

Giovanni F. Bignami

I marziani siamo noi

Un filo rosso dal Big Bang alla vita

Chiavi di lettura a cura di
Federico Tibone e Lisa Vozza

indice

<i>Prefazione</i>	5
<i>Overture: Il derby uomo-universo</i>	8
1. Facciamo l'universo: luce e materia	21
2. Facciamo il resto dell'universo	41
3. Astronomia in cerca di pianeti alieni	65
4. Astronomia di contatto: l'universo ci invade	85
5. Astronomia di contatto: noi, gli invasori	103
6. Astronomia di contatto: polvere di comete	125
7. Dai mattoni alla casa: che cos'è mai la vita?	137
8. C'è qualcuno là fuori?	157
<i>Coda: Che cosa resta da scoprire?</i>	177
<i>Ringraziamenti</i>	187
15 miti da sfatare	188
Forse non sapevi che...	194
<i>Per saperne di più</i>	200
<i>Indice analitico</i>	202

A Dindi,
per le radici della nostra cultura

Questo libro è scritto per tutti coloro che amano rendersi conto delle cose che hanno intorno, e che desiderano acquisire senza fatica un quadro elementare ed esatto dello stato dell'universo.

Camille Flammarion, *L'astronomia popolare*, 1880

La letteratura italiana sta attraversando un momento di trombonaggine generale. Il mio solo terrore è di essere in qualche modo confuso con i tromboni che imperversano.

Italo Calvino, lettera a Giambattista Vicari, 13/5/1964

Prefazione

Nomen omen? Forse, anche se garantisco che non c'è nessuna parentela... Comunque, soltanto alla fine mi sono accorto che questo che è venuto fuori è una specie di *bignami* dell'universo (e zone limitrofe). Be', se gli agili volumetti della casa editrice di Ernesto Bignami riescono a catturare in poche pagine lo spirito della *Divina Commedia*, per esempio, allora anche noi possiamo tranquillamente fare un «bigino» del cosmo, cercando di seguire il filo rosso che unisce il Big Bang alla vita e all'uomo.

Si richiede un bignami interdisciplinare, però. Perché innanzitutto dobbiamo costruirlo, l'universo, con i suoi mattoni di materia ed energia, con le stelle, le galassie, i pianeti e tutto il resto: dovremo così parlare di fisica, di astronomia, di chimica, di biologia.

Dovremo fare anche i mattoni della vita e cercare di capire come sia nata, da noi o altrove. Qui interviene una scienza molto recente, che chiameremo *astro-nomia di contatto*; ma serve anche l'astronomia più convenzionale, da terra o dallo spazio, per cercare altri mondi «giusti» intorno alle stelle «giuste», dove la vita potrebbe esserci. Poi parleremo di chimica di sistema, di biologia sintetica e (pochissimo) di genetica.

Ci chiederemo anche se per caso ci sia già qualcuno là fuori. Vedremo come da tempo si sia provato a

immaginare forme di vita aliene, e da poco anche a cercarle, ascoltando. Faremo così un po' di storia della scienza (e della fantascienza) ma parleremo anche di una disciplina ancora senza nome, tutta da inventare: la comunicazione con qualcuno che non conosciamo e a cui non sappiamo che dire...

Alla fine ci lanceremo in un po' di futurologia, ipotizzando che cosa resti da scoprire nel percorso che ci lega al Big Bang.

Al centro di tutto, però, rimane il problema della vita. Fuori dalla Terra non l'abbiamo ancora trovata; finora l'abbiamo soltanto immaginata. E anche riguardo alla vita sulla Terra rimangono lacune, pezzi di filo rosso che ancora mancano, sebbene stiano diventando sempre più corti.

Lavorando a questo bigino ho scoperto che ci sono quattro modi per cercare di capire qualcosa sulla presenza – e perciò sull'origine – della vita nell'universo:

- 1) trovare un'altra Terra lontana, in mezzo ai nuovi pianeti extrasolari, irraggiungibile fisicamente ma su cui si possa «vedere» qualche segno inequivocabile di vita;
- 2) studiare i pezzi di universo che ci cadono in casa, i meteoriti, con tutti i loro messaggi di chimica organica;
- 3) andare in giro a esplorare, a «grattare» i corpi del Sistema solare, per vedere che cosa ci si trova;
- 4) cercare di capire sulla Terra, cioè nell'unico posto dove la vita esiste di sicuro, come essa sia incominciata.

Le quattro linee di ricerca sono molto diverse tra loro per obiettivi e metodologia di indagine, e tutte richiedono un bel po' di ginnastica e disponibilità

mentali. Nessuno, credo, può sperare di padroneggiare davvero tutti questi argomenti e gli altri di cui parleremo, e questo autore non fa certo eccezione. Se ho provato a spingermi al di là delle mie competenze strettamente professionali, è perché credo che almeno un tentativo di impostare il problema generale vada fatto.

Insomma, con questo bigino vorrei contribuire a una visione globale dell'universo, come se fosse un bosco osservato nel suo insieme. Come fisico e astronomo tendo a studiare singoli alberi (talvolta anzi ramoscelli, magari lontanissimi...); ma sono anche profondamente convinto che la scienza, con i suoi requisiti di obiettività e razionalità, sia lo strumento più adatto per vedere e capire il bosco, per quanto grande sia.

Lo stimolo principale per questo lavoro è stato il contatto con il pubblico. Negli ultimi due anni – il periodo di incubazione delle pagine che seguono – ho tenuto più di cento conferenze, seminari, lezioni in Italia e in Europa a un uditorio vasto e vario: studenti e insegnanti delle scuole medie e superiori, biblioteche di paese e sezioni del Rotary Club, imprese private, comunicatori e così via.

Anche tra gli spettatori de *I segreti dello spazio con Bignami*, la trasmissione del National Geographic Channel, moltissimi mi hanno scritto. Ho risposto quasi a tutti; gli altri, con le mie scuse, troveranno di sicuro le risposte in queste pagine.

Dopo questi due anni di *full immersion* a parlare di scienza in pubblico, mi sento di chiedermi e di chiedere al lettore: possono essere vere le statistiche

che vedo citare da Richard Dawkins? Secondo il famoso biologo evoluzionista il 44% degli statunitensi è convinto non soltanto che Dio abbia creato l'uomo, ma che l'abbia creato simile agli esseri umani attuali, e che ciò sia avvenuto circa diecimila anni fa.

Il 44%, quasi la metà della popolazione? È difficile crederlo. Così come è difficile credere che per un italiano su quattro (il 24%, a quanto pare la percentuale più alta in Europa) la Terra impiega un mese per girare intorno al Sole. Mi sembrano dati impossibili da accettare, o forse a me è toccata la fortuna di un pubblico appassionato e colto, seppure con qualche inevitabile ingenuità.

Comunque, se Dawkins avesse ragione a essere così pessimista sul livello generale della cultura scientifica, be', allora un bigino interdisciplinare sull'universo mi sembra proprio che possa tornare utile.

Il derby uomo-universo

Anche se è sempre più raro, capita ogni tanto di trovarsi all'aperto in una notte veramente buia. Su una spiaggia senza luci, oppure in mezzo al mare o a un deserto, o anche in cima a una montagna. Insomma in un posto dove, se non ci sono nuvole, si può vedere a occhio nudo che il cielo è, letteralmente, pieno di stelle. E con un binocolo, anche piccolo – miracolo! – le stelle sono ancora di più, molte di più....

Magari distesi per terra, proviamo a guardare in su per qualche minuto, con calma, in silenzio. Ci rendiamo conto che le stelle esistono, che non sono una fantasia degli astronomi o dei poeti, che non possiamo far finta che non ci siano, anche se sono lontane e irraggiungibili.

Oggi sappiamo che quelle stelline sono più o meno come il nostro Sole, più piccole soltanto perché più lontane. E allora non possiamo fare a meno di usare la fantasia, che è molto meglio di una astronave, e cercare di immaginare se intorno a quelle stelline ci siano pianeti, e come possano essere. Poi, inevitabile, la domanda: c'è vita su quei pianeti?

Alla fine, in realtà, quello che ci chiediamo è: «Che cosa mi farebbe più paura? Sapere che siamo soli in tutto l'universo o sapere che c'è qualcuno, lassù?»

È una domanda che ho posto a centinaia, forse a migliaia di persone, di estrazioni e nazionalità diversissime: in conferenze e dibattiti, anche improvvisando tra il pubblico sondaggi e votazioni per alzata di mano; oppure agli studenti dei miei corsi, ma anche ad amici e conoscenti o, a bruciapelo, a persone che incontro per la prima volta.

La prima buona notizia è che quasi tutti rispondono. Tutti capiscono cioè che *tertium non datur* (o siamo soli, o c'è qualcun altro) e pochissimi restano indifferenti o rifiutano di esprimere una opinione.

La seconda buona notizia è che esiste una maggioranza ben definita nelle risposte: la preferenza, netta, è a favore della presenza di qualcun altro, là fuori. E questo dopo aver specificato che la preferenza va espressa senza sapere *chi* sarebbe il «qualcun altro», o *come* potrebbe essere fatto: vile batterio, ragno schifoso, mostro intelligente e cattivo che semina distruzione oppure fata buona e onnisciente, in grado di regalarci benessere e felicità. Un catalogo da film di fantascienza o horror, insomma: ma tutto sembra comunque preferibile all'angoscia della solitudine; non vogliamo essere l'unico pianeta abitato del nostro universo.

La cattiva notizia, naturalmente, è che una vera risposta alla domanda non siamo ancora in grado di darla: non abbiamo ancora trovato nessuno là fuori. Ma non siamo neanche in grado di dimostrare che non ci sia nessuno.

Pazienza: stiamo ancora cercando, con i migliori strumenti dell'astronomia moderna (e delle scienze

limitrofe). Però negli ultimi anni si sono fatti progressi osservativi e teorici molto importanti, e la sensazione è che siamo vicini al risultato.

È chiaro che cosa si intenda per «risultato», in questo caso: prima di tutto, e soprattutto, la scoperta di qualche forma di vita al di fuori della Terra. Molti pensano che una scoperta del genere sarebbe la più straordinaria della storia dell'umanità. Proprio per questo dovrà per forza essere una scoperta convincente, molto convincente: come disse Carl Sagan, *extraordinary claims require extraordinary proofs*.

Questo libro dunque esiste, innanzitutto, come omaggio alla maggioranza di persone che credono di non essere sole nell'universo. Una seconda ragione, quasi altrettanto cogente, è che negli ultimissimi anni le scienze dell'universo e della vita hanno ottenuto una serie di risultati concreti che merita raccontare, perché hanno molto cambiato il nostro modo di guardare al problema.

La terza ragione, non meno importante delle altre nel mondo di oggi e di domani, è che dobbiamo ricordare sempre quale sia il vero posto dell'umanità nell'universo, nel momento in cui guardiamo verso l'esterno. È importante farlo perché la cultura odierna è spesso affetta da rigurgiti di irrazionalità antropocentrica, basati sull'ignoranza della scienza, anzi della storia della scienza negli ultimi quattro (o quaranta?) secoli.

E proprio per introdurre in modo lieve la discussione che seguirà sull'origine dell'universo, della vita

sulla Terra e forse fuori dalla Terra – cioè sull'origine dell'uomo nel cosmo – trascrivo qui sotto, così come mi è giunta in un file zippato anonimo, la cronaca del match di ritorno della «Anthropa Cup», sfida calcistica articolata in due gare tra le squadre della Dinamo Universal F.C. e del Man-Centered United.*

L'anonimo ricorda che l'incontro di andata, giocato molti secoli fa nello stadio «Mediterraneo», si era concluso con un sonoro 2-0 a favore del Man-Centered, con gol di Aristotele e Tolomeo (i pensatori che mettevano l'Uomo e la Terra al centro del Sistema solare e quindi dell'universo; insomma i padri dell'antropocentrismo, che assegna una posizione speciale nell'universo all'uomo e al suo pianeta).

La gara di ritorno si gioca, naturalmente, nello stadio «Universal». Ed ecco la radiocronaca.

Pubblico foltissimo: a favore della Dinamo Universal sono presenti, ma silenziose, cento miliardi di stelle e cento miliardi di galassie, che forniscono anche l'illuminazione per la gara in notturna.

Per il Man-Centered c'è la rumorosa curva sud, popolata da milioni di milioni di neuroni (per quanto possa sembrare incredibile, ogni tifoso ne ha cento miliardi) e da un gruppetto di ultrà vestiti nel rosso cardinalizio della maglia del Man-Centered.

Fischio d'inizio nei primi anni del Cinquecento. La tattica sul terreno del Man-Centered è subito evidente: Aristotele e Platone, al centro, forti del vantaggio

* *Man-Centered* non è un errore di stampa per Manchester; in inglese significa «centrato intorno all'umanità».

iniziale fanno melina, tengono palla e fanno girare il Sole e tutti i pianeti intorno alla Terra. Ma ecco che improvvisamente entra in azione il terzino polacco della Dinamo Uni, un certo Kopernik, finora sconosciuto immigrato semi-clandestino in Italia, ma fresco di laurea a Ferrara. Kopernik prende palla e fa partire un lungo lancio in profondità a tagliare la difesa avversaria, con un libro rivoluzionario (non per nulla si intitola *De Revolutionibus Orbium Caelestium...*) che nel 1543 per la prima volta mette il Sole al centro e gli fa girare intorno la Terra.

Il suggerimento di Kopernik è raccolto da un'ala tornante (nel senso che poi si pente), il mitico Galileo Galilei, che gioca con un piccolo telescopio cucito sulla maglia blu notte della Dinamo Uni. Galileo ha preso il ruolo di Giordano Bruno, espulso in modo definitivo con bruciante ingiustizia dall'arbitro (il quale fa fatica a correre, deve tenere sollevato il pesante saio che gli copre i calzoncini...).

Galileo stringe al centro, impugna il cannocchiale e concretizza il brillante lancio di Kopernik osservando satelliti intorno a Giove e il susseguirsi di fasi di Venere. Dunque la Terra non è al centro del Sistema solare, sono i pianeti che girano intorno al Sole. Non è più una mera teoria matematica astratta, che la Chiesa si degna neppure di mettere all'indice (lo farà soltanto nel 1616, dopo l'affondo di Galileo): adesso è una osservazione astronomica sicura, inconfutabile.

Nonostante la curva sud agiti minacciosa lo striscione «Bellarmino pensaci tu», Galileo segna così il primo, bellissimo gol della riscossa della Dinamo Uni.

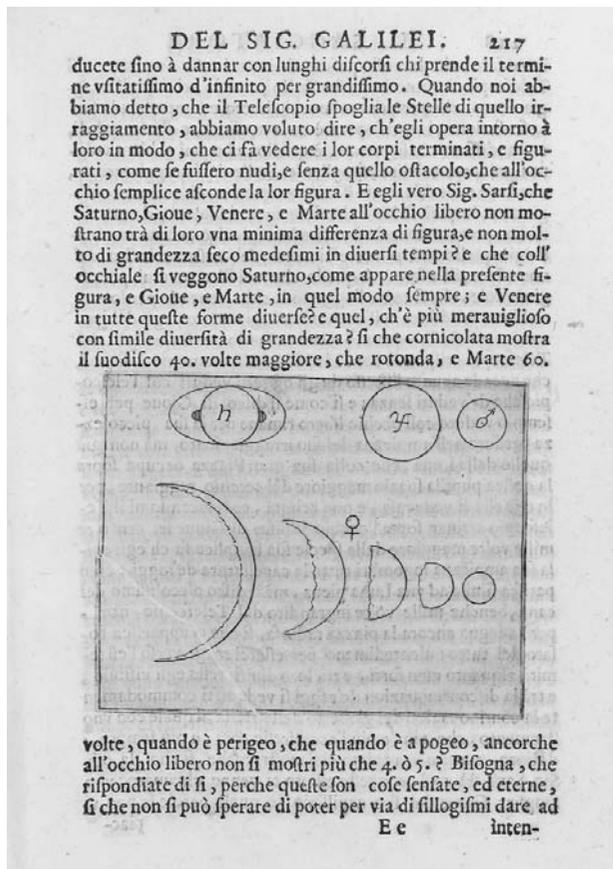


Figura 1 In questa pagina da *Il saggiatore* del 1623 si vedono in basso le fasi di Venere disegnate da Galileo. Questa osservazione dimostra che Venere orbita intorno al Sole; il pianeta appare «pieno» quando si trova dal lato opposto del Sole rispetto alla Terra. Immagine per gentile concessione dell'Archivio Fotografico - Museo Galileo, Firenze.

Nella mischia sotto porta, però, proprio Galileo incorre in una pesante ammonizione dello stesso arbitro, viene costretto a rimangiarsi il pallone del gol e anche a dire che era buono.

Palla al centro e il gioco riprende, ma Galileo non sarà più lo stesso. Nel «Processo del lunedì», celebrato forse un po' in ritardo nel 1984, il Papa alla moviola ammetterà che Galileo non era da ammonizione, anzi non aveva proprio commesso fallo.

Nel finale del tempo – siamo nel 1859 – entra in campo per la Dinamo Uni un possente centravanti inglese, tale Charles Darwin, che nonostante l'età avanzata si porta con autorevolezza nella metà campo del Man-Centered. Con azione solitaria entra in area travestito da scimmia, poi getta la maschera e, brandendo il verme da cui tutti discendiamo, insacca!

Non solo l'uomo non è più al centro fisico dell'universo, ma adesso sappiamo di essere soltanto un caso particolare di scimmia. L'arbitro vorrebbe annullare il gol, ma non trova nel regolamento un esplicito divieto a segnare con un verme in mano.

Due a zero per la Dinamo, fine del primo tempo. La squadra del Man-C rientra negli spogliatoi a testa bassa, rincorsa da massaggiatori in rosso cardinale che offrono turiboli di incenso da sniffare per tirarsi su.

Il secondo tempo, decisivo, si apre intorno alla metà del Novecento. La nuova fisica nucleare e teorica è un vivaio di talenti e fornisce alla Dinamo Uni un altro giocatore inglese di classe, Sir Fred Hoyle, per la verità occhialuto e un po' sovrappeso. Con la

sua «teoria della nucleosintesi», lavorando a centro-campo, prepara il terreno per un'altra azione offensiva. Hoyle non ama il Big Bang ma sa come funzionano le stelle e ha capito perché stanno accese. Entra nell'area avversaria con la tavola di Mendeleev dipinta sulla maglia blu notte (l'arbitro non sa che cosa sia, perciò lascia correre...) e, indicandola, fa capire di aver scoperto che gli elementi chimici sono tutti costruiti dalle stelle. Dagli spalti le stelle gridano agli uomini: «Polvere, siete solo nostra polvere!». Hoyle, trascinato dall'incitamento, segna!

Un gol importante per la Dinamo Uni: la materia che forma l'uomo (e la Terra, e tutto) viene dall'universo, non ha proprio niente di speciale. Le stelle fanno la *ola*, organizzandosi in improvvisate spirali. Tre a zero: si mette male per gli uomocentristi.

Ultime convulse fasi di gara, dal 1990 ad oggi. Ora è il vivaio dell'astrofisica a fornire talenti, così tanti che non si possono citare. La Dinamo Universal attacca in contemporanea su due fronti: la composizione della materia dell'universo e la presenza di pianeti intorno ad altre stelle.

I nuovi entrati dal vivaio astronomia scoprono ben presto che la materia di cui siamo fatti noi (e tutto quello che vediamo) è soltanto un pizzico di sale nella minestra della materia universale. La maggior parte dell'universo, per la precisione il 96%, è fatta di materia o energia che chiamiamo «oscure» tanto per dar loro un nome, ma che non hanno niente a che fare con la materia ordinaria. Insomma, noi apparteniamo a un trascurabile 4% dell'universo.

Ecco un altro bel gol contro i Man-Centered: neanche la nostra materia è centrale nell'universo. 4-0.

L'altro attacco viene da un'azione condotta in tandem dai due attuali centravanti della Dinamo: Astrologo Da Terra e Astronomo Spaziale.

Un sacco di gente ha sempre creduto che esistessero pianeti intorno ad altre stelle: da Giordano Bruno, quello della bruciante espulsione, a Giacomo Leopardi e molti altri. Ma nessuno li aveva mai visti. Nel 1995 invece è stato osservato il primo pianeta extrasolare; oggi siamo vicini a 500 e tra pochi anni ne conosceremo migliaia.

I pianeti insomma sono la norma, non l'eccezione intorno alle stelle. Il nostro Sistema solare non è che uno come tantissimi, non ha niente di speciale: quinto gol per la squadra dei blunottati della Dinamo Universal, e fischio finale dell'arbitro.

Un sonoro 5-0, insomma, che annulla e surclassa il 2-0 della gara di andata e decide così la coppa Anthropa, che viene consegnata in pompa magna alla squadra della Dinamo.

L'allenatore Universinho subito provvede a far entrare in campo un gigantesco schiacciasassi, che, in modo teatrale, schiaccia la coppa stessa e la distrugge. Addio antropocentrismo.

Urla di gioia di stelle, pianeti, galassie (e sembra anche di sentire aleggiare, gigantesca, un'altra presenza oscura, sconosciuta, indefinibile..). Qualche irriverente coro di «Giordano Bruno santo subito» viene tiepidamente zittito.

L'arbitro, colpevole della bruciante espulsione di Bruno e della pesante ammonizione a Galileo, per non parlare del goffo tentativo di annullare il gol di Darwin, corre verso gli spogliatoi e si infila nel tunnel sotterraneo che passa direttamente sotto il Tevere.

Fin qui la cronaca (e ringraziamo l'anonimo zippatore che ce l'ha inviata).

Il resto è storia, come si dice. Una storia che cercheremo di raccontare, in modo meno convulso, nei prossimi capitoli: l'origine dell'universo, delle stelle e galassie, degli elementi di cui siamo fatti noi e tutto il resto; ma anche la comparsa dei pianeti e delle molecole che girano negli spazi, da sole o a bordo di sassi e palle di neve interplanetarie e interstellari.

Poi parleremo della nuova astronomia del terzo millennio, quella «astronomia di contatto» che ha un cuore antico – la raccolta di meteoriti – ma oggi ci porta direttamente ad assaggiare *in situ* pianeti, comete ed asteroidi. Lì troviamo molecole importanti, i «mattoni della vita», spettacolarmente simili a quelli di cui siamo fatti noi. Allora sorge proprio il sospetto che, come gli atomi e le molecole, anche noi veniamo direttamente da fuori. Insomma, forse i veri marziani siamo noi?

Naturalmente la distanza tra i «mattoni» e «la vita» è enorme, e ancora non risolta. Non basta una camionata di mattoni per avere una casa. La vita è un passo cruciale, ancora ignoto, che lascia spazio alle opinioni e alle fedi di ognuno, un po' come la genesi del Big Bang (ciò che è accaduto dopo, invece, adesso lo sappiamo piuttosto bene).

Non abbiamo nessuna prova scientifica che la vita venga da fuori. Tuttavia parleremo anche di «pan-spermia», ossia della possibilità che forme elementari di vita sopravvivano nello spazio viaggiando tra pianeti (qualcuno dice addirittura tra stelle) a bordo di meteoriti della classe Enterprise. E no, non parleremo della celebre Enterprise di *Star Trek*, e neanche dell'astronave con a bordo il simpaticissimo E.T.: lasciamo lavorare la fantasia, ma allo stesso tempo cerchiamo di stare ai fatti.

Proprio in questo spirito: se davvero c'è qualcuno là fuori, chissà che non stia cercando di mettersi in contatto con noi? Racconteremo mezzo secolo del progetto SETI, la ricerca di una intelligenza extraterrestre. Non l'abbiamo ancora trovata; ma, come spiegheremo, noi stessi stiamo inviando confusi segnali nello spazio, una sorta di messaggio in bottiglia contenuto in quella che chiameremo «bolla Berlusconi», giunta oramai a inglobare migliaia di stelle.

Facciamo l'universo: luce e materia

Non sappiamo che cosa ci fosse prima del Big Bang. Lo dico subito, perché è la risposta a una delle domande che mi sento fare più di frequente. O meglio, diciamo che forse non ha neppure senso chiedersi che cosa ci fosse. Oppure diciamo che non ci interessa, ma soltanto perché non sappiamo che cosa rispondere... Insomma, lasciamo perdere.

Chi crede, ci vede in modo naturale l'opera di un Creatore, che a questo stadio iniziale è ancora sostanzialmente trasversale rispetto alle religioni. Alcuni teologi spregiudicati chiamano questa soluzione «Dio tappabuchi», invocato un po' *ad hoc*... Forse non hanno torto. Chi non ha la fortuna di credere, magari perché pensa che un Creatore non sia un concetto scientifico, invece semplicemente non sa, e sa di non sapere.

Lo scienziato, al massimo, ribalta il problema: se chiedete a un credente che cosa ci fosse prima di Dio, risponderà giustamente: «Ma Dio è eterno, c'è sempre stato». E allora, direte voi, anche l'universo potrebbe esserci sempre stato. Infatti alcuni cosmologi hanno immaginato universi pre-Big Bang che, in qualche modo, hanno poi generato il Big Bang e creato così il nostro particolare universo. Soluzione tappabuchi anche questa? Chissà. Certo però che la

presenza di altri universi, a noi sconosciuti e inaccessibili, potrebbe servire anche in altri contesti, come vedremo più avanti.

Quello che invece conta molto, moltissimo per la nostra storia, è ciò che è successo dal Big Bang in poi, fino a oggi. Ci serve per capire che noi, esseri umani di oggi, siamo figli del Big Bang. Non in modo vago o astratto, ma in modo molto concreto: nel «Gran Botto» di circa 13,7 miliardi di anni fa* non avvenne qualcosa di esterno a noi, qualcosa che non ci riguarda. Al contrario: nel Big Bang si creò la materia della quale siamo fatti noi, oggi, e si creò anche tutto quello che possiamo vedere con occhi o strumenti in giro per l'universo. Anzi, del Big Bang portiamo dentro di noi tracce tangibili, quasi un marchio di fabbrica.

I primi istanti

Che cosa sia successo proprio all'inizio dell'universo non lo sa (ancora) nessuno. Ma subito dopo, pochissimo tempo dopo, sì, oggi sappiamo almeno descrivere che cosa succedeva. Abbiamo anzi rispolverato un'idea brillantissima, vecchia di oltre un secolo, per definire quanto era grande l'universo appena nato: il suo diametro era la cosiddetta *lunghezza di Planck* che, espressa in metri, vale circa 10^{-35} m; è un'unità di lunghezza così incredibilmente piccola

* I cosmologi oggi ritengono di conoscere il tempo trascorso dal Big Bang con un'incertezza di soli 100 milioni di anni ($13,7 \pm 0,1$ miliardi di anni). Una buona fonte per chi volesse saperne di più è la voce *età dell'universo* di Wikipedia.

che ne servirebbero centomila miliardi di miliardi di miliardi per fare un millimetro.

Questa lunghezza è un'astuta combinazione delle costanti fondamentali della natura: la velocità della luce della teoria della relatività di Einstein, la costante di gravitazione universale della teoria di Newton e la costante di Planck della meccanica quantistica.

Utilizzando queste costanti, Max Planck costruì un sistema di unità di misura (di lunghezza, tempo, massa, carica elettrica e temperatura) che presentò all'Accademia di Prussia nel maggio del 1899.

Planck sapeva bene che le unità di misura che usiamo tutti i giorni (il metro, il secondo, il kilogrammo e così via) sono in qualche modo legate all'uomo o al pianeta Terra. Le unità da lui proposte invece erano totalmente indipendenti dall'uomo, legate a leggi fondamentali, e perciò universali della natura. Come disse Planck ai suoi colleghi prussiani:

[Queste costanti] mantengono il loro significato per tutti i tempi e per tutte le culture, anche extraterrestri e non umane, e possono perciò essere chiamate «unità naturali».

E così presentò l'unità naturale di lunghezza, che è appunto la lunghezza di Planck. Per percorrerla la luce impiega un tempo brevissimo, circa 10^{-43} secondi, che è il *tempo di Planck*.

Il bello del sistema di Planck è che dentro le sue unità c'è già tutta la fisica che possiamo immaginare, tutta schiacciata insieme, proprio in quel modo «unificato» che oggi non sappiamo più rifare... Descrivere ciò che è successo dal tempo «zero» al

tempo di Planck, ossia nei primi 10^{-43} secondi di vita dell'Universo, richiede infatti una teoria capace di descrivere, davvero insieme, tutte le forze dell'universo. Per sviluppare questa teoria stiamo usando di tutto, anche i grandi acceleratori di particelle come il CERN, ma non ci siamo ancora riusciti. Quindi non tentiamo di raccontare come era la fisica dei primi 10^{-43} secondi, anche se sappiamo che una fisica c'era e doveva essere bellissima.

Quella che forse è, ancor oggi, la migliore descrizione dell'universo appena nato, tutto contenuto dentro una lunghezza di Planck, la dobbiamo all'incomparabile penna di Italo Calvino nella *Cosmica* «Tutto in un punto»:

Si capisce che si stava tutti lì – fece il vecchio Qfwfq – e dove, altrimenti? Che ci potesse essere lo spazio, nessuno ancora lo sapeva. E il tempo, idem: cosa volete che ce ne facessimo, del tempo, stando lì pigiati come acciughe? Ho detto “pigiati come acciughe” tanto per usare una immagine letteraria: in realtà non c'era spazio nemmeno per pigiarci. Ogni punto d'ognuno di noi coincideva con ogni punto di ognuno degli altri in un punto unico che era quello in cui stavamo tutti. Insomma, non ci davamo nemmeno fastidio, se non sotto l'aspetto del carattere, perché quando non c'è spazio, aver sempre tra i piedi un antipatico come il signor Pbert Pberd è la cosa più seccante. Quanti eravamo? Eh, non ho mai potuto rendermene conto nemmeno approssimativamente. Per contarsi, ci si deve staccare almeno un pochino uno dall'altro, invece occupavamo tutti quello stesso punto. Al contrario di quel che può sembrare, non era una situazione che favorisse la socievolezza; so che per esempio in altre epoche tra vicini ci si frequenta; lì invece, per il fatto che vicini si era tutti, non ci si diceva neppure buongiorno o buonasera.

Materia e antimateria

Dopo un tempo di Planck, nel quale la temperatura era piuttosto alta (un bel 10^{+32} gradi), l'universo espandendosi inizia a raffreddarsi e a creare la fisica come la conosciamo oggi, cominciando dal separare la forza di gravità da tutte le altre.**

Nei primi cento miliardi di tempi di Planck, ossia fino alla veneranda età di 10^{-32} secondi, lo spazio che contiene l'universo si espande, gonfiandosi addirittura più in fretta della velocità della luce (attenzione: a espandersi è lo spazio, non la materia...). Così il cosmo raggiunge le rispettabili dimensioni di un pompelmo. Sì, c'è stato un momento in cui tutto l'universo stava dentro il volume di un pompelmo: sembra poco, ma una decina di centimetri è un bel progresso rispetto alla lunghezza di Planck.

Più tardi, molto più tardi, cioè durante il primo milionesimo di secondo dell'universo, succedono un sacco di cose, tra cui la comparsa della luce e dei mattoni fondamentali che poi formeranno la materia di oggi. Il tutto dentro un volume grande poco più del Colosseo. E qui avviene un primo evento sorprendente, quasi miracoloso, a cui dobbiamo la nostra esistenza, anche se non capiamo perché sia successo.

Nella «zuppa primordiale» densissima – Calvino avrebbe detto che ci stava in piedi il cucchiaino – la

** Il grosso problema irrisolto della fisica teorica di oggi è proprio capire come tornare indietro, cioè come si possano ri-unificare le forze gravitazionali con le altre forze della natura, per esempio quelle elettriche. Ma questa è un'altra storia.

materia veniva per forza creata in due forme diverse: quella di cui siamo fatti noi, e la sua simmetrica che chiamiamo – con un po' di razzismo – *antimateria*.

L'antimateria è quasi identica alla materia, ma ha carica elettrica opposta e una proprietà interessante: quando incontra la materia, insieme a lei si «annichila», ossia scompare e torna a essere soltanto energia, sotto forma di fotoni. Un bel guaio: se dalla zuppa primordiale fossero emerse quantità perfettamente simmetriche, uguali, di materia e antimateria, l'universo oggi sarebbe soltanto un grande lago di fotoni, in cui non potremmo neanche nuotare perché noi – vile materia – non esisteremmo proprio.

Per ragioni ancora poco chiare, però, la zuppa primordiale ha generato più materia che antimateria: un piccolo eccesso di circa una parte su un miliardo. Sembra poco, ma è proprio questa la materia che non si è «annichilata» (perché l'antimateria era già finita) e così ha potuto formare l'universo e poi noi. Alleluiah!

Ricordiamoci con reverenza di questa asimmetria, non ancora spiegata, a cui dobbiamo la vita. Anche perché c'è chi pensa che a questa fondamentale asimmetria del nostro universo ne sia legata un'altra, che incontreremo più avanti: quella nella «chiralità» delle grosse molecole organiche che formano la materia vivente, un altro spettacolare legame tra noi e le stelle.

La fusione e la nucleosintesi

Torniamo alla nascita del mondo. A questo punto è passato il primo, tormentatissimo secondo di vita del-

l'universo e, con un po' di fortuna, sono apparse la luce e la materia, cioè i famosi *protoni*, *neutroni* ed *elettroni* che si studiano a scuola. La temperatura è scesa a un banale miliardo di gradi e l'universo è tutto contenuto in una sfera con raggio di circa centomila chilometri, un quarto della distanza Terra-Luna.

Dopo il protone, che è il nucleo atomico più semplice (quello dell'atomo di *idrogeno*), inizia a formarsi il *deuterio*, un altro tipo (o *isotopo*) di idrogeno che è composto da un protone e da un neutrone, tenuti stretti insieme da quelle forze nucleari che alla fine costruiranno i nuclei di tutti gli altri elementi. Il deuterio è ancora abbondante oggi – se ne trova un nucleo ogni settemila nuclei di idrogeno – ed è sicuramente quello che si è formato dopo il Big Bang; non abbiamo trovato ancora altro modo di produrlo in quantità significative.

Poi viene il momento della *fusione termonucleare*, quella che da tempo sogniamo di rifare, in piccolo, sulla Terra per produrre energia, ma finora senza successo. Come vedremo tra poco nel nostro *fast-forward* cosmologico, non appena saremo riusciti a costruire le stelle, la fusione è proprio il fenomeno che le tiene accese.

Grazie alla temperatura elevata, che li fa muovere veloci e sbattere con forza l'uno contro l'altro, vincendo la repulsione dovuta alla loro carica elettrica, i protoni si fondono e nasce il nucleo del primo elemento diverso dall'idrogeno, il leggerissimo *elio*. Il suo nucleo (che i fisici chiamano *particella alfa*) è fatto di due protoni e due neutroni ed è legato molto solidamente,

più di tutti i suoi vicini leggeri nella tavola di Mendeleev. Questa sua speciale stabilità è fondamentale per tutto quello che viene dopo, perché si rifletterà nel nucleo alla base della nostra esistenza, il *carbonio*: per il momento non esiste ancora, ma quando nascerà sarà stabilissimo proprio perché costruito, essenzialmente, da tre particelle alfa attaccate insieme.

Intanto, mentre l'universo continua a raffreddarsi, fa in tempo a nascere anche un pochino di *litio*, con tre protoni nel nucleo, e forse un pizzico di *berillio*, con quattro protoni. Così l'universo, pur giovanissimo, riesce a fare il prodigio inseguito dagli alchimisti medievali come dai fisici moderni: generare materia nuova partendo da «mattoni» esistenti.

La nucleosintesi cosmologica, o primordiale, che abbiamo appena descritto avviene nei primi, famosissimi tre minuti di vita dell'universo. A questo punto il cosmo ha un diametro di quasi cento milioni di chilometri, più piccolo dell'odierna distanza Terra-Sole, e la temperatura scende a quasi un milione di gradi, troppo bassa per sostenere ulteriormente la fusione.

Finisce così la nucleosintesi, che era stata una vera e propria corsa contro il tempo, ma i suoi risultati vivono ancora oggi intorno a noi, per esempio nell'idrogeno dell'acqua degli oceani, e persino dentro di noi. Nel nostro corpo infatti ci sono parecchi kilogrammi di atomi di idrogeno (e magari qualche atomo originale di elio e di litio): i loro nuclei si sono formati 13,7 miliardi di anni fa, sono la nostra etichetta «made in Big Bang».

I primi atomi e le foto dell'universo neonato

La nostra comprensione della nucleosintesi cosmologica – uno dei trionfi della scienza della seconda metà del Novecento – ha prodotto anche un altro importante risultato: sappiamo esattamente quanta materia, del tipo che forma il nostro corpo, esiste nell'universo alla conclusione della nucleosintesi. Dopo i tre minuti iniziali, basta, finito: di materia così non se ne farà mai più. Al massimo, come vedremo, le stelle la trasformeranno, ma non ne nascerà più.

Nei primi tre minuti abbiamo visto accadere un sacco di cose. Nei successivi 380 000 anni circa, invece, non succede niente. La zuppa di fotoni, protoni ed elettroni, con un po' di nuclei di deuterio, elio e litio, continua a espandersi. Ma si espande con una proprietà speciale: nonostante la presenza di tantissimi fotoni, i *quanti* della luce, non si vede proprio nulla, è buio pesto.

I fotoni infatti hanno una speciale affinità con gli elettroni: se questi ultimi vanno in giro liberi, i fotoni ci sbattono subito contro e non riescono ad andare avanti, insomma non illuminano. È una questione di densità e di temperatura. Per 380 000 anni ci sono in giro tantissimi elettroni liberi, in uno spazio relativamente piccolo. E per di più l'universo è ancora così caldo che gli elettroni si muovono in modo frenetico; così, seppur carichi negativamente, non riescono ad accorgersi che c'è in giro un mucchio di protoni, carichi positivamente, che non aspettano altro che di catturarli e legarli a sé.

Questo inizia invece a succedere quando l'universo compie 380 000 anni, arriva alle dimensioni che ha oggi all'incirca la nostra Galassia (un diametro di centomila anni-luce) e la sua temperatura scende a 3000 gradi, circa metà di quella della superficie del Sole.

Un altro evento mirabile: gli elettroni, rallentando, «sentono» la carica dei protoni, vengono catturati, cominciano a girare intorno ai protoni e nascono i primi *atomi neutri*: soprattutto idrogeno, con interessanti tracce di altri elementi chimici cosmologici. Ma allo stesso tempo i fotoni hanno via libera e l'universo, finalmente, si può vedere.

Uno dei risultati più belli dell'astronomia moderna è proprio l'immagine della figura 2: una «fotografia» dell'universo nato da poco, che lo ritrae non appena si è potuto vedere. «Vedere» in questo caso significa guardare una carta del cielo che descrive com'erano distribuiti i primi fotoni usciti dall'universo.

Proprio per la scoperta, prima, e poi per il disegno dettagliato di quei fotoni sono già stati assegnati due premi Nobel (a Penzias e Wilson nel 1978 e a Mather e Smoot nel 2006). Ma, come ora vedremo, c'è voluto un po' prima di capire che tipo di radiazione potesse essere, ossia che cosa si dovesse cercare.

La radiazione fossile

L'espansione dell'universo, scoperta quando si è osservato che le altre galassie si stanno allontanando dalla nostra, implica un continuo raffreddamento del cosmo: l'energia iniziale si disperde in un volume via

via crescente. Perciò i fotoni generati dal Big Bang, partiti «caldissimi» circa 13,7 miliardi di anni fa, oggi sono molto più «freddi», cioè hanno un'energia molto minore. La loro temperatura si può misurare, e si trova che è soltanto 2,7 gradi sopra lo zero assoluto (ossia a circa $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$). Questo è esattamente il valore previsto dalla teoria dell'espansione dell'universo, che dalla misurazione di questa *radiazione di fondo* del cielo ha tratto una spettacolare conferma.

All'inizio infatti ciò che si è poi osservato (dagli anni Sessanta in poi) era soltanto una previsione teorica.

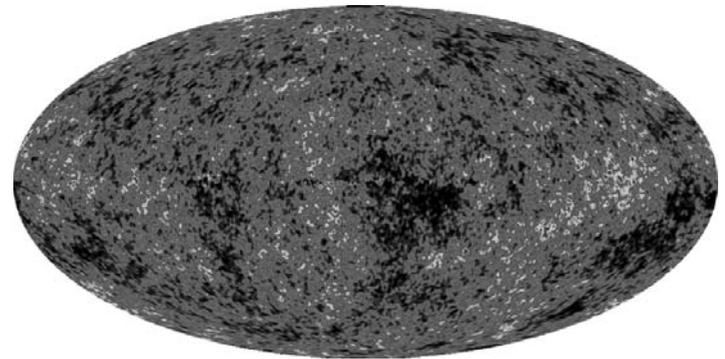


Figura 2 Questa è la «prima fotografia» dell'universo: mostra l'aspetto del cielo a soli 380 000 anni dal Big Bang, l'epoca in cui il cosmo è diventato per la prima volta trasparente alle onde elettromagnetiche. Le gradazioni di grigio rappresentano minuscole fluttuazioni di temperatura ($\pm 200\text{ }\mu\text{K}$) misurate dalla sonda Wilkinson Microwave Anisotropy Probe nella radiazione fossile che risale a 13,7 miliardi di anni fa.

Immagine: NASA/WMAP Science Team.

Ralph Alpher e Robert Herman, due astrofisici in seguito ignorati dal comitato Nobel, nel 1948 avevano già predetto che, secondo la la teoria del Big Bang, nel «fondo del cielo» avrebbe dovuto esserci una radiazione a bassa temperatura, resto fossile dei primi fotoni scappati fuori poco dopo il Big Bang. Avevano anche predetto la temperatura di questa *radiazione fossile*: i fotoni dovevano essere a 5 K, soltanto cinque gradi sopra lo zero assoluto. La previsione si scontrò con una generale incredulità.

Invece Alpher e Herman avevano ragione, a parte un errore di un fattore due nel valore stimato per la temperatura. La loro previsione è stata un risultato incredibile, per arditezza e profondità, rispetto alle conoscenze dell'epoca. Sarebbe un po' come predire oggi, per il prossimo 4 aprile, l'atterraggio di un disco volante del diametro di 100 metri in Piazza San Pietro, suscitando ovviamente grande scetticismo. Ma poi alla data stabilita tutti possono osservare un disco volante che effettivamente atterra davanti all'obelisco; senonché il suo diametro è di soli 54 metri...

Torniamo all'immagine della figura 2 e proviamo a guardarla da vicino. Si vede bene che la radiazione fossile non è uniforme su tutto il cielo: vi sono punti dove è più intensa (o più calda) che in altri, anche se la differenza è soltanto di una parte su centomila.

Queste fluttuazioni della radiazione sono interessanti: l'unica loro spiegazione possibile è che rappresentino l'impronta fedele, lo stampo, di analoghe fluttuazioni di densità di materia. Anche di quella materia attraverso cui i fotoni finalmente erano ri-

usciti a passare per scappare fuori, ma soprattutto della famosa *materia oscura*.

Con questa espressione, in mancanza di un nome migliore, si indica quella «cosa» che fa sentire la propria presenza tramite l'attrazione gravitazionale (determinando in particolare la forma delle galassie e la loro disposizione in ammassi) ma che, a differenza delle stelle o del gas interstellare, non emette onde elettromagnetiche.

La materia oscura, che già all'epoca della figura 2 doveva costituire la maggior parte della materia nell'universo, non era liscia e uniforme ma mostrava già (seppur giovanissima) piccole «rughe», appunto di una parte su centomila. Quanto piccole siano queste rughe è ben spiegato da un'analogia terrestre: se la superficie della Terra fosse liscia allo stesso modo, la differenza tra la più alta vetta e la più profonda fossa oceanica sarebbe ridicola, pari a soli 70 metri.

Ed è una fortuna che ci fossero fluttuazioni: sono state proprio quelle piccole variazioni di densità, catturate nella fotografia dei fotoni fossili, a impedire che l'universo fosse solo una zuppa sottile, insipida e uniforme, di idrogeno e poco altro. E in tal caso, ancora una volta, noi oggi non esisteremmo: l'universo sarebbe tutto uguale, dappertutto, e la sensuale signora Ph(i)Nko di «Tutto in un punto» non potrebbe farci le tagliatelle... Dice infatti Calvino:

Si stava così bene tutti insieme, così bene, che qualcosa di straordinario doveva pur accadere. Bastò che a un certo momento lei dicesse: «Ragazzi, avessi un po' di spazio, come mi piacerebbe farvi le tagliatelle!».

E in quel momento tutti pensammo allo spazio che avrebbero occupato le tonde braccia di lei muovendosi avanti e indietro con il mattarello sulla sfoglia di pasta, il petto di lei calando sul gran mucchio di farina e uova che ingombra il largo tagliere mentre le sue braccia impastavano impastavano, bianche e unte d'olio fin sopra al gomito; pensammo allo spazio che avrebbero occupato la farina, e il grano per fare la farina, e i campi per coltivare il grano, e le montagne da cui scendeva l'acqua per irrigare i campi, e i pascoli per le mandrie di vitelli che avrebbero dato la carne per il sugo; allo spazio che ci sarebbe voluto perché il Sole arrivasse con i suoi raggi a maturare il grano; allo spazio perché dalle nubi di gas stellari il Sole si condensasse e bruciasse; alle quantità di stelle e galassie e ammassi galattici in fuga nello spazio che ci sarebbero volute per tener sospesa ogni galassia ogni nebula ogni sole ogni pianeta, e nello stesso tempo del pensarlo questo spazio inarrestabilmente si formava, nello stesso tempo in cui la signora Ph(i)Nko pronunciava quelle parole: «... le tagliatelle, ve', ragazzi!»

Ma per fortuna le fluttuazioni ci sono state, ed erano delle dimensioni giuste (guarda caso). E allora vediamo come da loro siano poi venute fuori tutte le cose descritte dalle penna di Calvino, dalle stelle ai pianeti, compreso il seno della signora Ph(i)Nko.

Le prime stelle

È passato un po' di tempo da quando la materia, finalmente disaccoppiata e indipendente dalla radiazione, e composta ancora soltanto di leggerissimi elementi primordiali, ha cominciato in qualche modo a «condensarsi», cioè a seguire l'evolversi delle fluttuazioni di densità, lasciate in balia delle forze gravitazionali. Per la precisione passano circa duecento mi-

lioni di anni, durante i quali il cielo si raffredda uniformemente. Ai nostri occhi tutto sarebbe sembrato buio, perché non erano ancora nate le stelle...

Anche nel buio però la gravità era al lavoro, scatenata. Era al lavoro sulla materia formata fino ad allora, la roba fatta nei primi tre minuti, per intenderci, che però era sparsa in mezzo al mare, molto più abbondante, di materia oscura. Un mare che appunto aveva le variazioni di densità di cui abbiamo parlato. Proprio da quelle increspature, molti miliardi di anni prima che Isaac Newton arrivasse a capirlo, poteva partire il fenomeno del *collasso gravitazionale*: l'attrazione verso il centro dovuta alla gravità produce, a valanga, concentrazioni sferiche di materia sempre più densa.

Anche la materia «normale», il 4% di idrogeno e poco altro, scivola inesorabilmente nelle grandi «buche gravitazionali» create dalle fluttuazioni della materia oscura, che la fa da padrona. Man mano che aumenta la densità, e quindi anche la temperatura, la materia si frammenta in tanti «centri di condensazione». A questo punto succedono uno, cento, mille, cento milioni di piccoli Big Bang alla rovescia: cadendo su se stessa, in preda alla propria attrazione gravitazionale, la materia contraendosi forma palle di atomi sempre più dense e sempre più calde.

Con il crescere della densità e della temperatura i nuclei atomici, per lo più di idrogeno, sono spinti con forza sempre maggiore uno verso l'altro finché, di colpo, comincia una seconda era della nucleosintesi (che continua ancora oggi). Riparte cioè la fusione termonucleare, questa volta su scala molto più

piccola di quella dei primi tre minuti, e iniziano a formarsi nuclei di elio e di altri elementi leggeri, con forte liberazione di energia. In altre parole, si è accesa la prima generazione di stelle.

Hanno tutte massa molto grande rispetto al nostro Sole, magari cento volte più grande. E la loro materia iniziale non può che essere principalmente idrogeno, con un 20% di elio e un pizzico di litio. È la ricetta ideale per la fusione termonucleare, che procede alla grande, in modo quasi parossistico nelle stelle di grande massa. Infatti queste stelle vivono poco, qualche decina di milioni di anni, bruciando rapidamente tutto il loro carburante «leggero». E qual è il prodotto della combustione nucleare? Nuclei di elementi chimici sempre più pesanti, costruiti secondo le leggi della fisica nucleare.

Nascono così i nuclei più pesanti del litio: il carbonio dei nostri tessuti, l'ossigeno che respiriamo, il calcio delle ossa, su su fino al ferro del sangue. La nucleosintesi stellare è simile a quella cosmologica dei primi tre minuti, ma molto più completa, semplicemente perché ha molto più tempo a disposizione.

Ma è proprio quando si arriva al ferro che Madre natura impone uno stop a questo processo. Quello del ferro infatti è un nucleo speciale. Sintetizzando i nuclei degli elementi più leggeri si libera energia, proprio l'energia che tiene calda la stella (e che ci abbronzia). Ma al di là del ferro il bilancio energetico del processo cambia segno: per fare i nuclei più pesanti del ferro, che pure vediamo abbondanti intorno a noi, occorre *fornire* molta energia.

Le supernovæ: nascono tutti gli elementi

Madre natura ci ha pensato, naturalmente. Quando una stella finisce il carburante, nel senso che ha fatto tutta la nucleosintesi che poteva fare, essa non libera più abbastanza energia per opporsi al proprio collasso gravitazionale, come vedremo meglio più avanti. Di colpo, in una frazione di secondo, la stella *implode*: la materia di cui è fatta cade su se stessa verso il centro. Subito dopo la stella esplose: quella stessa materia, riscaldata e compressa nell'implosione, rimbalza verso l'esterno.

Il meccanismo di questa gigantesca esplosione, chiamata *supernova*, è complicato nei dettagli ma alcune sue caratteristiche si possono capire in modo intuitivo, e sono fondamentali per la nostra storia (stiamo creando il mondo come è oggi e mettendo le basi per la nostra stessa esistenza, ricordiamocelo!).

Primo: l'energia coinvolta nell'esplosione di una supernova, che dura diciamo un secondo, può essere dell'ordine di 10^{44} joule, pari a tutta quella che il nostro Sole emette nella sua intera vita. È una energia largamente sufficiente per formare nuovi elementi e completare la tavola di Mendeleev al di là del ferro. Con abbondanze e proprietà diverse, dettate dalle leggi della fisica nucleare, nascono così il germanio dei nostri transistor, l'argento delle nostre posate, l'oro dei nostri orecchini e anche l'uranio delle nostre bombe. Proprio così: ogni singolo nucleo di questi elementi, che si trovano oggi sulla Terra e che vediamo tutti i giorni, è stato creato, cioè sintetizzato, da elementi più leggeri nelle esplosioni di supernova. Questa è la «nucleosintesi esplosiva», il terzo tipo di nucleosintesi, dopo quella primordiale e quella stellare, che completa la tavola periodica e produce il mondo essenzialmente come lo vediamo oggi.

Secondo: l'esplosione, dopo aver creato i nuclei dei nuovi elementi, li sparge insieme ai vecchi in giro per lo spazio. Si crea in questo modo un *gas interstellare*, così chiamato perché sta letteralmente tra le stelle. Il gas si arricchisce sempre più, a ogni esplosione, di elementi pesanti: e questi, per dare origine alla vita, sono ben più utili dell'insipido brodetto primordiale (di idrogeno e poco altro).

Terzo: dalle esplosioni di supernova provengono anche altri interessanti prodotti. Sono i noccioli duri centrali delle stelle, i resti supercompressi della materia caduta su se stessa e non spazzata fuori all'esterno. La densità, durante l'implosione, produce strani scherzi. Può comprimere grandi quantità di materia fino a una densità simile a quella dei nuclei atomici, trasformandole interamente in neutroni. Così nascono le *stelle di neutroni*, che hanno una massa dell'ordine di quella del nostro Sole, compressa in una sfera con raggio non più grande di una decina di chilometri. Ma l'implosione, se la massa iniziale è abbastanza grande, può andare ancora più in là e produrre il famoso *buco nero*: un oggetto in cui una massa pari a molte volte quella del Sole è compressa dentro un raggio di pochi chilometri, dunque ancora più denso della stella di neutroni. Anzi, così denso che la *velocità di fuga* dalla sua superficie, ossia la velocità che bisognerebbe acquistare per allontanarsene indefinitamente, diventa maggiore della velocità della luce. Nemmeno i fotoni ce la fanno a scappare via dal buco nero, che perciò, appunto, è nero...

Naturalmente non tutte le stelle dell'universo fanno una fine così spettacolare. In realtà la durata della vita e il tipo di morte di una stella dipende molto dalla sua massa iniziale. Quelle che nascono molto grosse, con decine o centinaia di volte la massa del Sole (come le «stelle di prima generazione»), bruciano tutto molto in fretta, vivono poche centinaia o addirittura soltanto decine di milioni di anni e finiscono con una supernova, lasciando magari un buco nero al centro.

Le stelle meno massicce, fino a 20 masse solari circa, possono lasciare una stella di neutroni, mentre le stelle simili al Sole, molto più comuni, non producono grandi esplosioni, vivono a lungo (per esempio 10 miliardi di anni) e per tutta la vita espellono gas arricchito dal loro lavoro nucleare.

Insomma: un po' per esplosione un po' per normale emissione, stelle giganti e stelle più comuni, come il Sole, generazione dopo generazione arricchiscono il gas interstellare di elementi pesanti.

Le galassie

Abbiamo visto che le stelle di prima generazione sono nate a causa delle fluttuazioni di densità della materia oscura nel cosmo iniziale. Nate insieme, le une vicino alle altre, le stelle sono legate dall'attrazione gravitazionale in grandi agglomerati che ne possono facilmente contenere miliardi, anzi centinaia di miliardi. Nascono così le *galassie*, quelle che fino a un secolo fa si chiamavano «universi-isola»: così grandi da sembrare a ciascuna un universo a sé.

I cento miliardi di stelle – una più una meno – di ogni galassia si organizzano, seguendo l'attrazione gravitazionale, in eleganti forme e strutture come le gigantesche spirali, e ruotano con maestosa lentezza intorno al centro (dove spesso abita un enorme buco nero, di massa equivalente a miliardi di Soli).

La nostra Via Lattea, per esempio, che è una galassia disgustosamente normale e mediocre, fa un giro completo su se stessa ogni duecento milioni di

anni. Da quando è nata, certo non moltissimo tempo dopo il Big Bang, deve aver già fatto almeno una cinquantina di giri, intanto che le sue stelle nascevano, morivano e si riformavano.

Parlando di stelle e galassie, facciamo un po' di conti. Se una galassia banale (e quindi tipica) come la nostra ne contiene cento miliardi, e nell'universo che conosciamo ci sono almeno cento miliardi di galassie, di stelle in totale nel cosmo ce ne sono proprio tante: 10^{22} . È un numero davvero grande: le stelle sono più numerose dei granelli di sabbia su tutte le spiagge e in tutti i deserti del nostro pianeta.***

Peccato che nessuno finora abbia mai osservato le stelle di prima generazione, quelle che, qualche centinaio di milioni di anni dopo il Big Bang, hanno cominciato a produrre gli elementi pesanti. Sono troppo antiche e quindi ancora troppo lontane per i nostri telescopi, ma ci stiamo lavorando.

*** Il numero delle stelle nel nostro universo è paragonabile a quello delle molecole in un cucchiaino d'acqua. Infatti una mole d'acqua, pari a 18 grammi, contiene un numero di Avogadro di molecole di H_2O , ossia 6×10^{23} molecole.