

# Cosmologia osservativa: dalle stelle fisse al multiverso

Antonio Maggio

Istituto Nazionale di Astrofisica Osservatorio Astronomico di Palermo

Conferenza tenuta il 12 giugno 2014 presso Accademia di scienze, lettere ed arti di Palermo.

L'occasione di questa conferenza è stata data dall'annuncio della scoperta di una traccia dei processi fisici avvenuti nei primissimi istanti di vita dell'Universo, pubblicata nel marzo del 2014 da ricercatori dello Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Ho quindi organizzato la mia presentazione in modo da spiegare quali sono le basi della conoscenza scientifica ma anche e soprattutto i suoi limiti, utilizzando per quanto è possibile un linguaggio semplice, anche se alcuni dei concetti sono per loro natura poco intuitivi.

Il titolo "Cosmologia osservativa" presuppone sin dall'inizio la presenza di un osservatore e di un oggetto di osservazione, il Cosmo, che ha la peculiarità di circondare e includere l'osservatore stesso. Nel corso della storia, la cosmologia si è sviluppata come una successione di tentativi di rappresentare il cosmo in maniera sempre più accurata. Nella prima figura ho raccolto alcuni "modelli" d'Universo prodotti da culture diverse: Maya, Hindu, Navajo, poi la versione di Dante e infine quella presentata in un'antica Bibbia luterana.

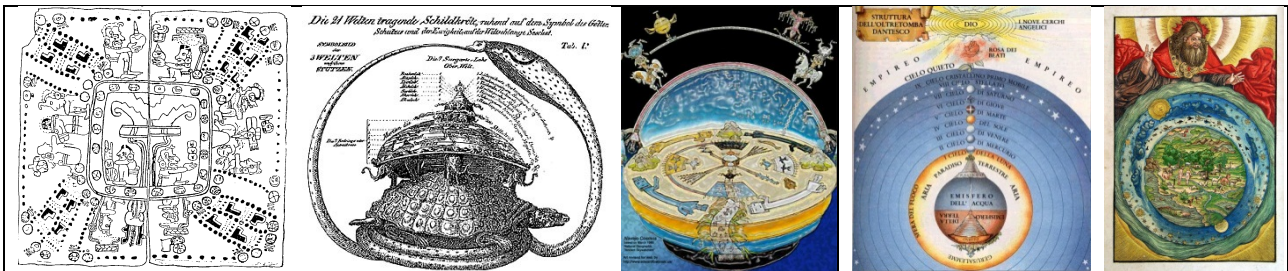


Figura 1: Rappresentazioni dell'Universo secondo diverse culture

La Figura 2 mostra invece la rappresentazione più recente che ci viene offerta dall'astrofisica. Nel seguito illustrerò alcuni dei passi fondamentali del progresso scientifico che ci hanno condotto a questa descrizione, ma vale la pena di notare subito una caratteristica peculiare: la direzione verticale è associata alla dimensione spaziale (geometrica) dell'Universo, mentre la direzione orizzontale indica lo scorrere del tempo. Infatti, nella descrizione odierna – che si fonda sugli sviluppi della scienza del '900 – spazio e tempo non possono essere più trattati separatamente.

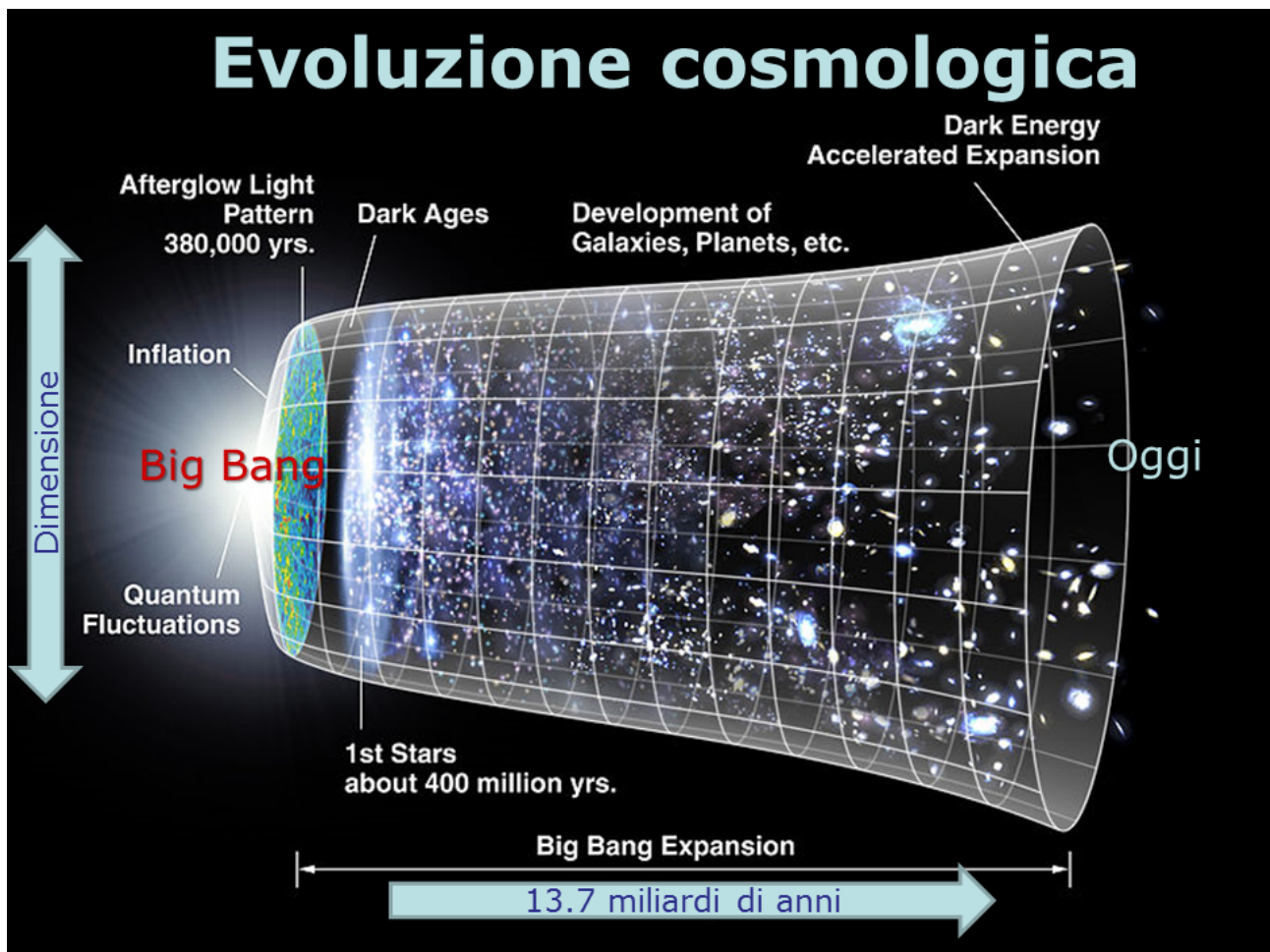


Figura 2: Evoluzione nello spazio e nel tempo dell'Universo secondo la cosmologia moderna.

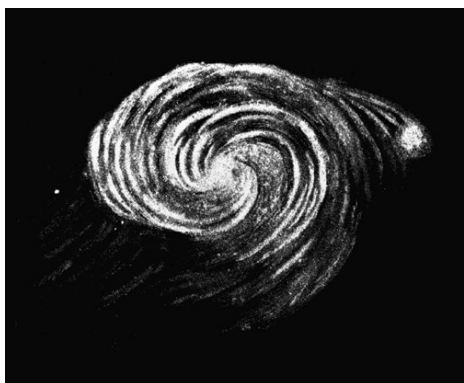
Da dove viene l'informazione sulla dimensione temporale dell'Universo? Essa scaturisce naturalmente dall'aver compreso che la luce, il mezzo che trasporta fino a noi l'informazione sugli oggetti celesti, viaggia a una certa velocità (circa 300.000 km/s nel vuoto); l'informazione che ci arriva risale dunque a un tempo passato, tanto più remoto quanto più lontana da noi è la sorgente luminosa. Ad esempio, guardando stasera il cielo poco dopo il tramonto, potremo vedere diversi oggetti, ma la loro immagine risale al momento in cui la luce è partita da ciascuno di essi: la Luna ci appare com'era 1,3 secondi fa, il pianeta Giove è quello di circa 40 minuti fa, le stelle che fanno parte dell'ammasso delle Pleiadi nella costellazione del Toro le vediamo com'erano 380 anni fa, mentre l'immagine della galassia di Andromeda è vecchia di 2.200.000 anni circa.

Il primo a descrivere scientificamente e a meravigliarsi della numerosità di oggetti nel cielo fu Galileo Galilei. Puntando il suo cannocchiale proprio verso quel gruppo di stelle che si chiamano Pleiadi, si rese conto che oltre alle 6 visibili a occhio nudo ve ne erano diverse decine meno luminose nella stessa regione di cielo. Galileo scoprì anche che la Via Lattea, quella striscia lattiginosa che vediamo molto bene nel cielo estivo in



**Figura 3: Immagine di una galassia a spirale, simile a quella dove ci troviamo. La posizione del nostro Sole è indicativa.**

verso la fine del '600 da Isaac Newton: corpi dotati di massa si attraggono fra loro, con una forza che si affievolisce con la distanza ma non si annulla mai; in altre parole, la gravità è una forza che agisce da ciascun oggetto dotato di massa nell'Universo verso tutti gli altri, anche a enormi distanze. Ciò portò Newton a concludere che l'Universo doveva essere infinitamente esteso e immutabile, altrimenti una parte di esso inizialmente preponderante avrebbe finito con l'attrarre tutto il resto. Da notare che questa idea di un Universo



inmutabile era stata enunciata diversi secoli prima anche da Aristotele, su basi puramente filosofiche. Oggi sappiamo che Newton aveva ragione per quanto riguarda la forza di gravità ma non sulla struttura dell'Universo.

Per fare un passo avanti dobbiamo aspettare la metà del '700, quando l'astronomo Friedrich Wilhelm Herschel riuscì a effettuare osservazioni che dimostrarono l'estensione limitata della Via Lattea: la sua stima di un'estensione di 20.000 anni luce era in realtà in difetto: sappiamo oggi che la dimensione effettiva è di 120.000 anni luce, ovvero il tempo che un raggio di luce impiegherebbe a

percorrerla da un estremo all'altro.

La struttura a spirale delle galassie è stata compresa soltanto a partire dalla metà del '800, grazie allo sviluppo di strumenti di osservazione sempre più potenti. Con un telescopio che aveva uno specchio primario da 1,8 metri di diametro, chiamato il Leviatano, l'astronomo inglese William Parsons riuscì a osservare nel dettaglio alcuni dei deboli oggetti che Herschel aveva chiamato "nebulose", di cui la galassia detta "Vortice" in Figura 4 ne è un esempio. Da queste osservazioni è scaturita l'idea che le galassie sono sistemi stellari isolati e distanti, concettualmente analoghi agli "Universi Isola" proposti nel 1755 da Immanuel Kant.

Il dibattito scientifico sulla natura e posizione nello spazio delle galassie si è protratto comunque a lungo, una scuola di pensiero sosteneva infatti che si trattasse di oggetti interni alla Via Lattea. La dimostrazione che invece si tratta di oggetti esterni e lontani si deve a Edwin Hubble che operò nella prima metà del '900. Egli fu il primo a misurare la distanza delle "nebulose extra-

galattiche" tramite l'osservazione di particolari stelle pulsanti, dette Cefeidi. Inoltre, tramite nuove tecniche spettroscopiche, riuscì anche misurare la velocità di spostamento delle galassie rispetto a noi.

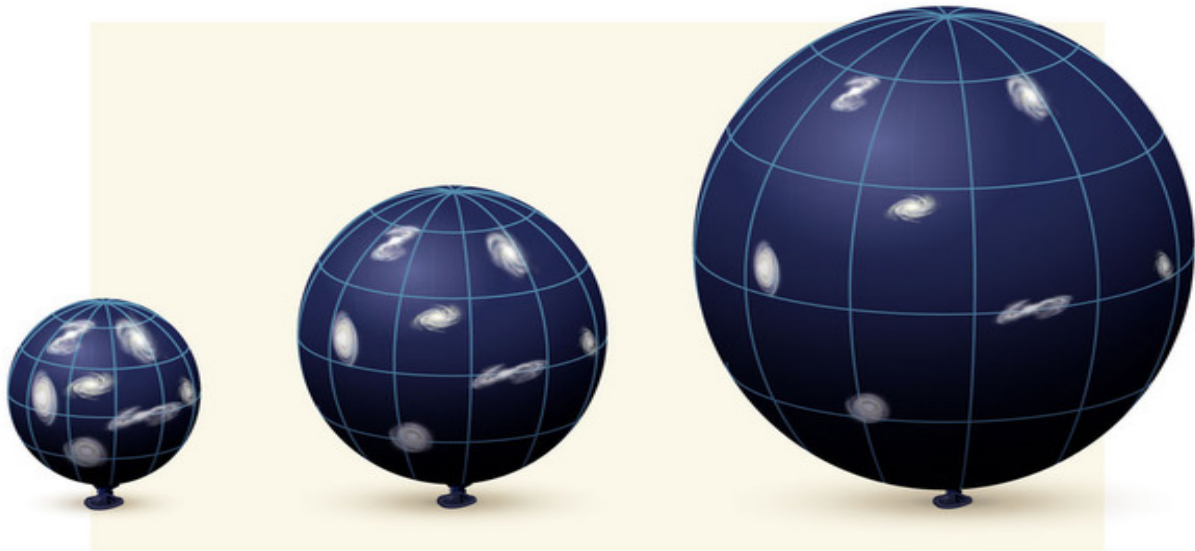
**Figura 4: schizzo della Galassia Vortice (M51), disegnata da William Parson, Lord Ross, nel 1845.**

galattiche" tramite l'osservazione di particolari stelle pulsanti, dette Cefeidi. Inoltre, tramite nuove tecniche spettroscopiche, riuscì anche misurare la velocità di spostamento delle galassie rispetto a noi.

Ad Hubble si deve uno dei fondamenti della cosmologia moderna: l'espansione dell'Universo. I suoi studi dimostrarono infatti che le galassie si allontanano TUTTE da noi, in ogni direzione, con velocità crescente al crescere della distanza, ovvero al diminuire della loro età (le galassie più lontane le vediamo infatti più giovani). La relazione tra velocità e distanza è nota come la "Legge di Hubble", e rappresenta uno dei primi fondamenti della Cosmologia moderna.

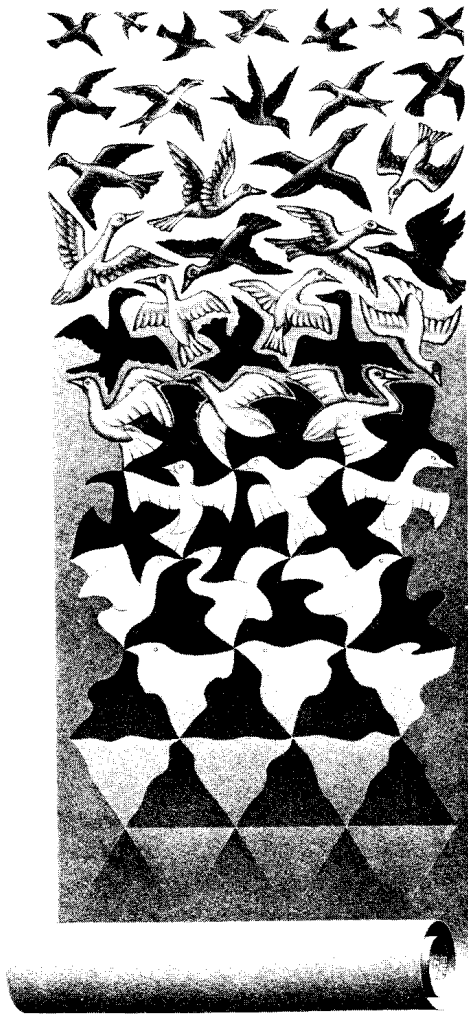
Questa scoperta sorprendente offre una soluzione a un paradosso, tanto semplice quanto elusivo, enunciato per la prima volta nel 1826 dall'astronomo tedesco Heinrich Wilhelm Olbers: il cielo di notte è buio. In estrema sintesi, se l'Universo fosse infinito e statico, la somma della luce di tutte le stelle che arriva a noi da distanza infinita sarebbe tale da mostrare un cielo notturno tanto luminoso quanto quello diurno. Ciò non si verifica per varie ragioni, la principale delle quali è che le sorgenti di luce, stelle e galassie, si allontanano da noi come descritto dalla Legge di Hubble e la loro luce diventa sempre più rossa al crescere della distanza e quindi della velocità di allontanamento, fino a diventare invisibile.

D'altra parte la scoperta di Hubble ripropone in pieno il problema della nostra posizione di osservatori dell'Universo: com'è possibile spiegare il fatto che le galassie si allontanano da noi in qualunque direzione? Ci troviamo forse al centro dell'Universo? Questa visione antropocentrica e di memoria tolemaica si scontra con gli insegnamenti della rivoluzione Copernicana, tappa fondamentale dello sviluppo scientifico su cui si basa la scienza moderna. D'altra parte, non è facile smontare l'idea che noi sulla Terra potremmo occupare una posizione privilegiata nell'Universo. La Cosmologia moderna preferisce basarsi piuttosto su un assunto, noto come "Principio Cosmologico", la cui formulazione si deve a Edward Milne (1932): tutti i punti di vista all'interno dell'Universo devono essere equivalenti, ovvero l'Universo deve apparire simile in qualunque direzione si guardi, e lo stesso deve esser vero per un qualunque altro osservatore. Personalmente ritengo che questo principio possa essere inteso come un atto di umiltà della scienza degno di nota.



**Figura 5: Rappresentazione idealizzata dell'espansione dell'Universo, come la superficie di un palloncino. Da qualunque galassia scelta, la visione del resto dell'Universo sarebbe simile, ovvero tutti i punti di vista sono equivalenti.**

Partendo da questo assunto, c'è un modo alternativo di spiegare le osservazioni di Hubble: noi, il Sistema Solare, la nostra Via Lattea siamo uno dei tanti punti equivalenti distribuiti in un volume (l'Universo) che si espande in modo omogeneo: se lo spazio fosse descrivibile come la superficie di un palloncino (Figura 5), da un punto qualunque vedremmo tutti gli altri oggetti sulla stessa superficie allontanarsi da noi in qualsiasi direzione. Possiamo anche immaginare l'Universo come un dolce, ad esempio un panettone, e le galassie come l'uvetta al suo interno: man mano che il dolce lievita, la distanza degli acini d'uvetta va aumentando in tutte



usare un linguaggio estremamente informale – ci conferma qualcosa che abbiamo sempre sotto gli occhi: da un uovo (ben ordinato) è possibile fare una frittata (disordinata), ma non viceversa. C'è dunque un solo modo in cui procede l'evoluzione delle cose, e l'Universo non fa eccezione. Proseguendo con le analogie, così come una tazza di caffè necessariamente si raffredda, lo stesso deve essere accaduto all'Universo. L'Universo oggi lo vediamo così esteso perché si è espanso, ma se potessimo tornare indietro nel tempo scopriremmo che doveva avere un orizzonte più ristretto, doveva essere più caldo e meno strutturato. Questo è quanto ci dicono in effetti le osservazioni.

La Legge di Hubble sembra portare a una ineludibile conclusione: un inizio, una Origine, l'Universo deve averla avuta, in quel momento passato in cui Tutto doveva essere concentrato in un punto. Questo è ciò che i cosmologi chiamano Big Bang. Occorre essere molto chiari però su questo punto: il Big Bang è una

**Figura 6: rappresentazione euristica dell'evoluzione dal semplice (ordine) al complesso (disordine).**

avanti.

Trovandosi di fronte a questo quadro, è facile comprendere come uno degli obiettivi principali degli studiosi di cosmologia per tutto il '900 e fino ad oggi sia stato quello di costruire strumenti che permettessero di guardare sempre più lontano nello spazio, in modo da vedere per quanto possibile com'era l'Universo primordiale, o – se volete – l'Universo nella sua infanzia. Ma come riuscirci?

La risposta, forse sorprendente, è che là dove non arrivano a vedere neanche i più grandi telescopi oggi disponibili, è meglio usare una... radio. La storia racconta che a metà degli anni '60, due ricercatori che

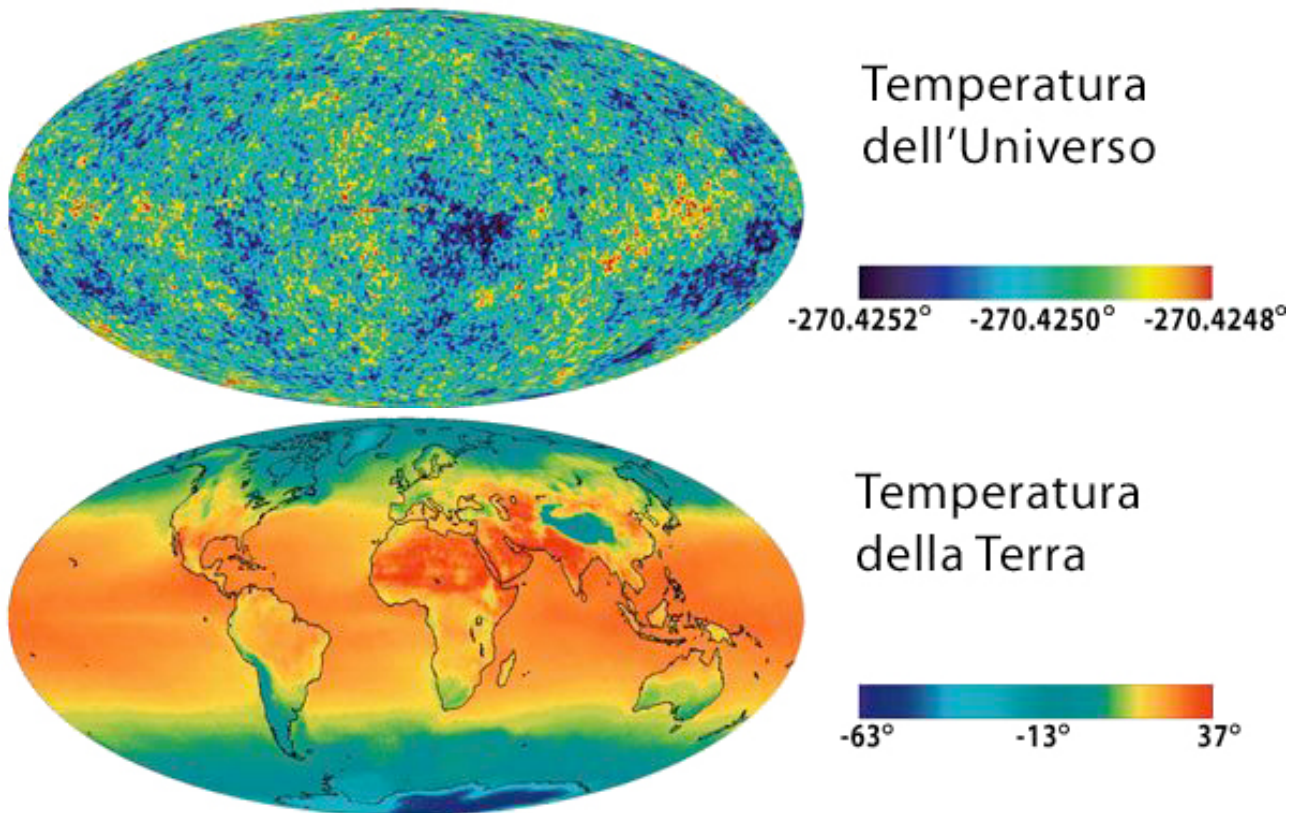
le direzioni. Dunque il Principio Cosmologico ci riporta a essere abitanti di uno degli innumerevoli mondi in una delle tante galassie dell'Universo, senza alcun privilegio se non quello di essere qui a osservarlo.

Riprendiamo ora il nostro viaggio verso i confini visibili dell'Universo e indietro nel tempo. Tutte le osservazioni disponibili con i moderni telescopi sono coerenti con il Principio Cosmologico, ovvero mostrano una distribuzione uniforme degli oggetti nel cielo a patto che si abbia un'ampia visione d'insieme. D'altra parte l'Universo non appare

identico a tutte le distanze, ovvero in ogni momento passato della sua storia: strutture come le galassie a spirale, di cui la Via Lattea è un esempio, non sono sempre esistite e nella sua età primordiale l'Universo appare più semplice. Le osservazioni suggeriscono dunque che deve esserci stata un'evoluzione che ha portato l'Universo da una condizione omogenea alle strutture (stelle e galassie) che vediamo oggi relativamente vicine a noi nello spazio e nel tempo. Da questo punto di vista la Cosmologia moderna ci offre una visione opposta rispetto a quanto affermato dalle cosmogonie antiche: l'Universo non sembra essere nato dal caos per poi procedere verso l'ordine, viceversa procede da una condizione di estremo ordine verso un disordine sempre crescente. Questa evoluzione è descritta da un altro principio fondamentale della fisica, noto come "Secondo principio della Termodinamica", che – volendo

conseguenza dell'estrapolazione all'indietro nel tempo del moto di espansione dell'Universo, ma in realtà NON descrive il modo il cui l'Universo è nato. Torneremo sulla questione più

lavoravano per la Bell Telephone allo sviluppo di trasmettitori per telecomunicazioni a grande distanza scoprirono casualmente l'esistenza di un rumore di fondo nel segnale captato dalle loro apparecchiature radio, che proveniva da qualunque direzione del cielo. Dopo numerosi tentativi di "aggiustare" le apparecchiature per eliminare questo fastidioso rumore di fondo, i due – Robert Wilson e Arno Penzias, premi Nobel per la Fisica nel 1978 – conclusero che il rumore era reale e proveniva da qualche sorgente cosmica. Si trattava di quello che i cosmologi chiamano oggi la Radiazione Cosmica di Fondo. Usando le parole di Arno Penzias: "Prendete una buona radio FM e sintonizzatela tra due stazioni. Sentirete quel suono che fa sh-sh-sh. [...] Circa mezzo per cento di quel suono arriva da miliardi di anni fa." Quel fruscio è oggi riconosciuto come il più lontano segnale da noi ricevibile dell'Universo appena nato. La Figura 7 mostra, in alto, una mappa visiva di questo suono, ottenuta con un ricevitore di micro-onde radio



**Figura 7: Confronto tra la mappa del fondo cosmico a micro-onde, basata su osservazioni del satellite WMAP, e la mappa di temperatura in un planisfero terrestre. Le scale di colore a lato indicano l'intervallo di variazione di temperatura nei due casi.**

a bordo del satellite scientifico WMAP. Essa è di fatto analoga a una mappa della temperatura della Terra, come quella mostrata in basso. Nel suo insieme l'Universo appare omogeneo e isotropo (uguale in tutte le direzioni), con una temperatura quasi uniforme di circa  $-270,425^\circ\text{C}$ . Questa temperatura apparentemente bassa si deve al fatto che l'espansione dell'Universo ha l'effetto di allungare la lunghezza della radiazione, così come si allungano le distanze tra le galassie: il suono che ci arriva (il rumore di fondo nelle micro-onde) è dunque molto basso, come quello di una sirena che si allontana velocemente da noi, e ciò corrisponde a una temperatura bassa. In realtà quello che ci fa vedere questa mappa è un'immagine dell'Universo quando aveva un'età di soli 380.000 anni dopo il Big Bang, la sua temperatura effettiva era di circa 3.000 gradi, era circa 1.000 volte più piccolo e 50.000 volte più denso di oggi. Il fatto che l'Universo fosse tutto (quasi) alla stessa temperatura indica che tutti i punti sono stati in contatto termico tra loro, ovvero – in gergo scientifico – l'orizzonte dell'Universo doveva essere molto limitato.

Una mappa ancora più dettagliata di questa è stata ottenuta nel 2013 tramite osservazioni del satellite scientifico *Planck*, realizzato dall'Agenzia Spaziale Europea. La caratteristica più importante della mappa

sono comunque le piccolissime variazioni di temperatura da punto a punto (differenze di appena lo 0,04%). Queste variazioni sono una traccia dei “semi” (addensamenti locali di materia) che hanno dato luogo alle successive strutture dell’Universo come le vediamo oggi. Per crescere e generare la varietà di oggetti celesti che conosciamo, incluso il mondo in cui viviamo, sono occorsi circa 14 miliardi di anni. In qualche momento recente di questa storia, le condizioni sono state tali da far nascere anche la vita sulla Terra.

La mappa del fondo a micro-onde è una preziosissima fonte d’informazione per i cosmologi: così come dal timbro di un suono è possibile, in linea di principio, capire la forma e composizione dello strumento che l’ha emesso, allo stesso modo l’analisi della mappa della radiazione cosmica di fondo ci consente di capire la geometria dell’Universo, la sua composizione e il modo in cui cresce invecchiando. E qui iniziano le sorprese...

La prima sorpresa è che l’Universo visibile nel suo insieme ha una geometria Euclidea. Ciò si può anche rendere dicendo che l’Universo è praticamente piatto. Questo non significa rinnegare l’esistenza di 3 dimensioni (volgarmente note come lunghezza, altezza e profondità), ma semplicemente che nel calcolo di distanze e angoli valgono le regole della geometria di Euclide: ad es., preso un triangolo qualunque, la somma degli angoli interni è sempre  $180^\circ$ . Questa evidenza fornita dalle osservazioni è sorprendente per almeno due motivi. Il primo è che la piattezza dipende da quanta materia ed energia c’è complessivamente nell’Universo: se ce ne fosse stata un po’ di più, l’Universo avrebbe avuto la geometria di una superficie sferica (curvatura positiva), mentre un po’ meno massa-energia avrebbe dato all’Universo una strana forma a sella di cavallo (curvatura negativa). Un Universo piatto (curvatura nulla) ha esattamente bisogno della quantità giusta di massa-energia, un “valore critico” che a volte viene indicato simbolicamente con “ $\Omega = 1$ ”. Questa scoperta è valsa il premio Nobel per la fisica a J.C. Mather e G.F. Smooth nel 2006. Il secondo motivo di sorpresa dipende dal fatto che questa condizione dell’Universo è una condizione di equilibrio estremamente improbabile: è come se entrando in una stanza trovassimo sul tavolo una matita perfettamente dritta sulla punta e ci venissero a dire che è così da sempre! Una minima inclinazione (ovvero differenza rispetto al valore critico) avrebbe causato una caduta della matita, ovvero un Universo con una curvatura diversa da zero anziché piatto.

Per spiegare questo risultato i cosmologi hanno tirato fuori un’idea bizzarra, ma che sembra funzionare: un Universo piatto sembra essere la conseguenza naturale di un’espansione enorme dell’Universo nell’istante iniziale della sua vita. Quando dico enorme, intendo che l’espansione iniziale si stima essere stata di un fattore tra  $10^{25}$  e  $10^{30}$ , di gran lunga maggiore di quanto poi l’Universo non si sia espanso nei successivi 14 miliardi di anni. Per “istante iniziale”, si intende un tempo minuscolo, veramente difficile da immaginare nella sua brevità: l’inflazione potrebbe essere avvenuta  $10^{-35}$  secondi dopo il Big Bang ed avere avuto una durata di  $10^{-30}$  secondi. Questo fenomeno è descritto da quella che si chiama “Teoria dell’Inflazione dell’Universo” (Alan Guth, 1980).

Ma le sorprese non finiscono qua. Anche la composizione dell’Universo è risultata assolutamente peculiare. L’analisi della radiazione di fondo, insieme a numerose altre osservazioni, ci porta a concludere che la quantità di materia “tradizionale” nell’Universo è soltanto il 4% del totale: in altre parole, se sommassimo tutte le stelle e tutti i pianeti di tutte le galassie nell’Universo otterremmo soltanto una piccola frazione del totale. Parlo qui della materia ordinaria, quella composta da molecole, atomi e da tutte le particelle elementari note alla fisica e alla chimica che studiamo a scuola.

Una frazione ben più grande, circa il 23%, c’è ma non la vediamo; non emette luce ma ne riconosciamo l’esistenza perché quest’altro tipo di materia esercita comunque una forza di gravità su tutto il resto e altera il moto di ciò che è visibile in maniera facilmente misurabile: ad esempio, per spiegare il moto delle stelle nelle galassie, compresa la Via Lattea, appare necessario ammettere l’esistenza di qualcosa che ha una massa, agisce come prescrive la legge di gravitazione di Newton, ma non si riesce a scovare con nessun telescopio. Il nome dato a questo qualcosa, “Materia Oscura”, rivela la nostra attuale ignoranza sulla sua effettiva natura. D’altra parte, il fatto che non emetta assolutamente luce ci conferma che non si tratta di materia ordinaria.

Sommando 4% di materia ordinaria e 23% di materia oscura arriviamo a circa il 27%. E il resto? Altra sorpresa: il resto sembra essere una forma di energia che sta facendo gonfiare l'Universo più velocemente di quanto ci

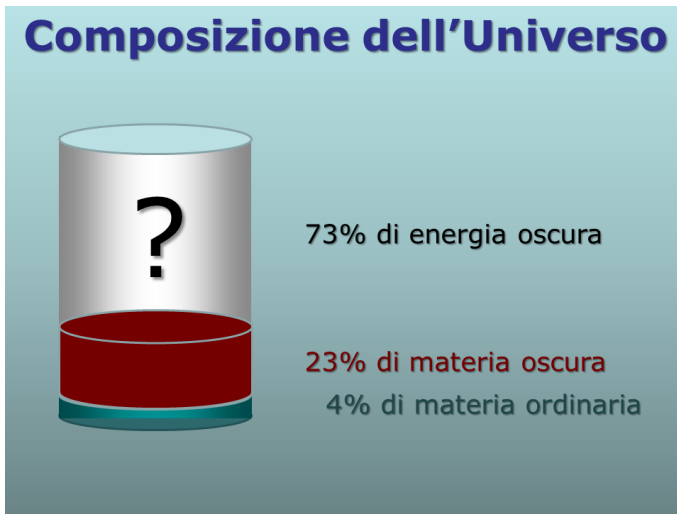


Figura 8: Rappresentazione schematica della composizione dell'Universo.

aspettavamo per effetto del solo Big Bang. Lo studio della velocità di allontanamento delle galassie indica infatti che, in tempi relativamente recenti su scala cosmica, l'Universo non rallenta più la sua espansione, come ci si potrebbe aspettare dopo un lungo tempo, ma sta accelerando. Questo perché una forza di origine ignota, chiamata senza troppa fantasia "Energia Oscura", è diventata preponderante rispetto alla gravità che invece tende naturalmente a frenare l'espansione. In altre parole, mentre la gravità attrae e, da sola, avrebbe potuto fare ricadere l'Universo su se stesso, l'Energia Oscura invece respinge. La scoperta di questo 73% di energia che pervade l'Universo è stata un'altra importante tappa della cosmologia moderna,

riconosciuta con l'assegnazione del premio Nobel per la Fisica a tre scienziati, S. Perlmutter, B.P. Schmidt e A.G. Riess, nel 2011. Da notare che la *possibilità* che esistesse qualcosa del genere era già stata presa in considerazione dal Albert Einstein, allo scopo di ottenere un Universo che fosse semplicemente statico. La scoperta dell'espansione dovuta a Edwin Hubble aveva fatto ricredere Einstein sulla validità della sua ipotesi, la ricerca scientifica gli ha dato infine ragione: l'Energia Oscura c'è ed è molta di più di quella che Einstein riteneva necessaria a spiegare un Universo che non si restringe per effetto della gravità.

Dunque, la composizione dell'Universo determina la sua geometria e anche la sua storia evolutiva. Se la massa-energia fosse stata maggiore di quella che c'è, l'Universo avrebbe potuto arrestare la propria espansione e tornare a contrarsi fino a collassare nuovamente in un punto. L'esistenza dell'Energia Oscura sembra invece destinare l'Universo a un'infinita espansione, tale da far sì che in un tempo futuro molto remoto tutte le galassie e tutte le stelle saranno tanto lontane dal Sole da lasciare il cielo notturno completamente buio. Questo quadro lascia però spazio a un dubbio: in fondo, non sappiamo quasi nulla dell'Energia Oscura, né da dove nasce né se durerà per sempre, quindi il destino ultimo dell'Universo potrebbe essere diverso da quello appena descritto.

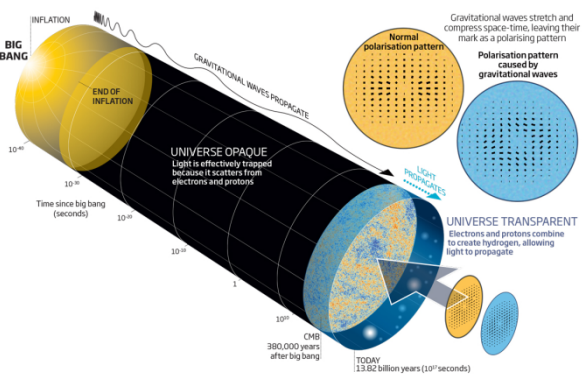


Figura 9: Propagazione di onde gravitazionali nell'Universo primordiale e possibile traccia da ricercare nella polarizzazione della radiazione cosmica di fondo.

Ricapitolando la storia dell'Universo in poche battute, ricordiamo qui alcuni eventi fondamentali: un'istante dopo il Big Bang l'Universo si è espanso a dismisura (epoca dell'Inflazione); entro i primi 3 minuti si sono formati i primi e tuttora principali elementi chimici (idrogeno ed elio). E' seguito un periodo di circa 380.000 anni in cui l'Universo era opaco; questa epoca è per noi impossibile da osservare. La prima immagine che ci perviene dell'Universo neonato è quella della radiazione cosmica di fondo, alla fine di quest'epoca, quando finalmente l'Universo è diventato trasparente, nella quale si vedono già le piccole fluttuazioni in densità e temperatura da cui si svilupperanno tutte le strutture oggi visibili. L'età in cui si sono formate le prime galassie è ancora incerta, ma probabilmente ciò si è verificato quando l'Universo aveva 500 milioni di anni circa; segue un tempo lunghissimo in cui l'Universo assume la conformazione che oggi possiamo vedere relativamente



vicina a noi. A un'età di circa 9 miliardi di anni è successo qualcosa che ci riguarda da vicino, ma che non sappiamo veramente se sia una tappa importante per l'Universo: è nato il Sole e il Sistema Solare, ovvero la Terra. Poi, quando l'Universo aveva tra 9,5 e 10 miliardi di anni, finalmente, è apparsa la vita sulla Terra. Oggi, a 13,7 miliardi di anni dalla "nascita", siamo qui a parlarne.

Ci sono diversi punti di questa evoluzione che ancora necessitano di migliore comprensione e verifica sperimentale. Sarebbe utile innanzi tutto trovare una traccia diretta degli effetti dell'inflazione nel fondo di radiazione cosmica. Il 17 marzo 2014 fu annunciato il risultato di misure ottenute da un gruppo di ricercatori americano (collaborazione BICEP-2) con strumentazione installata presso la base Amundsen-Scott in antartide: sembrava che la radiazione di fondo mostrasse un grado di polarizzazione spiegabile come risultato della propagazione di onde gravitazionali nell'Universo primordiale, come illustrato in figura. Tale risultato è stato però confutato da uno studio successivo del settembre 2014, basato su misure del satellite *Planck*, che interpretava la polarizzazione misurata come un effetto di contaminazione dovuto alla polvere interstellare nella nostra Galassia.

Vi sono poi altri interrogativi ancora aperti (l'elenco è certamente parziale):

- *Che cosa ha scatenato l'inflazione iniziale dell'Universo?*
- *Come è possibile che l'Universo sia così piatto?*
- *Perché l'energia oscura ha un valore così modesto, per quanto importante?*
- *Come mai l'Universo è così ordinato dopo 13,7 miliardi di anni?*

Mi soffermerò soltanto sull'ultimo di questi interrogativi. Abbiamo detto che l'Universo procede naturalmente dall'ordine al caos, ovvero verso stati di maggiore entropia (in accordo al II Principio della Termodinamica), come tutto quello di cui abbiamo esperienza diretta. Eppure, guardandoci attorno notiamo comunque un grado di ordine notevole: la vita sulla Terra è l'esempio più eclatante dell'esistenza di un certo ordine, almeno localmente. Anche la Terra in sé o il Sistema Solare nel suo complesso sono oggetti abbastanza ordinati. Sembra quindi che per spiegare le strutture relativamente ordinate che ci circondano, nonostante siano passati 13,7 miliardi di anni, si debba essere partiti da una condizione di ordine estremo all'inizio del tempo. Inoltre, sembra che per spiegare la storia dell'Universo nei tempi e nei modi che abbiamo visto, occorranza leggi di natura calibrate in modo estremamente fino: variazioni anche piccole di alcune costanti fondamentali di natura, o anche valori diversi del rapporto tra materia ordinaria, materia oscura ed energia oscura, avrebbero prodotto storie evolutive molto diverse. La vita sembra nata sulla Terra alla fine di una catena di eventi lunga diversi miliardi di anni, eventi che dipendono appunto dalle leggi di natura per come le conosciamo e da certi ben precisi valori di alcuni parametri fondamentali. Si tratta dunque di un caso o di una necessità?

A questo punto occorre fare alcune considerazioni finali. Tutta la storia che vi ho raccontato è frutto di uno sviluppo scientifico unitario e coerente, che nel corso dell'ultimo secolo ci ha portato non solo alle conoscenze di cosmologia appena descritte, ma anche ai numerosi altri progressi nelle scienze fisiche, chimiche, biologiche e allo sviluppo tecnologico di cui la nostra società è pervasa. Tutte le nostre teorie e i nostri modelli, dalla fisica delle particelle elementari alla cosmologia, dall'infinitamente piccolo alle scale cosmiche, concorrono a formare un quadro molto coerente, eppure queste conoscenze oggi ci restituiscono un quadro dell'origine e struttura dell'Universo che appare veramente peculiare e per certi versi improbabile. Come spiegare tutto questo, senza rinunciare alle basi della fisica per come le conosciamo?

Ci sono diverse scuole di pensiero che da anni tentano di rispondere a questi interrogativi fondamentali. Una di queste linee di pensiero, molto in voga al momento, spiega l'apparente paradosso di un Universo così particolare affermando che esso non è unico (Teoria del Multiverso, sostenuta tra gli altri dal noto astrofisico Stephen Hawking): di Universi ne esistono infiniti, e il nostro – con noi che ci viviamo dentro – è soltanto una delle infinite possibilità che si sono realizzate: in pratica, siamo poco più di una fluttuazione statistica, come

una bolla nata casualmente insieme a numerose altre dentro una pentola sul fuoco; questa bolla, il nostro Universo, aveva le condizioni giuste ed è durata abbastanza da permettere la nascita della vita, ma la maggior parte delle altre bolle probabilmente non consentono questo fenomeno.

Una seconda possibilità è che ci fosse qualcosa *prima* del nostro Universo, che lo ha generato con la quantità d'ordine necessaria a dare luogo all'evoluzione che conosciamo. E' come postulare l'esistenza di una gallina che ha fatto l'uovo (l'Universo primordiale) da cui poi è venuta fuori la frittata (la vita); ma per dare vita alla gallina ci voleva in precedenza un altro uovo, così questo Universo potrebbe essere destinato a riciclarsi innumerevoli volte. Come nel caso precedente però, ogni volta che l'Universo rinasce potrebbero cambiare alcune condizioni, per cui non è detto che la vita si formi sempre a ogni ciclo. Noi potremmo essere qui perché in uno dei suoi innumerevoli cicli l'Universo è venuto fuori con le condizioni adeguate. Siamo dunque fortunati.

Una terza possibilità pretende di recuperare il ruolo dell'osservatore, l'essere umano che osserva il cosmo, nella sua interezza: l'Universo è così perché altrimenti non ci saremmo noi ad osservarlo. Questo è quello che si chiama Principio Antropico. E' un'idea confortante, ma dall'apparenza tautologica, un po' come la



conclusione che potrebbe trarre un pesce scoprendo di essere immerso nell'acqua. Se non ci fosse l'acqua (se l'Universo non fosse così) non saremmo qui. Nella sua versione "forte" il Principio arriva addirittura ad affermare che è proprio l'esistenza di un osservatore a determinare le modalità dell'Universo. Questa posizione, apparentemente estrema, è in linea con qualcosa che sappiamo essere valido a livello microscopico: la misura di un sistema fisico quantistico, effettuata da un osservatore, è quella che determina lo stato del sistema stesso; prima della misura nulla è dato sapere, se non che il sistema ha eguali probabilità di essere in diversi stati simultaneamente. E' possibile

applicare questo concetto all'Universo nel suo insieme? Francamente, trovo che questa idea sia fuori dai limiti scientifici.

Infine, resta ovviamente una quarta alternativa: tutto ciò che ci circonda, l'esattezza stessa delle regole e delle leggi di natura, non sono affatto casuali, ma il frutto del volere di un Creatore. O forse più d'uno.

Qui si ferma la nostra capacità di comprendere, attualmente.