

L'evoluzione della materia nell'universo: una storia cosmica

*di Daniele Spadaro, Gabriel Ferrero e
Luca Fiorani*

The evolution of matter is a fascinating story that captures the mystery of the universe. The birth of the light elements is followed by the spectacular death of the massive stars that fertilizes interstellar space with heavier nuclei. On observing these phenomena, we ask if the evolution of the universe develops according to what Piero Pasolini calls "the cybernetic principle," a principle which causes it to acquire an always more elevated level of complexity and organization.

In un primo approccio, alquanto semplicistico, possiamo dire che la materia è composta da piccole particelle chiamate atomi. Ma non tutti gli atomi sono uguali. In natura ci sono un centinaio circa di diversi tipi di atomo. Ogni tipo è chiamato "elemento chimico". Per esempio, l'idrogeno è un elemento chimico – quello più semplice, come vedremo – e sia l'ossigeno che il carbonio sono elementi chimici. Le proprietà fisiche e chimiche dei diversi elementi chimici sono molto diverse, ma occorre ricordare che un elemento chimico è, sostanzialmente, un tipo di atomo, caratterizzato dall'avere un numero fissato di protoni nel suo nucleo. Un atomo, infatti, è costituito da un nucleo e una nube di elettroni che gli si muovono attorno. Il nucleo, a sua volta, è composto da protoni e neutroni.

L'atomo di idrogeno ha nel suo nucleo soltanto un protone, attorno al quale si trova un unico elettrone. L'atomo di elio ha invece nel suo nucleo due protoni e due neutroni, attorno ai quali si dispongono due elettroni. Tutti gli altri elementi chimici sono più complessi, hanno un numero maggiore di protoni, neutroni ed elettroni. Per questo motivo sono anche più "pesanti". Infatti, la loro massa aumenta con il numero di protoni e neutroni nei loro nuclei.

Alcuni elementi chimici sono particolarmente importanti per l'esistenza della vita così come la conosciamo, come per esempio l'idrogeno, il carbonio, l'azoto, l'ossigeno, il potassio e il ferro. Vale proprio la pena di chiedersi come si è giunti alla composizione chimica media dell'Universo attuale, e cioè al rapporto tra il numero totale di atomi dei diversi elementi. Come si sono formati gli elementi più pesanti, in particolare quelli presenti negli organismi viventi, uomo compreso? Ad esempio, come hanno avuto origine gli atomi di ferro, costituente base dell'emoglobina che si trova nel nostro sangue? La presenza di tali elementi nella materia dell'Universo è infatti il frutto di un lungo ed elaborato processo che ci accingiamo a raccontare in queste righe.

Secondo il modello cosmologico, pressoché unanimemente accettato, che descrive l'origine e l'evoluzione dell'Universo – il Modello Cosmologico Standard, detto anche teoria del "Big Bang" (grande esplosione) – l'Universo è nato da una fase nella quale temperatura e densità avevano valori estremamente elevati, quasi infiniti¹. In prossimità del tempo zero, cioè 10^{-43} secondi² dopo l'iniziale Big Bang, a partire dal quale consideriamo l'evoluzione dell'Universo attuale, si possono sti-

1 - Per una descrizione complessiva della cosmologia scientifica odierna si veda J. Silk, *Horizons of Cosmology*, Templeton Science and Religion Series 2009. Una descrizione dei motivi che portarono all'adozione generalizzata del modello cosmologico standard si può vedere in H. Kragh, *Cosmology and Controversy*, Princeton University Press 1996.

2 - L'espressione 10^{-43} significa 0,000... (in totale quarantadue zeri dopo la virgola) e dopo un 1. È una notazione scientifica utile per indicare numeri molto piccoli o (usando esponenti positivi) molto grandi, che useremo da qui in poi.

mare temperature dell'ordine di 10^{32} K³. La storia dell'Universo nel suo insieme risulta così la storia dell'espansione e del raffreddamento di materia e radiazione che componevano questa iniziale "sfera di fuoco"⁴.

Se questo è il caso, ne consegue – per quanto inaspettato possa apparire – che è possibile, in base alle conoscenze attuali di fisica nucleare e subnucleare, effettuare accurate previsioni sulla composizione chimica della materia emersa dalle primissime fasi di espansione e conseguente raffreddamento dell'Universo.

Possiamo pensare l'Universo nei suoi primissimi istanti come formato soltanto da energia pura che si espandeva e si raffreddava velocemente. Ben presto però, probabilmente circa 10^{-36} secondi dopo l'istante zero, l'energia cominciò a "condensarsi"⁵ formando le primissime particelle materiali: sia elettroni e fotoni, sia quark, gluoni e altre particelle elementari che oggi si trovano all'interno di protoni, neutroni e tutte le particelle subnucleari. Poco dopo, cioè un milionesimo di secondo dopo l'inizio, l'Universo si raffreddò abbastanza da consentire la comparsa di protoni e neutroni.

In questo stato iniziale della materia però, a causa della temperatura ancora troppo elevata, queste particelle si muovevano così velocemente da non poter rimanere legate tra di loro per formare quelli che oggi conosciamo come nuclei atomici. Ipotizzando l'esistenza di questo stato iniziale, è tuttavia possibile descrivere con buona accuratezza l'evoluzione di tale insieme di particelle durante l'espansione e il raffreddamento della sfera di fuoco per dedurre la composizione chimica della materia uscita dal Big Bang.

La nucleosintesi (formazione di nuclei atomici) primordiale inizia solo qualche minuto dopo l'istante zero, quando la temperatura assume valori via via decrescenti, da $\sim 10^9$ a $\sim 10^8$ K. Alcuni minuti dopo il Big Bang si sono già formati essenzialmente solo due tipi di nuclei atomici nell'Universo: nuclei di idrogeno e di elio⁶.

3 - Il simbolo K sta per gradi Kelvin, l'unità di misura di temperatura usata comunemente in fisica. Per passare da gradi Kelvin a gradi Celsius, o centigradi, basta togliere 273,15. Ma quando parliamo di queste temperature, questi 273 gradi non hanno rilevanza.

4 - Questa è soltanto un'analogia per indicare come si potrebbe immaginare tale stato iniziale dell'Universo: una piccolissima regione molto calda. In realtà non c'era quello che comunemente intendiamo per fuoco poiché il fuoco proviene dalla combustione, la quale richiede l'esistenza di atomi di ossigeno, che a quel momento ancora non esistevano.

5 - Anche questa è un'espressione analogica. Oggi chiamiamo condensazione il passaggio di una sostanza dallo stato gassoso a quello liquido. Questi stati, o fasi, della materia non esistevano minimamente allora. Però, l'apparizione delle prime particelle è stata veramente un cambio di fase dell'Universo primitivo.

6 - Più precisamente, questi nuclei si formano in due isotopi, varietà con uguale numero di protoni, ma differente numero di neutroni. È presente l'idrogeno normale (^1H), soltanto con un protone, e l'idrogeno

La valutazione della quantità di elio così prodotta (elio cosmologico) dipende criticamente, oltre che da un'accurata conoscenza della fisica del neutrone, dai particolari dell'evoluzione dell'Universo primitivo. È quindi strettamente correlata con il modello di Big Bang.

Prima del minuto 17, si sono formate anche tracce dell'elemento successivo nella tavola periodica degli elementi, il litio, denominato quindi litio primordiale. Ci sono anche quantità trascurabili di berillio e boro, ma mancano del tutto carbonio, azoto e ossigeno, elementi necessari per la vita. I calcoli attuali indicano che, dopo questi primi minuti, l'Universo è composto da idrogeno (circa 75% della massa totale) e da elio (circa 25%).

L'Universo si è inizialmente espanso e raffreddato troppo rapidamente per permettere la continuazione della nucleosintesi mediante reazioni nucleari tra le particelle allora esistenti, risultando quindi deficitario degli ingredienti chiave per la vita. Allora, come si sono formati gli atomi che costituiscono il nostro corpo?

Un aiuto importante per rispondere a questa domanda è venuto dallo sviluppo delle conoscenze sulla fisica nucleare nel corso del XX secolo. Tali ricerche hanno permesso di individuare i processi che danno luogo alla nucleosintesi degli elementi chiamati "pesanti" – cioè quelli con più protoni dell'elio –, attraverso una serie di reazioni di fusione nucleare che consentono di ottenere nuclei più grandi a partire dalla interazione di due o più nuclei più piccoli⁷.

Per esempio, facendo reagire due protoni (nuclei di idrogeno) e due neutroni si ottiene un nucleo di elio più una certa quantità di energia che viene liberata sotto forma di raggi γ ⁸.

Il processo è descritto schematicamente con la relazione: $2p + 2n \rightarrow He^4 + \gamma$.

Tuttavia i processi di fusione nucleare possono aver luogo solo in presenza di elevati valori di temperatura e pressione, per permettere ai protoni di superare la repulsione elettrica (ricordiamo che tutti i protoni hanno la stessa carica elettrica positiva) e avvicinarsi tra loro fino a distanze talmente piccole da consentire a un'altra forza (chiamata forza nucleare forte) di entrare in funzione e legarli in una nuova struttura nucleare. Per rendere conto dell'attuale presenza di elementi pesanti, che si sono quindi formati in fasi successive all'iniziale Big Bang, per fusioni nucleari dell'idrogeno e dell'elio cosmologici, deve essere esistito qualche altro

pesante, o deuterio (2H , spesso indicato con D), con un protone e un neutrone. C'è anche l'elio leggero (3He), con due protoni e un neutrone, e l'elio normale (4He), con due di ciascuno.

7 - Per una descrizione alquanto completa di questi fenomeni e lo sviluppo della loro comprensione si veda D.D. Clayton, *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, Univ. of Chicago Press 1983, and R. Kippenhahn & A. Weigert, *Stellar Structure and Evolution*, Springer-Verlag 1994.

8 - I raggi gamma sono onde elettromagnetiche, come la luce, ma estremamente energetiche.

meccanismo che può raggiungere pressioni e temperature abbastanza alte da consentire la formazione di elementi più pesanti.

Negli anni '30 – '50 del secolo scorso Fred Hoyle⁹, George Gamow¹⁰ e altri hanno dimostrato che le reazioni di nucleosintesi, da quelle più semplici, idrogeno in elio, a quelle via via più complesse, che possono produrre gli elementi più pesanti fino al ferro, hanno luogo all'interno delle stelle. La formazione di strutture stellari è una proprietà del tutto naturale della materia dell'Universo. Gli astrofisici hanno quindi acquisito la ragionata sicurezza che, a parte i nuclei creati inizialmente nel Big Bang, tutti gli elementi presenti naturalmente nel cosmo sono stati a loro tempo sintetizzati all'interno delle stelle. Queste hanno quindi giocato e stanno tuttora giocando un ruolo fondamentale nell'evoluzione della materia nell'Universo.

Una stella si forma per condensazione gravitazionale a partire da una nube molecolare¹¹, inizialmente caratterizzata da temperature dell'ordine di 10 – 20 K. Tale massa di gas – nel caso del Sole circa 2×10^{30} kg, di cui il 75% è idrogeno, il 24% elio e il rimanente 1% comprende tutti gli altri elementi –, è mantenuta insieme dalla propria attrazione gravitazionale. La temperatura e la pressione all'interno di una stella sono molto alte. Nel centro del Sole, per esempio, la temperatura si aggira attorno ai 17 milioni di gradi, mentre la pressione arriva quasi a 130 miliardi di volte la pressione atmosferica terrestre. Esistono addirittura casi di stelle, molto più massicce del Sole, in cui la temperatura nel nucleo centrale è di circa 100 milioni di gradi. Durante la maggior parte della sua vita una stella sussiste grazie a un delicato e preciso equilibrio fra questa altissima pressione interna, che provocherebbe l'esplosione della stella, e l'attrazione gravitazionale, che tenderebbe a contrarla verso il suo centro, facendola collassare. Questo equilibrio viene denominato "equilibrio idrostatico".

Le reazioni nucleari sono la sorgente continua dell'energia necessaria per mantenere simili temperature, e dunque tali pressioni, all'interno delle stelle. Avvengono principalmente nella zona centrale, perché richiedono condizioni estreme di temperatura e pressione. L'energia prodotta, inoltre, si propaga verso la superficie della stella e viene successivamente irraggiata nello spazio. Ogni stella quindi, con

9 - Si veda la sequenza di lavori che inizia con F. Hoyle, *The synthesis of the elements from hydrogen*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 1946, Vol. 106, p. 343; continua con F. Hoyle, *On Nuclear Reactions Occuring in Very Hot STARS.I.*, «Astrophysical Journal Supplement», 1954, vol. 1., p. 121; e culmina in F. Hoyle, W.A. Fowler, G.R. Burbidge, & E.M. Burbidge, *Origin of the Elements in Stars*, «Science», 1956, vol. 124, issue 3223, p. 611.

10 - Tra i tanti lavori di Gamow in questo senso, si veda per esempio G. Gamow, *Nuclear Energy Sources and Stellar Evolution*, «Physical Review», 1938, vol. 53, issue 7, p. 595; e pure il suo lavoro seminale in questo campo G. Gamow, *Zur Quantentheorie des Atomkernes*, 1928, «Z. Physik – 51», p. 204.

11 - Tipo di nube interstellare in cui è presente idrogeno molecolare.

tempi e modi dettati dai meccanismi fisici in gioco e dai parametri fondamentali che ne definiscono l'evoluzione, altro non è che un'enorme macchina per la conversione dell'idrogeno in elio e, in seguito, in elementi più pesanti.

Al termine dell'idrogeno nella zona delle reazioni, mancando il supporto energetico, si ha una contrazione nella regione centrale della stella che innalza ulteriormente le temperature sino a giungere all'innesto delle reazioni di fusione dell'elio, sovente con una contemporanea combustione a "guscio" dell'idrogeno nelle zone più distanti dal centro della stella, dove tale elemento è ancora presente. Dopo la fusione di idrogeno in elio, il ciclo si ripete con la trasformazione di elio in carbonio, azoto e ossigeno, in seguito del carbonio in magnesio e neon, e successivamente dell'ossigeno in zolfo e silicio. Infine, nelle stelle più massicce, la fusione del silicio conduce alla formazione di una regione centrale molto ricca in ferro.

La storia di una stella è quindi quella di una continua e progressiva contrazione della sua regione centrale, di volta in volta arrestata dall'innesto di nuove reazioni nucleari di fusione e, con il passare del tempo, la stella assume una struttura a "cipolla", con la presenza di strati di elementi chimici sempre più pesanti verso le regioni centrali.

L'evoluzione stellare non modifica la composizione degli strati superficiali che, di conseguenza, risulta ancora quella della nube originaria da cui si è formata la stella. Inoltre, il mescolamento turbolento del gasstellare non è in grado di portare in superficie il materiale "riprocessato", che quindi resta intrappolato all'interno della stella e non entra direttamente in gioco nei processi di scambio di materia con l'ambiente circostante (come, ad esempio, i venti stellari). Eppure, la composizione chimica del gas interstellare, da cui si formano le stelle più giovani, non mostra solo la presenza di idrogeno ed elio. Gli elementi più pesanti sono presenti in quantità significative, anche se quanto detto sopra sembrerebbe escludere questa possibilità. La presenza di tali nuclei nella materia interstellare, come nel nostro pianeta, richiama quindi la domanda formulata inizialmente: come si è evoluta la composizione chimica dell'Universo?

La risposta può essere data dalla teoria delle strutture stellari, che conduce alla previsione di fenomeni catastrofici alla conclusione della vita delle stelle più massicce. Infatti, la fase di equilibrio quasi statico della struttura stellare è destinata a terminare quando nelle zone centrali si sia formata una massa di ferro in cui si sta per innescare la fusione nucleare (temperatura attorno ai 5×10^9 K): le stelle massicce, nelle fasi evolutive avanzate, vanno in genere incontro a una instabilità finale, indotta o dalla fusione del ferro o dalla sua disintegrazione per assorbimento di raggi gamma. A differenza di tutte le fusioni nucleari esaminate finora, che liberano energia (reazioni esotermiche), entrambi i processi appena descritti implicano un assorbimento di energia (reazioni endotermiche) che accelera la contrazio-

ne della struttura stellare, incrementandone la temperatura centrale e quindi l'efficienza delle stesse reazioni nucleari di fusione endotermica.

Mancando una fonte di energia nella zona centrale della stella, o meglio, essendo essa sostituita da una zona che assorbe energia, in brevissimo tempo, forse in alcuni secondi, la temperatura scende e viene a mancare la pressione necessaria per equilibrare l'attrazione gravitazionale. Tutte le regioni esterne cadono immediatamente verso il centro e si produce dunque il collasso della struttura centrale. Simultaneamente, l'intensa produzione di neutroni nel centro, insieme all'innalzamento della temperatura nelle regioni esterne della stella, provoca un rapido incremento delle combustioni nucleari ancora efficienti nei vari gusci che formano la struttura a "cipolla" della stella. I nuclei atomici sono fortemente "bombardati" da quantità enormi di neutroni, molti dei quali risultano catturati dai nuclei.

Quel che succede all'interno della stella in questi pochi minuti è ancora molto discusso, ma la descrizione che trova più consenso indica che si produce una sorta di "rimbalzo" (infatti, il processo viene chiamato rimbalzo idrodinamico)¹². Il materiale che cade verso il centro da tutte le direzioni si "scontra" e rimbalza verso l'esterno, quindi la stella esplode. Durante l'esplosione, i neutroni catturati dai nuclei atomici decadono in protoni, sintetizzando così tutti gli elementi chimici più pesanti del ferro. Questo processo viene chiamato nucleosintesi esplosiva.

In questa fase può venire eiettata nello spazio una notevole frazione della struttura stellare, con una quantità di materia pari a decine di Soli, contenente i vari elementi sintetizzati nel corso della sua evoluzione, con la probabile distruzione della stella medesima -- il centro della quale può divenire una stella di neutroni o un buco nero -- e l'arricchimento di elementi pesanti nella materia interstellare.

Questo fenomeno catastrofico alla conclusione della vita delle stelle è stato già osservato nell'antichità e gli si è attribuito il nome di "supernova" (oggi diremmo "supernova a collasso gravitazionale"), un oggetto stellare che aumenta parossisticamente la sua emissione di energia, raggiungendo una luminosità di picco pari a quella di una galassia di 10 miliardi di Soli! Che si sia di fronte a un evento distruttivo è rivelato, oltre che dalla enorme quantità di energia emessa nel giro di qualche settimana, dalle velocità di espansione del materiale eiettato nello spazio, che si aggirano attorno ai 10.000 km/s, e dalla sua composizione chimica, completamente diversa da quella della stella preesistente.

12 - Per una descrizione generale del processo si veda Kippenhahn, *op. cit.*, cap. 36; mentre una discussione dei dettagli si trova in Heger et al., *How Massive Single Stars End Their Life*, The Astrophysical Journal, 2003, vol. 591, issue 1, p. 288; Janka et al., *Theory of core-collapse supernovae*, Physics Reports, 2007, vol. 442, issue 1-6, p. 38; e S.J. Smartt, *Progenitors of Core-Collapse Supernovae*, «Annual Review of Astronomy and Astrophysics», (2009-47), p. 63.

In questi ultimi secoli, nella nostra galassia, sono apparse solo due supernovae: quella del 1572 vista da Tycho Brahe e quella del 1604 osservata da Giovanni Keplero. Ambedue queste supernovae "storiche" sono oggi segnalate dalla presenza dei cosiddetti "resti" di supernova: filamenti di materia eiettata nello spazio, sorgenti di intensa emissione radio non termica. Un notissimo ed evidente resto di supernova, la cosiddetta "Nebulosa del Granchio", è in genere associato a una supernova scoppiata nel 1054 e registrata su annali cinesi. Innumerevoli sono al giorno d'oggi le supernovae osservate dagli astronomi nella miriade di galassie che costellano l'Universo.

L'evoluzione stellare risulta essere quindi una fondamentale chiave interpretativa dell'Universo quale oggi lo sperimentiamo. La sua composizione chimica attuale si presenta come il risultato di una serie di riciclaggi della materia elaborata all'interno delle strutture stellari ed espulsa dalle medesime secondo meccanismi di cui l'esplosione delle supernovae è l'esempio più classico. Le prime stelle formatesi nelle galassie avevano una composizione chimica iniziale analoga a quella primordiale dell'Universo. Quelle più massicce si sono evolute rapidamente e, esplodendo al termine della loro evoluzione, hanno disperso gli elementi più pesanti nel mezzo interstellare, da cui si sono formate nuove stelle con una composizione chimica più evoluta. A loro volta, le più massicce tra queste nuove stelle hanno sintetizzato al loro interno elementi via via più pesanti, per poi disperderli al termine della loro vita nel mezzo interstellare, arricchendone sempre più la composizione chimica. E così via, con un ciclo quasi continuo di nascita e distruzione completa di stelle. Ecco come hanno avuto origine gli elementi chimici, in particolare quelli cosiddetti biogenetici (carbonio, azoto, ossigeno, fosforo, potassio, oltre all'idrogeno, già formatosi alla fine del Big Bang) e il ferro. Ciò appare come il quadro fisico più adatto per spiegare l'attuale composizione chimica della materia che costituisce la nostra e le altre innumerevoli galassie che popolano l'Universo.

Ma la storia non finisce qui: gli atomi degli elementi formatisi all'interno delle stelle ed espulsi nel mezzo interstellare possono interagire tra loro, dando luogo a reazioni chimiche che producono associazioni di atomi, le molecole, via via più complesse, fino a quelle organiche, che costituiscono i mattoni fondamentali del fenomeno vita. Sembra infatti che gran parte della chimica dell'Universo sia organica e ci sono parecchi ambienti extraterrestri, anche nel Sistema Solare, in cui è possibile la formazione di composti organici complessi, probabili precursori di molecole importanti dal punto di vista biologico (bio-molecole). Le recenti osservazioni radioastronomiche e ai raggi infrarossi hanno mostrato la presenza nello spazio interstellare e negli inviluppi circumstellari di un gran numero di molecole organi-

che¹³, almeno 150, contenenti idrogeno, carbonio, azoto e ossigeno: aldeidi, zuccheri, chetoni, e l'acetammide, la più grande molecola interstellare con un legame peptidico¹⁴. In alcune nubi molecolari, sede della formazione di nuove stelle, è stata rivelata presenza di glicina, il più semplice tra gli amminoacidi, che sono i mattoni per la costruzione delle proteine. Inoltre, l'analisi chimica di alcuni meteoriti ha rivelato la presenza di diverse classi di composti organici, amminoacidi compresi. Osservazioni di comete, quali la Halley e la Shoemaker-Levy, in prossimità del perielio¹⁵ dell'orbita, hanno mostrato la presenza nella loro chioma di notevoli quantità di materiale organico, tra cui cianoidrogeno, formaldeide e glicina. È stata inoltre registrata la presenza di almeno 200 amminoacidi, 20 dei quali sono alla base dell'apparizione della vita. All'inizio del 2017, infine, è stata annunciata la rivelazione della presenza di molecole organiche sulla superficie dell'asteroide Cere¹⁶ (pianeta nano scoperto il 1° gennaio del 1800 dall'abate Piazzi, astronomo presso l'Osservatorio di Palermo, in Sicilia).

La connessione tra materia organica extraterrestre e vita terrestre non è tuttora provata, ma le proprietà chimiche dettagliate degli amminoacidi trovati nei meteoriti e di quelli presenti negli organismi viventi rivelano una somiglianza sorprendente, per cui si fa sempre più strada l'idea che la produzione dei mattoni organici fondamentali per la vita sia una caratteristica ampiamente diffusa e probabilmente comune nell'Universo¹⁷. Addirittura, è stata avanzata l'ipotesi che comete e/o meteoriti, che hanno subito un impatto con il nostro pianeta in un passato ormai remoto, siano stati i "portatori" nell'ambiente terrestre delle prime molecole organiche, amminoacidi compresi¹⁸.

Potremmo riassumere la storia raccontata fin qui con un noto e orecchiabile motivetto musicale di circa trent'anni fa, "noi siamo figli delle stelle...". Sembra proprio che questa definizione ci riguardi direttamente!

13 - Tra i tanti lavori pubblicati in questo senso, si veda Ligterink et al., "The ALMA-PILS survey: detection of CH₃NCO towards the low-mass protostar IRAS 16293-2422 and laboratory constraints on its formation", «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 2017, vol. 469, p. 2219; Martín-Doménech et al., "Detection of methyl isocyanate (CH₃NCO) in a solar-type protostar", «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 2017, vol. 469, p. 2230; e Fontani et al., "Seeds of Life in Space (SOLIS). I. Carbon-chain growth in the Solar-type protocluster OMC2-FIR4", «Astronomy & Astrophysics», 2017, vol. 605, p. A57.

14 - Legame chimico che, legando gli amminoacidi, è alla base della formazione delle proteine.

15 - Punto dell'orbita più vicino al Sole.

16 - De Sanctis et al., "Localized aliphatic organic material on the surface of Ceres", «Science», 2017, vol. 355, p. 719.

17 - Si veda, per esempio, Iain Gilmor e Mark A. Sephton, "An Introduction to Astrobiology", The Open University - Cambridge University, 2004.

18 - *Ibid.* cap. 1.

L'articolato fenomeno evolutivo appena descritto evidenzia quindi un comportamento "collettivo" da parte degli oggetti stellari, in particolare quelli più massicci, i quali complessivamente hanno contribuito – e continuano a contribuire – a determinare la composizione chimica globale della materia dell'Universo attuale. Viene pertanto in rilievo un quadro unitario e relazionale, in cui ogni componente dipende costitutivamente e criticamente dal ruolo svolto dagli altri componenti: ogni parte costituisce il tutto, ma è anche costituita dal tutto. Questa è certamente la più profonda e la più essenziale condizione di esistenza dell'Universo, che viene chiaramente in rilievo sia alle scale spaziali più piccole (atomi, particelle nucleari, quark) che a quelle più grandi (galassie). La natura non è certo fatta di monadi, come sembrano mostrare i dati dell'indagine scientifica attuale.

La "storia cosmica" appena narrata offre anche un altro interessante spunto per una riflessione razionale, pienamente e profondamente umana, che voglia avventurarsi un poco oltre la semplice indagine e interpretazione del dato scientifico, cercando di cogliere le varie sfaccettature di un messaggio più ampio.

È evidente, infatti, che i nuovi elementi chimici, prodotti dalla nucleosintesi all'interno delle stelle, possono andare ad "arricchire" il mezzo interstellare, anello critico della complessa catena che ha portato alla composizione chimica attuale della materia dell'Universo, solo in occasione di eventi eccezionali, quali quelle frantumazioni esplosive delle strutture stellari che ci sono note come eventi di supernova. Durante tali eventi, i nuovi elementi sintetizzati vengono eiettati nello spazio mentre la stella si disintegra e, potremmo dire, muore. Questo è un passaggio fondamentale nel fenomeno evolutivo che abbiamo qui illustrato.

D'altra parte, ogni disintegrazione delle strutture stellari, pur presentandosi come un passo indietro nel grado di organizzazione della materia che le costituisce, rende possibile lo sviluppo e l'evoluzione delle caratteristiche, in particolare della composizione chimica, del gas interstellare circostante, da cui potranno formarsi altre stelle con nuovi o più abbondanti elementi chimici. Ne deduciamo che questi processi, singolarmente e nella loro globalità, inducono ogni volta l'Universo a fare, nel suo lungo percorso evolutivo, un passo in avanti verso una maggiore complessità e organizzazione. Possiamo ritenere che la formazione di molecole costituite da un notevole numero di atomi, quali quelle che hanno permesso la comparsa degli esseri viventi è, allo stato attuale, la più alta manifestazione del grado di complessità e organizzazione raggiunto dalla materia non vivente dell'Universo.

Si ha l'impressione che in natura, accanto al secondo principio della termodinamica che spinge i sistemi verso una minore complessità e organizzazione, viga una legge opposta, a partire dalle particelle elementari che si sono formate ai primordi dell'Universo. Secondo il modello proposto da Hideki Yukawa e formalizzato da Richard Feynman, l'interazione tra particelle materiali (fermioni) può essere com-

presa come scambio di particelle portatrici di forza (bosoni): grazie allo scambio di fotoni, un protone e un elettrone si legano, formando un sistema più complesso e organizzato, l'atomo di idrogeno. Già in questo semplice caso, le caratteristiche del sistema non sono totalmente prevedibili a partire da quelle dei componenti: si parla per questo di "proprietà emergenti".

Sulla base di queste considerazioni, può aver senso ritenere che l'evoluzione dell'Universo si sviluppi secondo quello che Piero Pasolini¹⁹, ispirandosi a Norbert Wiener, chiamava "principio cibernetico" che lo porta ad assumere un grado sempre più elevato di complessità e organizzazione, pur facendo criticamente leva su fasi intermedie in cui il livello di complessità e organizzazione sembra regredire?

In questa linea, Luigi Fantappié²⁰ ha proposto che l'equazione delle onde abbia soluzioni progressive e regressive che rappresentano processi entropici e "sintropici": le soluzioni che procedono in avanti nel tempo darebbero origine ai comuni fenomeni fisici in cui l'entropia aumenta, le soluzioni che procedono indietro nel tempo darebbero origine all'organizzazione. In maniera analoga, Erwin Schrödinger introdusse il concetto di "neghentropia"²¹.

Comunque, l'analisi di questa domanda è al di là degli scopi di questo testo. Ci limitiamo a osservare che, mentre la tendenza al disordine è statistica, apparente solo in sistemi costituiti da un grande numero di atomi, quella all'organizzazione è già presente nelle interazioni fra particelle elementari, sembrando così – in un certo senso – più fondamentale.

Inoltre, se la leggiamo attentamente, la nostra storia cosmica suscita un'altra domanda: possiamo azzardare che lo sviluppo dell'Universo sia fondato su una catena di processi che si presentano come eventi di "distruzione e riorganizzazione" o "non-essere essere" che lo conducono alla formazione di sistemi sempre più complessi?

Questa logica sembra valere già a livello di particelle elementari. Consideriamo due particelle A e B. A emette una particella C e diventa A' (non essere). Nel momento in cui "non è" (si trasforma da A ad A') "è" il soggetto che esercita la forza

19 - Piero Pasolini usa l'espressione "principio cibernetico" in *Cibernetica e trascendenza*, «Nuova Umanità», (1979/2) 2, pp. 51-66, ispirandosi al libro di Norbert Wiener *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine*, The MIT Press, Cambridge (MA), 1948.

20 - L. Fantappié, *Che cos'è la sintropia: principi di una teoria unitaria del mondo fisico e biologico e conferenze scelte*, Di Renzo Editore, Roma 2011.

21 - L'entropia negativa fu introdotta da Erwin Schrödinger nel libro *What is life - the physical aspect of the living cell*, Cambridge University Press, Cambridge 1944. Léon Brillouin abbrevia entropia negativa in neghentropia nell'articolo *Negentropy Principle of Information*, «Journal of Applied Physics», (1953/9), pp. 1152-1163.

(essere). Il fermione B riceve il bosone C e diventa B' (non essere). Nel momento in cui "non è" (si trasforma da B ad B') "è" il soggetto che subisce la forza (essere).

L'approfondimento di questi aspetti implica certamente una riflessione transdisciplinare in cui il dato dell'indagine scientifica venga "letto e interpretato" anche in una prospettiva filosofica e, perché no, teologica. Sicuramente, già a livello di evoluzione stellare, la natura è maestra di "economia circolare", in cui nulla è rifiutato: lezione di grande attualità per noi, figli delle stelle, a cui è affidato il pallido puntino azzurro²² che ci traghetti nell'Universo.

DANIELE SPADARO

Astronomo Associato presso l'Istituto Nazionale di Astrofisica - Osservatorio Astrofisico di Catania
daniele.spadaro@inaf.it

GABRIEL FERRERO

PhD Facoltà di Scienze Astronomiche e Geofisiche Università Nazionale La Plata, Argentina
ferrero.gabriel@gmail.com

LUCA FIORANI

Ricercatore Diagnostic and Metrology Laboratory ENEA, Frascati
luca.fiorani@enea.it

22 - Carl Sagan, ispirandosi a una foto scattata nel 1990 dalla sonda Voyager 1, quando si trovava a sei miliardi di chilometri dal nostro pianeta, ha chiamato la Terra "pale blue dot", come spiega nel libro *Pale blue dot: a vision of the human future in space*, Random House, New York 1994.