al ferro. Questo materiale arricchito si mescola al gas circostante, modificandone la composizione e rendendo possibile la formazione di generazioni future di oggetti celesti con un contenuto metallico progressivamente più elevato.

6. Stelle di neutroni: oltre il confine della chimica classica

Quando la massa del nucleo che collassa risulta inferiore alla soglia critica oltre la quale la pressione di degenerazione dei neutroni non può più garantire l'equilibrio idrostatico (limite di Tolman-Oppenheimer-Volkoff), il collasso gravitazionale si arresta, portando alla formazione di una stella di neutroni che rappresenta uno degli stati più estremi della materia osservabili nell'universo (Figura 3).

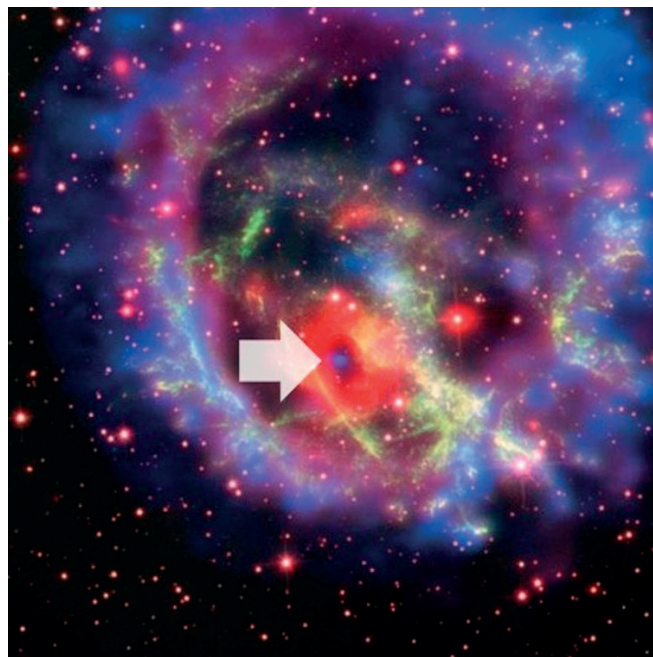


Figura 3. Stella di Neutroni isolata nella Piccola Nube di Magellano; immagine in falsi colori (Hubble Telescope)

In questa stella, la materia non è più organizzata in atomi o nuclei distinti, ma assume una struttura completamente nuova, governata da interazioni fondamentali che operano su scala subnucleare. Durante il collasso che segue l'esplosione di supernova, la gravità comprime il nucleo residuo fino a densità comparabili a quelle dei nuclei atomici, dell'ordine di $10^{14}/10^{15}$ g/cm³. In queste condizioni estreme il risultato è una materia composta quasi interamente da neutroni, con una piccola frazione di protoni ed elettroni residui, necessari a mantenere l'equilibrio elettrico. Dal punto di vista concettuale, una stella di neutroni (Figura 3) può essere vista come un gigantesco nucleo atomico esteso su scala macroscopica in cui, a differenza dei nuclei ordinari, la sua stabilità è garantita non solo dalla fisica delle interazioni nucleari, ma soprattutto dalla pressione di degenerazione dei neutroni stessi, conseguenza diretta del principio di esclusione di Pauli. Tale pressione permette alla stella di opporsi al collasso gravitazionale, stabilendo un equilibrio tra la gravità e le proprietà quantistiche della materia degenerare.

La chimica ordinaria, basata sulle interazioni tra elettroni e nuclei, non è più applicabile e anche la fisica nucleare classica perde gran parte del suo significato, poiché i nuclei non esistono più come entità separate. Tuttavia, proprio questa condizione estrema apre la strada a nuovi processi di trasformazione della materia, che non possono avvenire in nessun altro ambiente dell'universo. Le regioni esterne di tali oggetti presentano una struttura stratificata in cui nuclei estremamente ricchi di neutroni sono immersi in un mare di elettroni degeneri e in cui la materia assume configurazioni che in Astronomia vengono chiamate esotiche. Un aspetto di fondamentale importanza delle stelle di neutroni riguarda il loro ruolo nella nucleosintesi degli elementi più pesanti. Qualora due stelle di neutroni formassero infatti un sistema binario, la perdita di energia tramite onde gravitazionali ne provocherebbe il progressivo avvicinamento fino alla fusione. Nell'impatto, parte del materiale estremamente ricco di neutroni, viene strappato ed espulso nello spazio interstellare; inoltre, anche il disco di accrescimento, che si forma attorno a ciò che è rimasto della stella, produce ulteriori espulsioni di materia. In queste condizioni, i processi di cattura neutronica rapida risultano particolarmente efficienti, dando origine a elementi pesanti ben oltre il ferro. Le osservazioni di questi eventi, accompagnate da emissioni elettromagnetiche note come Kilonovae, hanno fornito una conferma diretta del fatto che le fusioni fra stelle di neutroni sono uno dei principali meccanismi di produzione di elementi pesanti come oro, platino e altri metalli rari, mentre dal punto di vista dell'evoluzione cosmica rappresentano una fase in cui la materia ha raggiunto uno dei massimi livelli di densità e complessità consentiti dalle leggi fisiche conosciute.

7. Il Sole come risultato dell'evoluzione chimica del nostro universo

Il Sole rappresenta un esempio particolarmente istruttivo per cogliere il legame tra chimica ed evoluzione stellare. Pur essendo una stella relativamente giovane ancora lontana dalle fasi avanzate della propria evoluzione, mostra nella sua composizione circa il 2% di elementi come carbonio, azoto e ossigeno, ma anche tracce di magnesio, sodio, calcio e ferro. Questo dato osservativo, apparentemente scontato, fornisce invece un'informazione fondamentale sulla sua storia e sull'ambiente in cui si è formata. Dal punto di vista evolutivo, il Sole è attualmente una stella di sequenza principale di massa relativamente piccola, che trae la propria energia esclusivamente dalla fusione dell'idrogeno in elio attraverso la catena protone-protone. Le condizioni fisiche nel suo nucleo, sebbene sufficienti a sostenere questo processo, non permettono ancora la fusione dell'elio né, tanto meno, la produzione diretta di elementi più pesanti. Come discusso nei paragrafi precedenti, questi elementi vengono sintetizzati solo in fasi evolutive più avanzate o all'interno di stelle di massa maggiore. Il fatto che il Sole contenga quantità apprezzabili di questi elementi (Figura 4) implica che essi fossero già presenti nel gas da cui esso si è formato, dimostrando incontrovertibilmente che si sia evoluto a partire da un mezzo interstellare già arricchito chimicamente da generazioni stellari precedenti, in particolare da stelle massicce che hanno concluso la propria evoluzione come supernovae. La presenza di elementi pesanti ha favorito un raffreddamento più efficiente del gas e ha reso possibile la formazione di un disco protoplanetario più denso. È inoltre importante sottolineare che il Sole non ha ancora fornito un contributo significativo all'arricchimento chimico del cosmo. Solo nelle fasi evolutive future, quando entrerà nello stadio di gigante rossa ed espellerà parte dei suoi strati esterni, potrà restituire al mezzo interstellare una frazione degli elementi ereditati, prodotti e rielaborati nel suo interno, rappresentando un caso significativo di come l'evoluzione chimica dell'universo sia un processo cumulativo in cui ogni generazione stellare acquisisce i prodotti di quelle precedenti e li riutilizza come punto di partenza.

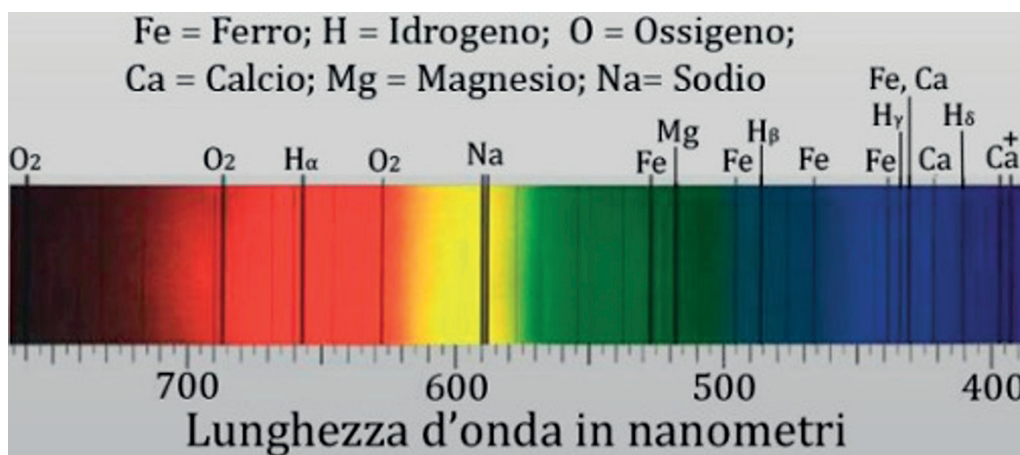


Figura 4. Spettro solare in cui si vedono le linee di assorbimento di elementi più pesanti dell'idrogeno e dell'elio

8. Siamo polvere di stelle, torneremo polvere di stelle: evoluzione e fine della Terra

La storia della chimica cosmica non si conclude con la formazione dei pianeti o con l'emergere della vita, ma prosegue fino alla dissoluzione delle strutture che essa stessa ha reso possibili. La Terra, come ogni oggetto celeste, non rappresenta uno stato finale, ma una fase transitoria di un processo molto più ampio il cui destino è intimamente legato all'evoluzione della nostra stella che ha fornito l'energia necessaria alla stabilità dell'intero sistema e che, in futuro, ne determinerà anche la fine. Il Sole si trova oggi approssimativamente a metà del suo ciclo evolutivo e, quando l'idrogeno del nucleo

sarà esaurito, l'equilibrio che ha garantito la sua stabilità verrà meno. A quel punto, il nucleo inizierà a contrarsi sotto l'azione della gravità, mentre gli strati esterni si espanderanno facendolo entrare nella fase di gigante rossa e aumentando enormemente le proprie dimensioni e luminosità. Le temperature superficiali diminuiranno, ma l'energia totale emessa crescerà in modo significativo. Questo cambiamento avrà conseguenze devastanti per i pianeti interni. La Terra, molto prima di essere fisicamente inglobata dal Sole in espansione, diventerà un ambiente completamente inospitale (Figura 5).

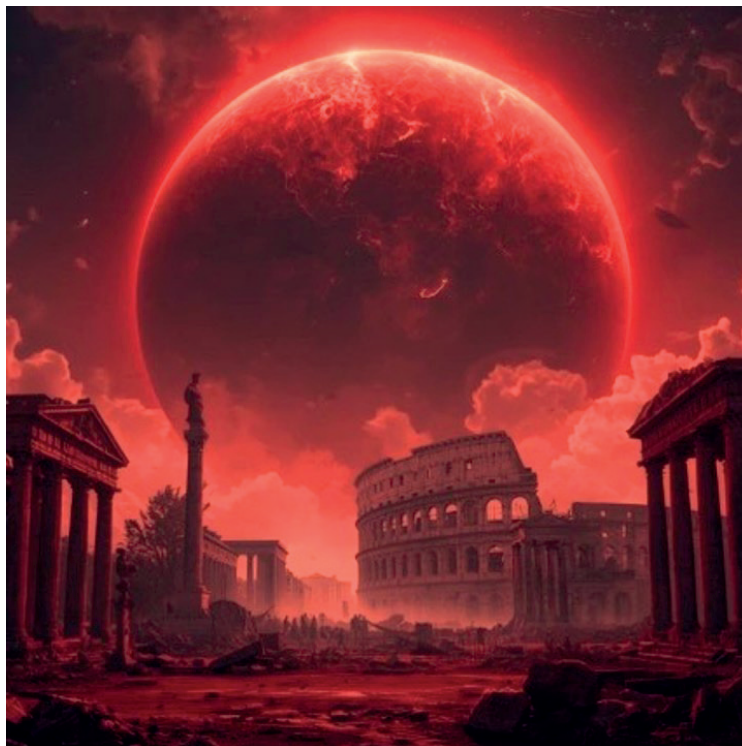


Figura 5. Immagine artistica sul possibile futuro della Terra durante la fase di gigante rossa del Sole

L'aumento della luminosità dell'astro porterà all'evaporazione degli oceani, alla distruzione dell'atmosfera e all'impossibilità di mantenere praticamente qualsiasi forma di vita e, nelle fasi più avanzate di questa evoluzione, l'espansione potrebbe raggiungere o superare l'orbita terrestre disintegrando il nostro pianeta. Indipendentemente dai dettagli dell'evoluzione orbitale, il suo ed il nostro destino è comunque segnato: ormai priva di atmosfera e strutturalmente alterata, essa sarà ridotta a un corpo roccioso sterile, sottoposto a intense radiazioni e a forze gravitazionali estreme in cui i suoi materiali costituenti (silicati, metalli e composti chimici un tempo organizzati in strutture complesse) verranno progressivamente dispersi o trasformati. Parallelamente, nel nucleo del Sole avrà luogo la fusione dell'elio, con la produzione soprattutto di carbonio e ossigeno. Sebbene la nostra stella non sia sufficientemente massiccia da proseguire oltre questa fase, contribuirà comunque all'evoluzione chimica del sistema solare. Attraverso intensi venti stellari, una parte significativa della sua massa verrà espulsa nello spazio, formando una nebulosa planetaria; in questo processo, elementi prodotti o rielaborati nel corso della sua vita verranno restituiti al mezzo interstellare. Sotto questo punto di vista, il suo destino non rappresenta un'eccezione, ma si inserisce nel quadro più ampio dell'evoluzione cosmica. Gli atomi che oggi costituiscono le rocce, l'acqua e gli organismi viventi non verranno distrutti, ma semplicemente riorganizzati pronti a essere incorporati in nuove stelle, nuovi pianeti e, potenzialmente, in altre forme più complesse. La celebre affermazione secondo cui "siamo polvere di stelle" trova così il suo significato più intimo e completo: la fine del nostro pianeta non sarà un epilogo poiché la materia che oggi forma i nostri corpi, i nostri affetti e tutto ciò che conosciamo, verrà

dispersa come seme, pronta a intrecciarsi con altre storie cosmiche. Forse, in un futuro impossibile da immaginare, tornerà a brillare in nuove stelle, a posarsi su nuove terre, a dar vita ad altri occhi rivolti al cielo. Tutto muterà e in questo continuo fluire resterà lieve, ma indelebile, anche la traccia del nostro passaggio.

Riferimenti bibliografici di approfondimento

A. Cimatti, F. Fraternali, C. Nipoti, *Introduction to galaxy formation and evolution: from primordial gas to present-day galaxies*, Cambridge University Press, UK, 2019.

P. C. Clark, S. C. O. Glover, R. S. Klessen, V. Bromm, Gravitational fragmentation in turbulent primordial gas and the initial mass function of population III stars, *The Astrophysical Journal*, 2011, **727**(2), 110.

F. Santoro, J. M. Shull, Critical metallicity and fine-structure emission of primordial gas enriched by the first stars, *The Astrophysical Journal*, 2006, **643**(1), 26.

H.-T. Janka, Explosion mechanisms of core-collapse supernovae, *Annual Review Nuclear and Particle Science*, 2012, **62**, 407 (<https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102711-094901>).

S. Wanajo, H.-T. Janka, B. Müller, Electron-capture supernovae as the origin of elements beyond iron, *The Astrophysical Journal Letters*, 2011, **726**, L15 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2041-8205/726/2/L15/pdf>).

V. Lipunov, *Astrophysics of neutron stars*, Springer-Verlag, Berlin, 2011.

F. K. Thielemann, M. Eichler, I. V. Panov, B. Wehmeyer, Neutron star mergers and nucleosynthesis of heavy elements, *Annual Review Nuclear and Particle Science*, 2017, **67**, 253 (<https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-101916-123246>).

