

Spigolature astronomiche★

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS)

Quello che ci dice la radiazione di fondo

Annibale D'Ercole

ANCHE se lo spazio tra le galassie appare vuoto, esso è in realtà riempito uniformemente da una radiazione con lunghezze d'onda nell'intervallo delle microonde (sintonizzando il proprio televisore tra due stazioni, l'1% dell'“effetto neve” che appare sullo schermo è dovuto a questa radiazione). Scoperta casualmente nel 1965 da Arno Penzias e Robert Wilson dei Bell Telephone Laboratories (che per questo vennero insigniti del premio Nobel nel 1978), questa radiazione è stata battezzata *radiazione cosmica di fondo*, ma, per brevità, viene spesso indicata con l'acronimo inglese CMB (*Cosmic Microwave Background*). Essa rappresenta la prova cogente del fatto che l'universo si è originato da una grande esplosione – il Big Bang – in quanto costituisce il residuo dell'immenso calore sprigionato da quest'ultimo.

Benché estremamente tenue, la CMB rappresenta un autentico scrigno contenente numerose informazioni relative al giovanissimo universo che hanno effettivamente trasformato la cosmologia da una scienza speculativa a una scienza di precisione, sottraendola alle ironie di fisici operanti in altri campi (il russo Lev Landau, uno dei massimi fisici del secolo scorso, affermava che «i cosmologi sono spesso in errore ma mai in dubbio»).

In questa nota tenteremo di dare un'idea dell'importanza di (alcune) di queste informazioni e delle modalità con cui vengono estratte dallo scrigno in cui sono racchiuse. Per fare questo, tuttavia, è necessario prima richiamare alcuni concetti fondamentali su cui si basano le attuali teorie cosmo-

logiche. I valori numerici che attribuiremo alle varie grandezze cosmologiche che man mano incontreremo sono stati ottenuti proprio dallo studio della CMB.

Omogeneità

L'universo osservabile è disseminato da circa 200 miliardi di galassie, sistemi di stelle, gas e polveri che possono contenere fino a migliaia di miliardi di stelle e con dimensioni che possono superare largamente i centomila anni luce. Le galassie non sono distribuite uniformemente nello spazio. Nella maggior parte dei casi esse sono raggruppate in ammassi, i più ricchi dei quali hanno dimensioni lineari di svariati milioni di anni luce e contengono migliaia di galassie. Gli ammassi si dispongono lungo muri e filamenti che delimitano enormi regioni vuote, dando così all'universo una struttura che ricorda quella di una spugna. Naturalmente, due osservatori posti in punti diversi vedranno “panorami” circostanti alquanto diversi. Tuttavia, se gettiamo a caso un cubo di 500 milioni di anni luce (un volume ancora piccolo rispetto a quello dell'universo osservabile) esso è sufficientemente grande da contenere mediamente, ovunque cada, lo stesso numero di galassie distribuite statisticamente in maniera simile (FIG. 1). Dunque, su larga scala l'universo può essere considerato omogeneo con una certa densità media ρ , così come appare omogenea un'ampia porzione di oceano (vista, p.e., da un aeroplano) nonostante le increspature dovute alla presenza delle onde.

Materia oscura

I moti casuali delle galassie appartenenti ad un ammasso tendono a disperderlo, ma la reciproca attrazione gravitazionale dovuta alla materia presente (gas intergalattico e galassie) si oppone a tale tendenza consentendo all'ammasso di perdurare nel tempo. Tuttavia, le galassie hanno una velocità che

* Questa rubrica si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare ad un pubblico non specialistico. Questi “fondamenti di astronomia”, volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell'argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del «Giornale di Astronomia», <http://giornaleastronomia.difa.unibo.it/giornale.html>.

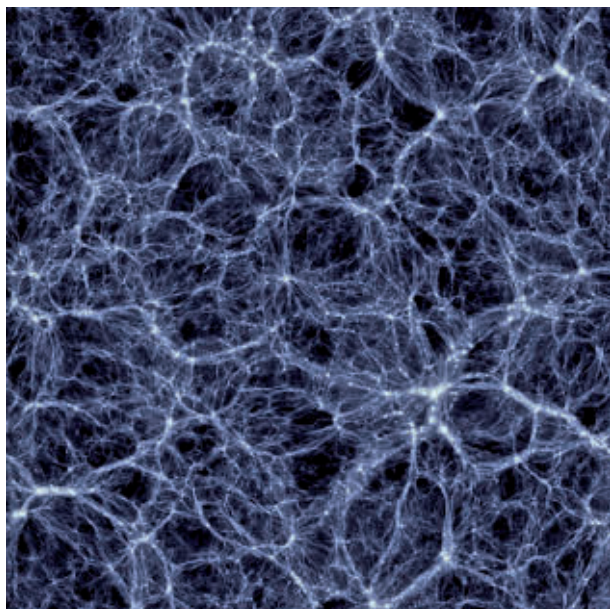


FIG. 1. Distribuzione odierna in una porzione di universo (che si estende per circa un miliardo di anni luce) riprodotta tramite simulazioni al computer. Sono visibili superammassi, ammassi, galassie e vuoti. Le regioni con maggiore densità sono più chiare.

permetterebbe loro di volare via se a trattenerle fosse unicamente la loro reciproca gravità. Deve dunque essere presente una notevole ulteriore quantità di materia la cui gravità è necessaria per contrastare lo scioglimento degli ammassi. Dal momento che questa materia è invisibile non solo nell'ottico, ma in qualunque altra banda dello spettro elettromagnetico (radio, infrarosso, raggi X ecc.), è stata denominata *materia oscura*. Un risultato simile vale anche per le singole galassie le cui stelle si allontanerebbero in breve tempo in assenza della gravità dovuta alla materia oscura. Si calcola che quest'ultima sia circa sei volte maggiore della materia luminosa.

Per motivi su cui non possiamo dilungarci in questa sede, si ritiene che la materia oscura sia del tutto diversa dalla materia *barionica*, ossia la materia ordinaria (protoni, neutroni ed elettroni) di cui sono composte le stelle, il gas interstellare, gli oggetti che ci circondano e il nostro stesso corpo. Si suppone piuttosto che si tratti di particelle pesanti, relativamente poco veloci, che non interagiscono con la radiazione e assai debolmente tra loro e con la materia barionica (se si eccettua la gravità). Per questo vengono indicate con il generico acronimo WIMP (*Weakly Interacting Massive Particles*). La loro velocità non è sufficiente a "sopraffare" la reciproca gravità e di conseguenza tendono ad aggregarsi rapidamente giocando (come vedremo) un ruolo importante nella formazione delle strutture cosmiche. Queste particelle sono effettivamente previste da alcune delle attuali teorie della materia ma ancora mai osservate (alla materia oscura è stato dato ampio spazio nello scorso numero (1/2022) del *Giornale di Astronomia*).

Espansione dell'universo

Le osservazioni ci dicono che l'universo è in espansione. Mediamente, se la distanza tra due galassie è d , la velocità v con cui si allontanano è proporzionale a tale distanza: $v = H_0 d$. H_0 è detta "costante di Hubble" (o, meglio, "di Hubble-Lemaître")¹ dal nome degli astronomi che per primi scoprirono questa relazione nel 1927-29. L'espansione è conseguenza del Big Bang da cui si sono originati, oltre alla materia e all'energia, anche il tempo e lo spazio. L'universo è dunque simile a un panettone che sta lievitando: l'impasto (lo spazio) si espande e gli acini d'uvetta (le galassie) si allontanano gli uni dagli altri pur rimanendo fermi rispetto all'impasto stesso (naturalmente le galassie sono dotate di movimenti locali che però sono trascurabili a livello cosmologico).

Nell'ipotesi (sia pure grossolana) di una espansione costante nel tempo due galassie attualmente a distanza d hanno impiegato un tempo $t_0 = d/v = d/(H_0 d) = H_0^{-1}$ per allontanarsi da quando erano in contatto.² Dunque l'inverso della costante di Hubble fornisce una stima dell'età dell'universo (detta *tempo di Hubble*) pari a $t_0 \sim 14$ miliardi d'anni.

La relazione trovata da Hubble porta anche alla definizione di una distanza caratteristica (detta *distanza di Hubble*) $d_{H_0} = c/H_0 = ct_0$ (dove $c = 300.000$ km/s è la velocità della luce) che rappresenta la massima distanza che un fotone può percorrere durante il tempo di Hubble. Essa indica la distanza di regioni e oggetti che si allontanano da noi alla velocità della luce.³ La sfera individuata da questo raggio (e di cui occupiamo il centro) rappresenta una sorta di *orizzonte*⁴ al di là del quale le galassie si allontanano a velocità superiore a quella della luce e risultano invisibili, in quanto la loro radiazione necessita di un tempo superiore a t_0 per raggiungerci (FIG. 2).

¹ Nel 2018 l'Unione Astronomica Internazionale, tramite votazione interna, ha stabilito la co-attribuzione della legge anche al fisico e presbitero belga Georges Lemaître (vedi: *IAU members vote to recommend renaming the Hubble law as the Hubble-Lemaître law*, su «IAU», 29 ottobre 2018; www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau1812/).

² La costante H in realtà è tale nello spazio (ossia non varia da punto a punto) ma cambia nel tempo (com'è ovvio che sia, dal momento che il suo inverso indica approssimativamente l'età dell'universo). H_0 rappresenta il valore attuale. Per motivi di spazio non discutiamo le tecniche utilizzate per misurare v e d .

³ Sottolineiamo che parlare di oggetti che si allontanano con velocità pari o superiore a quella della luce non contraddice la teoria della relatività. L'insuperabilità della velocità della luce, infatti, vale per oggetti che si muovono *attraverso* lo spazio. In cosmologia, invece, si considera che le galassie siano sostanzialmente ferme rispetto allo spazio e si distanzino a causa dell'espansione di quest'ultimo. Un'analogia è data da due punti disegnati su un palloncino che si allontanano man mano che questo si gonfia.

⁴ I concetti di distanza e orizzonte (ed altri ancora) in cosmologia vanno "maneggiati con cura". La stessa legge di Hubble-Lemaître deve essere riformulata quando si osservano galassie con velocità di allontanamento non trascurabili rispetto a c . Non è possibile affrontare tutto questo nella presente nota dove ci prefiggiamo soltanto di comunicare il "profumo" di alcuni concetti basilari di cosmologia finalizzati alla comprensione della CMB (anche al costo di qualche imprecisione).

Naturalmente, uno dei quesiti a cui i cosmologi devono tentare di rispondere riguarda l'evoluzione futura dell'universo, ossia se esso è destinato ad espandersi per sempre oppure a ricollapsare su sé stesso. Consideriamo l'universo nel suo insieme e, ricordando che la costante gravitazionale vale $G = 6,67 \times 10^{-8}$ in c.g.s., definiamo il parametro $\Omega = \rho/\rho_{cr}$, dove ρ rappresenta la densità media dell'universo e $\rho_{cr} = (3H_0^2)/(8\pi G)$ un determinato valore critico di densità pari, attualmente, a circa 10^{-29} g/cm³, ossia l'equivalente di 6 protoni per metro cubo. Per quel che diremo dopo, precisiamo che ad Ω contribuiscono sia la materia ρ_b barionica sia quella oscura ρ_s : $\Omega = \Omega_s + \Omega_b$, con $\Omega_s = \rho_s/\rho_{cr}$ e $\Omega_b = \rho_b/\rho_{cr}$.

Fino al 1998 i modelli cosmologici mostravano un risultato abbastanza intuitivo: se $\Omega > 1$ la quantità di massa sviluppa una gravità tale da rallentare progressivamente l'espansione fino ad arrestarla e produrre un successivo collasso. Per $\Omega < 1$, al contrario, la gravità è inferiore e l'espansione, pur rallentando, si protrae per sempre. Il valore $\Omega = 1$ rappresenta il caso limite al "confine" tra i due precedenti, in cui la velocità di espansione decresce fino ad azzerarsi dopo un tempo infinito. Nel 1998, però, è stata fatta una scoperta sconcertante, ossia l'espansione, invece di rallentare, *accelera*. Tale scoperta è stata ottenuta grazie alle osservazioni delle supernovae di Tipo Ia (SNe Ia). Questo tipo di supernovae sono esplosioni stellari che emettono tutte la stessa quantità di radiazione, ossia hanno tutte la stessa *luminosità assoluta* (che ci è nota). Confrontando quest'ultima con la *luminosità apparente* osservata è possibile risalire alla distanza di queste supernovae e delle loro galassie di appartenenza (perché la luminosità apparente diminuisce all'aumentare della distanza). Risulta che le SNe Ia dotate di una determinata velocità di recessione appaiono più affievolite e dunque più distanti di quanto non prevedano modelli cosmologici composti unicamente di materia, mostrando che negli ultimi 6 miliardi di anni circa l'espansione è andata accelerando. I cosmologi attribuiscono (quasi unanimemente) questa accelerazione alle proprietà dello spazio vuoto che sarebbe dotato su larga scala di una cosiddetta *energia oscura* repulsiva legata alla costante Λ (introdotta da Einstein nel 1917) la cui origine è al momento ignota (ma presumibilmente legata alla meccanica quantistica) e la cui densità $\rho_\Lambda \propto \Lambda$ rimane costante durante l'espansione.

Ponendo $\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda/\rho_{cr}$, abbiamo quindi $\Omega = \Omega_s + \Omega_b + \Omega_\Lambda$ e, in linea di principio, l'universo potrebbe espandersi anche nel caso $\Omega > 1$. Tuttavia i cosmologi hanno un buon argomento per ritenere che noi viviamo in un universo in cui il valore attuale (indicato con uno 0 a pedice) vale $\Omega = 1$. Ω varia nel tempo e i modelli mostrano che, se un secondo dopo il Big Bang Ω fosse maggiore di 1 anche di pochissimo – p.e. $\Omega = 1,0000000000000001$ – essa crescerebbe rapidamente e l'universo collapserebbe prematuramente; al contrario, un valore di Ω anche di pochissimo inferiore a 1 si ridurrebbe nel tempo al

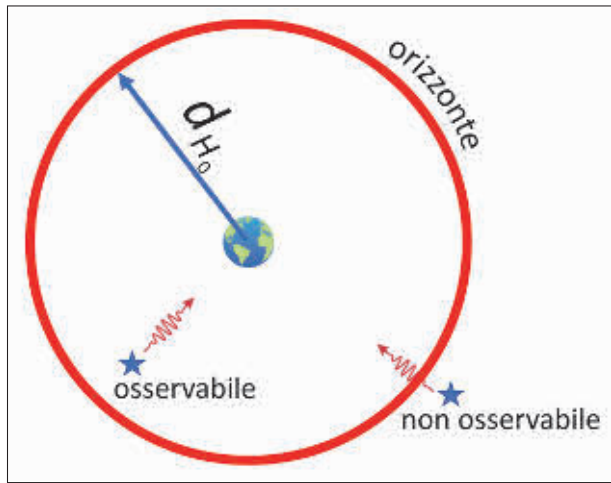


FIG. 2. L'universo osservabile è contenuto all'interno dell'orizzonte. I raggi luminosi emessi dagli oggetti all'interno di questa regione hanno impiegato un tempo inferiore all'età dell'universo per raggiungerci. Invece la luce emessa da oggetti posti al di là dell'orizzonte non ha ancora avuto il tempo di arrivare a noi e tali oggetti risultano pertanto inosservabili indipendentemente dalla potenza dei nostri telescopi.

punto da portare ad un'espansione così veloce da impedire alla materia di aggregarsi in stelle e galassie. Sembrerebbe quindi che la nostra esistenza sia legata alla fortunata "coincidenza" che l'universo sia nato proprio con $\Omega = 1$. In effetti, i dati della CMB hanno confermato con elevata precisione questo valore ed hanno inoltre mostrato che $\Omega_b = 0,04$, $\Omega_s = 0,26$ e $\Omega_\Lambda = 0,70$. Dunque l'universo è composto per il 4% dall'usuale materia barionica, per il 26% da una misteriosa materia oscura e per il 70% da un'ancor più misteriosa energia oscura. Quanto al fatto che Ω_0 valga proprio 1, i fisici diffidano delle coincidenze ed hanno elaborato un'attraente spiegazione che va sotto il nome di *inflazione* a cui accenneremo tra breve.

Geometria dell'universo

Secondo Newton, un oggetto che si avvicinasse al Sole partendo da molto lontano seguirebbe all'inizio una traiettoria sostanzialmente rettilinea. Al ridursi della distanza, tuttavia, l'oggetto risentirebbe sempre più della gravità solare curvando attorno all'astro. Questa descrizione è stata completamente stravolta dalla relatività generale secondo cui, in effetti, la forza di gravità non esiste. L'azione del Sole (e di qualunque altra massa) è quella di curvare lo spazio attorno a sé (FIG. 3). L'oggetto continua a muoversi senza subire alcuna forza, ma la sua traiettoria deflette perché sta attraversando uno spazio curvo (anche i raggi luminosi risentono della curvatura spaziale deflettendo nei pressi del Sole, come mostrato osservativamente per la prima volta dall'astronomo inglese Arthur Eddington nel 1919). Al livello cosmologico la materia distorce l'intero spazio a seconda del valore di Ω_0 (FIG. 4).

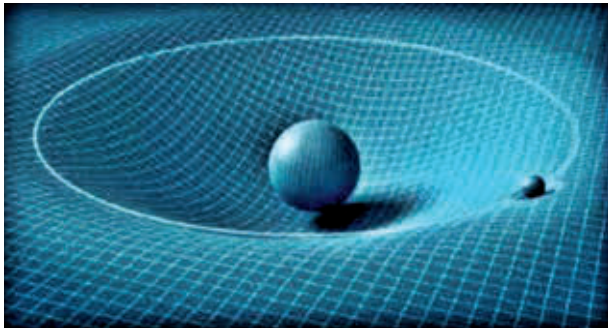


FIG. 3. Un pianeta ruota attorno ad una stella non perché attratto dalla gravità di quest'ultima (che non esiste) ma per la distorsione dello spazio generata dalla massa della stella stessa (qui lo spazio è rappresentato da una superficie bidimensionale). Un'analogia può essere data da un treno che deflette da una traiettoria rettilinea non per via di uno sterzo (che non ha) ma perché lo spazio unidimensionale lungo cui si muove (ossia i binari) descrive una curva.

Se $\Omega > 1$ la distorsione è tale da "chiudere" lo spazio in una curvatura simile, nel caso bidimensionale, a quella di una sfera (curvatura positiva). Per $\Omega < 1$, al contrario, lo spazio si estende seguendo la curvatura di una sella (curvatura negativa). Il caso $\Omega = 1$ indica invece uno spazio piatto (curvatura nulla). Le traiettorie dei raggi luminosi sono diverse nei tre casi, e proprio lo studio della CMB ha mostrato che sono rettilinee (si veda il livello avanzato), provando così che l'universo è piatto (FIG. 4), almeno all'interno del nostro orizzonte (si veda il prossimo paragrafo).

Inflazione

Una formica su una biglia di vetro è chiaramente in grado di capire di trovarsi su una superficie curva in quanto le sue dimensioni sono paragonabili al raggio della biglia. Immaginiamo ora che la biglia si espanda di un fattore enorme pari a 10^{27} (un miliardo di miliardi di miliardi); la curvatura della superficie diverrebbe così piccola da far ritenere alla formica che tutta la regione fino dove può spingere lo sguardo – ossia l'area all'interno del suo orizzonte visivo – sia piatta.

Nel 1981 il fisico statunitense Alan Guth (1947-) ipotizzò che, per motivi che qui non discutiamo, entro i primi 10^{-35} secondi di vita l'universo subì un'espansione (detta *inflazione*) simile a quella della biglia, per poi rallentare e continuare ad espandersi con una "velocità di crociera" pari a quella prevista dalla teoria classica del Big Bang. Questo spiegherebbe dunque la "coincidenza" $\Omega = 1$ all'interno del nostro universo osservabile.

In verità, la teoria inflazionaria è ancora speculativa e non mancano i detrattori. Ma la grande maggioranza dei cosmologi la ritiene realistica perché è in grado di spiegare altri due aspetti dell'universo: la sua omogeneità e la presenza delle galassie.

Consideriamo due regioni di universo distanti, diciamo, 8 miliardi anni luce da noi e posizionate in

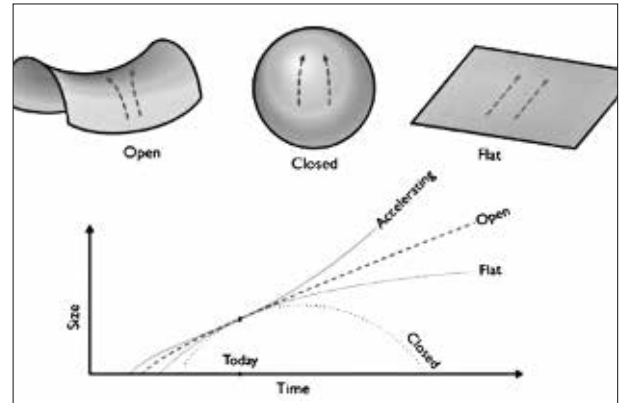


FIG. 4. Nel pannello superiore sono mostrate le possibili geometrie dell'universo (utilizzando l'analogia bidimensionale di superfici di diversa curvatura). In un universo aperto ($\Omega < 1$) due raggi luminosi (linee tratteggiate) che partono paralleli divergono nel tempo. Il contrario accade in un universo chiuso ($\Omega > 1$). Nel caso di uno spazio piatto ($\Omega = 1$) i raggi rimangono paralleli. A queste tre diverse possibilità corrispondono, rispettivamente, un'espansione cosmica perenne, un collasso dopo un'iniziale espansione, e una dilatazione perfettamente "bilanciata" la cui velocità rallenta progressivamente annullandosi dopo un tempo infinito. In presenza dell'energia oscura l'espansione può accelerare anche nel caso di spazio piatto. I dati raccolti sembrano indicare che quest'ultima eventualità rifletta effettivamente il nostro universo.

direzioni opposte. Noi riusciamo a vederle entrambe perché la luce proveniente da tali regioni ha avuto tempo di raggiungerci in 8 miliardi di anni, un periodo inferiore all'età dell'universo (pari a 13,7 miliardi di anni). Ma le due regioni non hanno ancora avuto modo di comunicare tra loro perché distano 16 miliardi di anni luce. Nondimeno, la loro distribuzione di materia è assai simile, e la temperatura della CMB (si veda più sotto) proveniente da entrambe è la stessa. Queste "coincidenze" si spiegano se si ammette che le due regioni erano a contatto alla nascita dell'universo e hanno avuto modo di scambiarsi informazioni omogeneizzando la distribuzione di materia e la temperatura della radiazione; successivamente sono state allontanate a grandi distanze con velocità superiori a quella della luce tramite l'inflazione, ed ora sono una fuori dall'orizzonte dell'altra e prive di contatti causali.

Come abbiamo accennato, l'inflazione è anche in grado di spiegare perché si formano stelle e galassie. Se lo spazio fosse stato all'inizio *perfettamente* liscio e la distribuzione di materia *assolutamente* uniforme, ogni elemento di gas sarebbe stato attratto gravitazionalmente in ugual misura in ogni direzione dal gas circostante e non avrebbe avuto modo di aggregarsi a quest'ultimo per formare galassie ed ammassi. Ma subito dopo il Big Bang l'attuale universo osservabile aveva dimensioni microscopiche, e in queste condizioni le leggi della meccanica quantistica sono rilevanti. In particolare, il *principio di indeterminazione* di Heisenberg impone l'esistenza di fluttuazioni quantistiche ineliminabili di densità che vengono poi "stirate" su scala astronomica durante l'inflazione. Come vedremo, grazie all'azione lenta e paziente della gravità, da queste

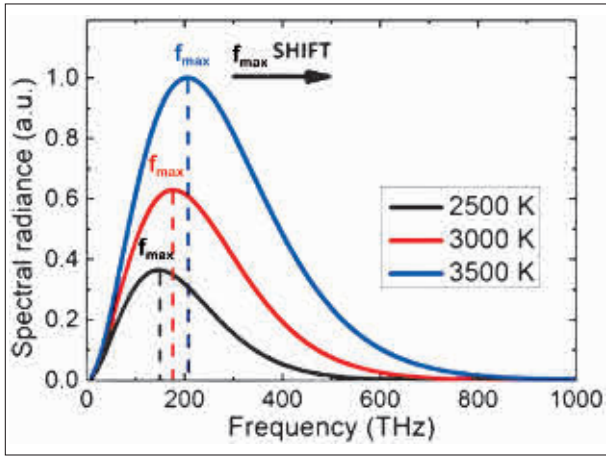


FIG. 5. Spettro di emissione del corpo nero. Esso indica l'intensità di radiazione emessa ad ogni singola frequenza da un corpo nero (si veda il testo) di fissata temperatura T . L'involuppo delle intensità lungo l'asse delle frequenze dà luogo alla caratteristica forma a "campana asimmetrica". All'aumentare della temperatura la curva si solleva (ossia viene emessa più radiazione ad ogni singola frequenza) e aumenta la frequenza corrispondente al picco di emissione.

perturbazioni di densità così piccole ebbero origine le galassie.

Dopo un (non breve) elenco di nozioni di base, veniamo ora all'argomento focale di questa nota: la radiazione di fondo. Dopo circa 200 secondi dal Big Bang la temperatura era dell'ordine di 100 milioni di gradi (molto superiore di quella al centro del Sole) e il moto di agitazione termica prevaleva sull'attrazione elettrica tra nuclei atomici ed elettroni che si muovevano quindi come particelle libere slegate tra loro formando una mistura gassosa detta *plasma*.

Assieme alla materia venne prodotta anche una enorme quantità di fotoni (circa 3 miliardi per ogni barione). Proprio come gli atomi di un gas non hanno tutti la stessa velocità (ossia energia cinetica), anche in un "gas" di fotoni questi differiscono tra loro in energia. Dal momento che l'energia di un fotone di frequenza ν è pari a $E = h\nu$ (dove $h = 6,63 \times 10^{-27}$ in c.g.s. è la costante di Planck) la radiazione prodotta dal Big Bang non era quindi monocromatica ma presentava una distribuzione di intensità alle varie frequenze, detta *spettro*. Data l'alta densità, i fotoni urtavano assai frequentemente con gli elettroni rimanendo "intrappolati" nel plasma e generando un equilibrio tra materia e radiazione: quest'ultima presentava pertanto uno spettro di *corpo nero*⁵ (FIG. 5). Dal momento che questo spettro dipende in maniera univoca dalla temperatura della materia che lo

⁵ Un oggetto ci appare rosso perché assorbe la radiazione solare di tutte le lunghezze d'onda tranne quella corrispondente al rosso che viene riflessa verso il nostro occhio. Il colore rosso è quindi l'effetto di uno squilibrio del corpo nell'assorbimento della radiazione. Un *corpo nero* è invece un oggetto ideale in grado di assorbire a tutte le lunghezze d'onda il 100% della radiazione che lo investe. Una volta posto ad una determinata temperatura T , esso emette una radiazione con uno spettro caratteristico indipendente dal materiale di cui è composto.

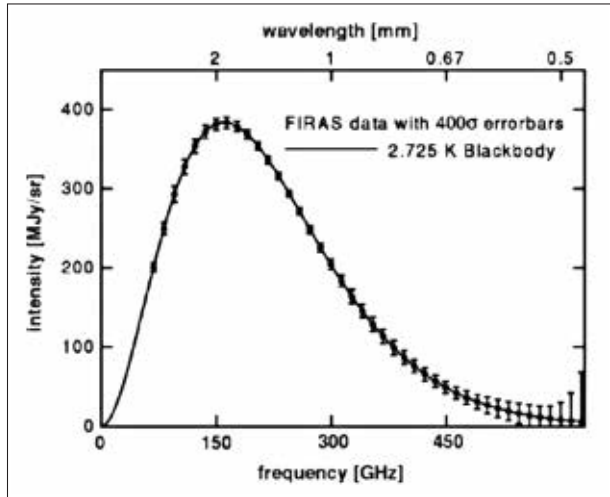


FIG. 6. Spettro della CMB ottenuto con lo strumento FIRAS (*Far Infrared Absolute Spectrophotometer*) montato sul satellite COBE (*Cosmic Background Explorer*) lanciato nel 1989. I dati osservativi (i punti) si dispongono esattamente sullo spettro teorico di un corpo nero con $T = 2,7$ K (linea continua). La CMB rappresenta la miglior misura di corpo nero ottenuta in natura. Le barre di errore delle misure sono state ampliate artificialmente di 400 volte nella figura per poterle rendere visibili. Questo dà un'idea dell'estrema accuratezza delle misure.

genera, alla radiazione viene associata la stessa temperatura del corpo che la emette.

Dopo 380.000 anni, a causa dell'espansione, il plasma si raffreddò raggiungendo una temperatura di 3000 gradi (circa la metà di quella della superficie solare) ed emettendo una radiazione infrarossa con lunghezze d'onda dell'ordine di 10^{-6} m. A questa temperatura i nuclei furono in grado di catturare gli elettroni formando atomi che, in quanto neutri, hanno una scarsa interazione con la radiazione. Si realizzò il cosiddetto *disaccoppiamento*: la materia si rese trasparente e i fotoni poterono propagarsi liberamente in tutte le direzioni costituendo la radiazione di fondo. Da allora lo spazio cosmico si è espanso di circa mille volte, "stirando" con sé anche le lunghezze d'onda dei fotoni che sono quindi cresciute di un ugual fattore, cadendo nella gamma 0,5-5 mm (FIG. 6), ossia l'intervallo delle microonde (lo stesso con cui funzionano i nostri forni a microonde). Dal momento che ad una maggiore λ corrisponde una minore ν (ricordiamo che per un'onda vale la relazione $\lambda\nu = c$), i fotoni hanno perso energia ed oggi la radiazione di fondo ha una temperatura di appena 2,7 K.⁶

Per riuscire ad osservare con grande accuratezza una radiazione così tenue è stato necessario ricorrere a telescopi montati su satelliti, per evitare i segnali spuri dovuti alla radiazione presente sulla Terra. Inoltre, è anche stato necessario "ripulire" i dati dall'emissione del Sole e della nostra Galassia.

⁶ La scala di temperatura Kelvin è simile all'ordinaria scala Celsius, ma "sfasata" di 273 gradi: $0 \text{ K} = -273 \text{ °C}$ e, naturalmente, $273 \text{ K} = 0 \text{ °C}$. La temperatura Kelvin è detta anche *assoluta* perché nessun oggetto può essere più freddo di 0 K.

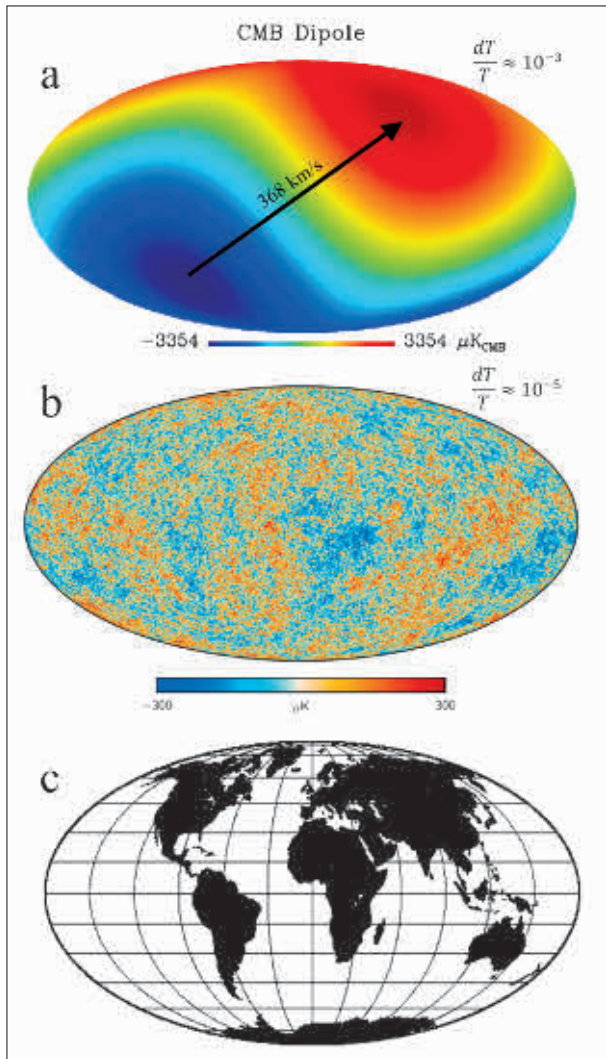


FIG. 7. a) Questa mappa del cielo rappresenta la cosiddetta *anisotropia dipolare* della CMB che risulta avere un'ampiezza positiva massima di circa $3,4 \times 10^{-3}$ K in un emisfero (in rosso nella figura) e minima di $-3,4 \times 10^{-3}$ K (in blu nella figura) rispetto al valor medio di 2,7 K, per una variazione percentuale $dT/T \sim 10^{-3}$. La freccia indica la direzione del moto terrestre. b) Se si "rimuove" dai dati l'anisotropia di dipolo, la temperatura della CMB appare estremamente uniforme con percentuali di disomogeneità dell'ordine di $dT/T \sim 10^{-5}$. La mappa mostrata è stata ottenuta dal satellite Planck nel 2018. Le macchie i cui (falsi) colori variano dal rosso al blu rappresentano, rispettivamente, regioni più calde e più fredde di 2,7 K con ampiezza di fluttuazioni non superiori a $1,8 \times 10^{-3}$ K. La risoluzione angolare (ossia la minima distanza angolare rilevabile tra due punti sulla volta celeste) è pari a 5 minuti d'arco ($1/6$ del diametro lunare). c) Com'è noto, è impossibile riprodurre fedelmente su una superficie piana i dettagli presenti su una superficie sferica senza introdurre deformazioni. I cartografi hanno introdotto diversi tipi di proiezioni, ognuna con i suoi pregi e difetti, da adottare a seconda dell'utilizzo che se ne vuol fare. Le mappe presentate in questa figura sono state ottenute utilizzando la proiezione di Mollweide che conserva inalterate le aree e bene si adatta ad illustrare distribuzioni globali come nel caso della CMB. A titolo di esempio mostriamo la superficie terrestre ottenuta tramite questa proiezione.

Dopo queste operazioni la distribuzione della temperatura della CMB che appare sulla sfera celeste è quella illustrata in FIG. 7a. Essa presenta un'anisotropia⁷ dipolare che non è dovuta ad alcun

⁷ Per anisotropia si intende che la temperatura della CMB varia al variare della direzione lungo cui la si osserva.

fattore cosmologico, ma semplicemente al fatto che la Terra si muove a 368 km/s rispetto al riferimento CMB (ossia il riferimento in quiete rispetto alla CMB in cui la anisotropia dipolare è assente);⁸ pertanto la radiazione proveniente dalla metà della sfera celeste verso cui è diretta la Terra appare lievemente più calda e l'altra più fredda di una quantità massima pari a $\Delta T \sim 3 \times 10^{-3}$ K rispetto al valor medio 2,7 K, corrispondente ad una variazione percentuale $\Delta T/T \sim 10^{-3}$.

Se si opera un'ulteriore sottrazione al segnale rimuovendo l'anisotropia di dipolo, si ottiene finalmente la mappa "originale" della temperatura della CMB prodottasi al momento del disaccoppiamento. "Aguzzando gli occhi" opportunamente, utilizzando cioè strumenti estremamente sensibili, è possibile individuare, in una distribuzione altrimenti uniforme, fluttuazioni la cui ampiezza può giungere al massimo fino a $\Delta T \sim 2 \times 10^{-5}$ K e che danno alla mappa il tipico aspetto "leopardato" (FIG. 7b): ogni macchia è caratterizzata dalla sua estensione angolare θ sulla sfera celeste e da un colore che va dal rosso al blu⁹ indicante la sua variazione di temperatura ΔT (in più o in meno) rispetto a quella media. Queste fluttuazioni corrispondono a variazioni percentuali dell'ordine $\Delta T/T \sim 10^{-5}$. Riprendendo la metafora utilizzata in precedenza, dal momento che la profondità media dei nostri oceani è 4 km, osservare le disomogeneità della CMB equivale ad osservare da un aeroplano onde alte 4 cm! Questo dà un'idea di quali sfide tecnologiche gli astronomi abbiano dovuto affrontare nello studio della CMB.

Ma da cosa sono provocate queste fluttuazioni di temperatura? Abbiamo accennato in precedenza al fatto che l'inflazione ha dato origine a fluttuazioni della densità; ognuna di esse ha prodotto la formazione di onde sonore sferiche che, espandendosi e sovrapponendosi tra loro, interferirono formando un complicato intreccio di regioni di densità oscillanti con un'ampiezza percentuale $\Delta \rho/\rho \sim 10^{-5}$. La situazione era analoga a quello che accade se gettiamo contemporaneamente un certo numero di sassolini di diversa dimensione in uno stagno; ognuno di essi produrrà una serie di onde circolari la cui lunghezza d'onda dipende dalla dimensione del sasso e che andranno ad interferire con quelle generate dagli altri sassi. La superficie dello stagno non sarà più liscia ma presenterà un groviglio di "rugosità" oscillanti su e giù in ogni punto rispetto al livello imperturbato (FIG. 8). Per quanto possa sembrare impossibile, esistono tecniche matematiche che permettono di dipanare il groviglio risalendo alle lunghezze d'onda iniziali (e alla dimensione dei

⁸ Contrariamente a quanto affermato in molti testi, l'anisotropia di dipolo non è dovuta all'effetto Doppler tipico dei fenomeni ondulatori quali il suono e la radiazione. Altri fattori contribuiscono a questa anisotropia, come l'aberrazione, che però ci limitiamo a citare senza discuterla ulteriormente.

⁹ Il colore è un artefatto grafico utile per vedere la distribuzione delle anisotropie sulla sfera celeste. In realtà le microonde che compongono la radiazione di fondo sono invisibili ai nostri occhi.



FIG. 8. Increspature della superficie dell'acqua dovute a perturbazioni innescate dal lancio di sassolini. Le perturbazioni producono onde che si sovrappongono tra loro producendo una "ragnatela" di punti oscillanti.

sassi). Come accenneremo nel livello avanzato, i cosmologi adottano queste tecniche per estrarre informazioni dalle anisotropie della CMB.

Le fluttuazioni di materia hanno prodotto fluttuazioni simili nella temperatura. Infatti, regioni di maggior compressione presentavano una radiazione con temperatura più alta a causa della maggiore densità di fotoni, mentre l'opposto accadeva nelle regioni dove il plasma era più rarefatto. Al momento del disaccoppiamento la radiazione si è "svincolata" dal gas ma ha mantenuto, nelle sue disomogeneità, le "impronte" delle disomogeneità della materia che le ha generate. Prive ormai della pressione dovuta ai fotoni, le regioni più dense hanno poi agito – mediante la loro maggiore attrazione gravitazionale e di concerto con la materia oscura (si veda il livello avanzato) – come "semi" da cui sono nate, per accrescimento del gas circostante, le galassie la cui attuale distribuzione spaziale dipende, pertanto, dalla distribuzione della materia al disaccoppiamento.

Analizzando le varie macchie nella FIG. 7b i cosmologi hanno rilevato che le fluttuazioni sono particolarmente pronunciate in corrispondenza a chiazze di determinate dimensioni. Il collegamento tra l'ampiezza ΔT delle fluttuazioni e le dimensioni angolari delle macchie correlate cambia al variare dei dettagli dei processi fisici i quali sono controllati dai parametri cosmologici fondamentali (p.e. H_0 , $\Omega_{s,0}$, $\Omega_{b,0}$, $\Omega_{\Lambda,0}$). Variando il valore di questi parametri all'interno di modelli cosmologici eseguiti al computer è possibile "sintonizzare" questi ultimi in maniera da riprodurre il "giusto" valore di ΔT in corrispondenza a macchie dalle "giuste" dimensioni. Si ottengono così i valori dei parametri cosmologici con un alto grado di precisione. L'argomento è vasto e complesso e non può certamente essere trattato dettagliatamente in questa sede. Tuttavia, nel livello avanzato proveremo a descrivere per sommi capi alcuni degli argomenti utilizzati dai cosmologi per estrarre informazioni sull'universo primevo dalla mappa leopardata di FIG. 7b.

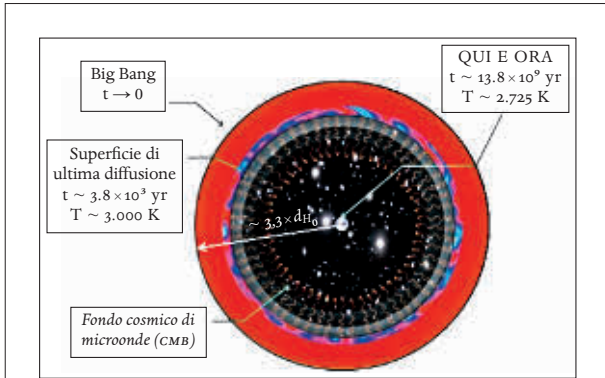


FIG. 9. Rappresentazione spaziale dell'universo osservabile simile alla FIG. 2, ma che rappresenta anche un diagramma temporale in quanto evidenzia come porzioni di universo sempre più distanti ci appaiono sempre più giovani. L'universo attualmente osservabile è delimitato da una superficie sferica con un raggio di circa $3,3 \times d_{H_0} = 46 \times 10^9$ anni luce (si veda la nota 14 per la differenza tra raggio dell'universo osservabile e d_{H_0}). L'"anello" rosso rappresenta l'universo giovane estremamente caldo in cui la materia era composta da particelle elementari. Espandendosi e raffreddandosi le particelle si sono potute aggregare in protoni e neutroni formando una miscela di gas barionico e fotoni illustrata da un anello interno più sottile e più freddo che contiene "macchie" rosse e blu rappresentanti le stesse macchie (viste dalla Terra) mostrate in FIG. 7, ossia le anisotropie di temperatura. La superficie interna dell'anello raffigura la superficie di ultima diffusione dove avviene il disaccoppiamento. Dopo il disaccoppiamento la materia si "raggruma" in galassie, creando così ampi spazi vuoti attraverso cui si propagano i fotoni emessi dalla superficie di ultima diffusione che formano la CMB che ci giunge da ogni direzione.

Supponiamo di osservare volumi di universo sempre più distanti. Le galassie che vediamo sono sempre più giovani¹⁰ perché la luce che riceviamo ora è stata emessa in un tempo precedente, il tempo necessario perché essa possa raggiungerci. Potremmo allora sperare che spingendo il nostro sguardo ancora più il là – a ridosso del nostro orizzonte, quando le galassie non si erano ancora formate – sia possibile osservare il Big Bang vero e proprio. Questa speranza, tuttavia, è destinata ad essere frustrata per diversi motivi. Il motivo che qui ci interessa è dato dal fatto che, quando arriviamo ad una distanza alla quale l'universo ci appare al momento del disaccoppiamento (all'età di 380.000 anni), esso è composto dal plasma di cui abbiamo parlato nel livello base. Questo plasma è opaco e ci impedisce di osservare oltre (FIG. 9), proprio come il plasma che compone l'atmosfera solare ci impedisce di vedere il centro del Sole. E così come il bor-

¹⁰ Nel corso della loro esistenza le galassie possono variare la loro morfologia e inoltre cambiano di colore. Le stelle che le compongono, infatti, evolvono in maniera per certi versi simile all'uomo. Esse nascono e muoiono e, proprio come accade alla maggioranza degli uomini che in vecchiaia tendono alla pinguetudine e a virare in bianco il colore dei capelli, le stelle mutano aumentando le loro dimensioni (il Sole ingloberà l'orbita terrestre tra circa 4,5 miliardi di anni) assumendo un colore rosso, e vengono indicate appunto come *giganti rosse* in questa fase evolutiva.

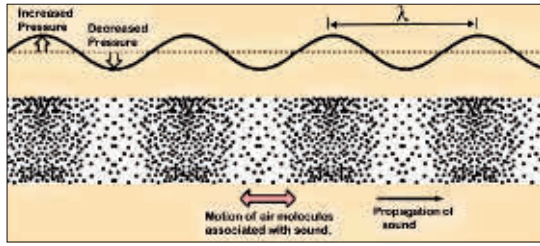


FIG. 10. Un oggetto in vibrazione produce un'onda sonora, ossia un'alternanza di rarefazioni e condensazioni (a cui sono associate, rispettivamente, depressioni e compressioni) dell'aria che si propagano inducendo solo piccole oscillazioni nella posizione delle singole molecole. In questa figura l'andamento della pressione (e densità) è raffigurabile da una sinusoide di determinata ampiezza (valore massimo dell'oscillazione) e lunghezza d'onda λ (distanza tra due massimi).

do del Sole può essere definito come la superficie oltre la quale i fotoni smettono di interagire con il plasma e si allontanano liberamente, analogamente possiamo designare come superficie di ultima diffusione una superficie sferica, centrata sulla Terra, da cui i fotoni si allontanano svincolandosi dal gas al momento del disaccoppiamento e formando la CMB che osserviamo (FIG. 9). Come nell'analogia dello stagno descritta nel livello base, questa superficie presenta rugosità dovute all'interferenza delle onde sonore che si propagano nel plasma. In ogni punto la densità oscilla da un valore più alto ad uno più basso della media inducendo nella temperatura un andamento analogo. Al disaccoppiamento la radiazione emessa reca impresse variazioni di temperatura dovute a tali oscillazioni sonore. Esse rappresentano un'“istantanea” della superficie di ultima diffusione, come la FIG. 8 è un'istantanea della superficie dello stagno ad un dato tempo.

Per capire meglio il meccanismo di queste oscillazioni e quali informazioni è possibile estrarne è necessario abbandonare momentaneamente la cosmologia per dedicarci assai brevemente ad alcune proprietà del suono. Benché di primo acchito questa digressione possa apparire stravagante, vedremo tra breve che non lo è affatto.

Un diapason in vibrazione emette un suono puro, ossia l'onda sonora è descrivibile da un'unica sinusoide con una ben precisa lunghezza d'onda λ e frequenza $\nu = v/\lambda$, dove v è la velocità di propagazione del suono (FIG. 10). Al contrario, una corda (ad esempio, di chitarra) di lunghezza L , tesa e bloccata alle estremità, può supportare più oscillazioni sinusoidali stazionarie¹¹ purché la loro semilunghezza d'onda $\lambda/2$ sia un sotto-

¹¹ Un'onda stazionaria non si propaga ma rimane sempre nella stessa zona di spazio oscillando in su e in giù tra due estremità fisse (in questo caso, tra le due estremità della corda).

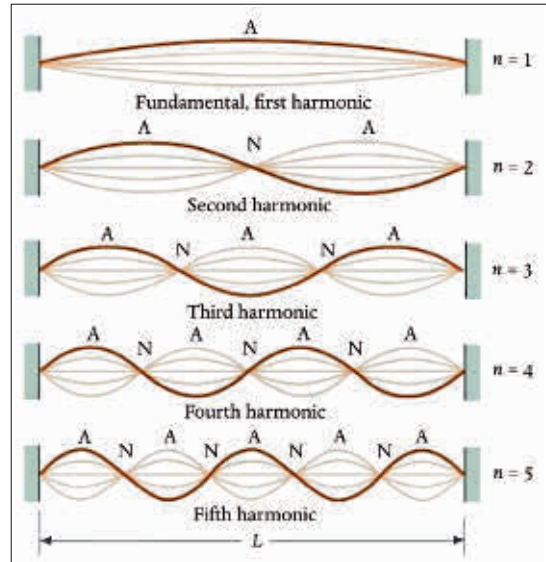


FIG. 11. Una corda di lunghezza L fissata alle estremità può supportare diverse oscillazioni stazionarie. In figura sono rappresentate l'armonica fondamentale ($n = 1$) e le successive quattro armoniche corrispondenti, rispettivamente, a $n = 2$, $n = 3$, $n = 4$ e $n = 5$. Le varie armoniche non si propagano ma oscillano in su e in giù. La lunghezza d'onda della n -esima armonica è $\lambda_n = \lambda_1/n$, dove $\lambda_1 = 2L$. La frequenza della n -esima armonica è $\nu_n = n\nu_1$, con $\nu_1 \propto 1/\lambda_1$ (vedi testo). Il tempo impiegato da un'oscillazione per passare da un massimo (ventre) a un minimo (gola) per poi tornare al massimo è detto periodo di oscillazione ed è l'inverso della frequenza: $T_n = 1/\nu_n$. I punti indicati con N sono detti nodi e non oscillano, mentre i punti indicati con A indicano il massimo dell'oscillazione.

multiplo di L : $n \lambda/2 = L$, da cui $\lambda = 2L/n$, dove n è un qualunque numero naturale (FIG. 11). L'oscillazione corrispondente ad $n = 1$ è detta armonica fondamentale, mentre quella caratterizzata dal numero n è l'armonica n -esima. Ad ogni armonica è possibile associare una frequenza $\nu_n = v/\lambda_n = n v/2L$.

Supponiamo ora di “pizzicare” una corda di chitarra ed una di violino in modo da emettere in entrambi i casi la stessa nota. Dal momento che, in linea di principio, la frequenza è la stessa, non dovremmo essere in grado di percepire la differenza tra i due strumenti, mentre invece sappiamo distinguerli facilmente. La spiegazione risiede nel fatto che pizzicando una corda non eccitiamo solo l'armonica fondamentale ma anche alcune secondarie (FIGG. 12a, 12b) che sono diverse nei due strumenti (FIG. 12c). Le vibrazioni effettive sono date dalla somma di tutte le armoniche e la nota finale risulta dunque avere una tonalità diversa nei due casi, permettendoci di riconoscere quale strumento sta suonando. Pertanto, come spiegato in dettaglio in FIG. 12, un'oscillazione stazionaria può essere rappresentata non solo dal suo andamento temporale ma anche dal suo spettro di potenza, ossia un grafico in cui le frequenze sono

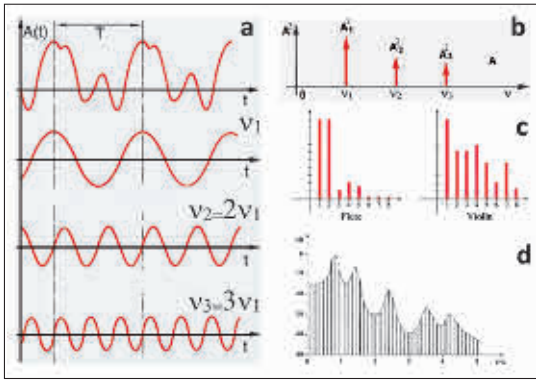


FIG. 12. a) Un elemento d'aria investito da un'onda sonora subisce nel tempo una successione periodica di compressioni e rarefazioni. In alto è appunto rappresentata un'oscillazione periodica di ampiezza A e periodo T in funzione del tempo. Il profilo dell'onda è complesso in quanto è formato dalla somma delle prime tre armoniche di opportuna ampiezza A_n e frequenza ν_n (con n pari, rispettivamente, a 1, 2 e 3). L'onda finale è dominata dalla periodicità della prima armonica ma, essendo effettivamente composta da tre armoniche, essa contiene tre frequenze. Questo suggerisce una rappresentazione grafica alternativa al grafico temporale e che viene data nel pannello successivo. b) Questo diverso grafico è detto *spettro di potenza* e si ottiene mettendo in ascissa le frequenze invece del tempo, mentre in ordinata è rappresentata l'intensità del suono legata al quadrato dell'ampiezza. Questo pannello illustra lo spettro della curva rappresentata nel pannello precedente; l'altezza delle frecce indica l'intensità delle singole armoniche. c) Spettro di due strumenti che emettono la stessa nota. d) Lo spettro della voce umana è assai complesso (soprattutto in corrispondenza delle consonanti) ed è dato sostanzialmente dall'inviluppo (linea tratteggiata) delle estremità delle linee verticali presenti. I picchi di questo involuppo caratterizzano lo spettro che è diverso da individuo a individuo, e questo permette di riconoscere la voce di persone diverse.

poste in ascissa e le intensità (date, com'è noto, dal quadrato delle ampiezze) in ordinata. Lo spettro è una sorta di "impronta digitale" del suono prodotto.

Finalmente, possiamo ora tornare alla CMB e collegare tra loro i concetti esposti finora. Consideriamo l'universo al termine dell'inflazione. Quest'ultima è stata talmente veloce da creare fluttuazioni di densità di varie dimensioni sostanzialmente tutte allo stesso istante. Le fluttuazioni della materia oscura collasarono alquanto rapidamente formando strutture di diverse grandezze (a seconda dell'estensione della fluttuazione iniziale) giacché, in assenza di interazioni con sé stessa e con i fotoni, questa materia non possedeva una pressione in grado di contrastare la propria autogravità. Il plasma barionico circostante tendeva a cadere verso queste strutture concentrandosi e aumentando la propria densità e la propria temperatura. Tale aumento, tuttavia, produceva un incremento della pressione (dovuta sostanzialmente all'aumento di densità dei fotoni

"intrappolati" nel plasma) che bloccava la contrazione e provocava un'espansione e un raffreddamento che procedevano fin quando la gravità prevaleva nuovamente. Questa successione di espansioni e contrazioni generò vere e proprie oscillazioni acustiche di varia frequenza (e lunghezza d'onda) tutte "sincronizzate" tra loro perché, come s'è detto, erano state tutte "innescate" contemporaneamente.

L'orizzonte che circonda un determinato punto si espanse inglobando oscillazioni con lunghezza d'onda sempre maggiore fino al momento del disaccoppiamento, quando l'orizzonte raggiunse un diametro di circa $L \sim 8 \times 10^5$ anni luce. Le fluttuazioni non si sono sviluppate su scale maggiori di L perché il plasma non ha avuto il tempo di oscillare nemmeno per mezza lunghezza d'onda prima del disaccoppiamento: infatti, la buca di potenziale dell'alone di materia oscura in cui dovrebbe oscillare è troppo vasta.¹² L'onda con la massima lunghezza possibile $\lambda \sim 2L$ ($n = 1$ in FIG. 11) ha invece avuto il tempo di compiere mezza oscillazione e il plasma si trova pertanto al disaccoppiamento nella fase di massima compressione nella buca di potenziale dando luogo al massimo valore di $\Delta T/T$. Ma non tutti gli orizzonti – che possiamo immaginare idealmente come cerchi sulla superficie di ultima diffusione – contengono buche di potenziale così estese. Buche più ridotte hanno dato luogo a frequenze di oscillazione maggiori (giacché $\nu \propto 1/\lambda$). In particolare, fluttuazioni con dimensioni $\sim L$ hanno avuto il tempo di compiere un'oscillazione completa e il plasma si trova quindi al disaccoppiamento in fase di massima rarefazione nelle buche di potenziale. Il "set" completo di fluttuazioni che hanno compiuto un numero intero di mezze oscillazioni al momento del disaccoppiamento rappresenta una serie di armoniche di lunghezze d'onda pari a $1/2, 1/3, 1/4 \dots$ (e frequenze pari a 2, 3, 4...) dell'armonica fondamentale con $\lambda \sim 2L$. Le armoniche di ordine dispari corrispondono a fasi di massima compressione e quelle pari a fasi di massima rarefazione. Le armoniche, raggiungendo le massime ampiezze, danno origine in FIG. 7b alle macchie più intense (quelle con i ΔT più pronunciati). Le macchie dovute all' n -esima armonica hanno più o meno una dimensione pari a $1/n$ della dimensione ($\sim L$) della macchia generata dall'armonica principale. In generale, macchie di uguali dimensioni presentano lo stesso ΔT .

Ma oltre alle armoniche sono comunque presenti oscillazioni di tutte le frequenze, come ad esempio

¹² Queste conclusioni possono essere giustificate anche da un altro punto di vista. Onde di semilunghezza maggiore di L "sporgerebbero" al di là dell'orizzonte e la parte esterna non avrebbe alcun contatto causale con quella interna, una situazione chiaramente non fisica.

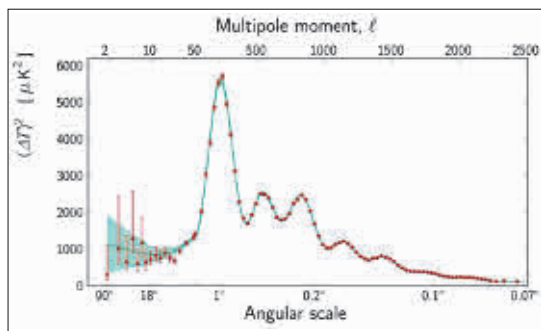


FIG. 13. Spettro di potenza della CMB ottenuto tramite il satellite Planck. I punti rossi rappresentano i dati osservativi con le relative barre di errore. La curva nera è ottenuta dal miglior modello cosmologico realizzato al computer tenendo conto degli svariati fenomeni fisici coinvolti e della “giusta” sintonizzazione dei valori dei parametri cosmologici quali H_0 , $\Omega_{s,0}$, $\Omega_{b,0}$, $\Omega_{\Lambda,0}$ ed altri. Il secondo e il terzo picco sono posizionati a frequenze ℓ doppia e tripla rispetto a quella del primo picco perché derivano dalla seconda e terza armonica (si veda il testo). Le ascisse sono in scala logaritmica.

quelle colte a metà strada tra il minimo e il massimo al momento del disaccoppiamento (dotate di frequenze pari a $3/2$, $5/2$, $7/2$... di quella fondamentale) che corrispondono ai valori medi di densità e temperatura.

Ricapitolando, la superficie di ultima diffusione appare come un mosaico derivato dalla sovrapposizione di macchie di varie dimensioni e colori (valori di ΔT) dovute alle fluttuazioni “fotografate” al momento del disaccoppiamento (FIG. 7b); tale viluppo ricorda la ragnatela di increspature dell’analogia dello stagno (FIG. 8). Tuttavia, così come è possibile scomporre nelle sue armoniche un suono complesso tramite il suo spettro, analogamente è possibile isolare il contributo di fluttuazioni di differenti dimensioni. Graficando l’intensità media¹³ delle fluttuazioni $(\Delta T)^2$ in funzione della dimensione angolare θ della macchia associata, ovvero di una “frequenza”¹⁴ $\ell \sim (180^\circ)/\theta$, otterremo lo spettro di potenza della CMB (FIG. 13) e avremo un’idea di quanto erano intense le onde acustiche di una determinata lunghezza d’onda nell’universo al momento del disaccoppiamento.

Lo spettro della CMB presenta una serie di picchi che, per quanto detto più sopra, sono dovuti all’armonica principale e a quelle successive. Tale spettro non è dissimile da uno spettro sonoro

¹³ In analogia allo spettro di potenza sonoro in cui compare in ascissa l’intensità, ossia il quadrato dell’ampiezza di oscillazione, nello spettro di potenza della CMB compare $(\Delta T)^2$ anziché ΔT .

¹⁴ In effetti, similmente al caso di un’onda in cui la frequenza è inversamente proporzionale alle sue dimensioni lineari ($\nu \propto 1/\lambda$), nel caso di dimensioni angolari abbiamo $\ell \propto 1/\theta$. La variabile ℓ compare a seguito dell’utilizzo della complessa matematica necessaria per “scomporre” (nel caso della geometria sferica dovuta alla volta celeste) le anisotropie della CMB nelle varie componenti che ne costituiscono lo spettro.

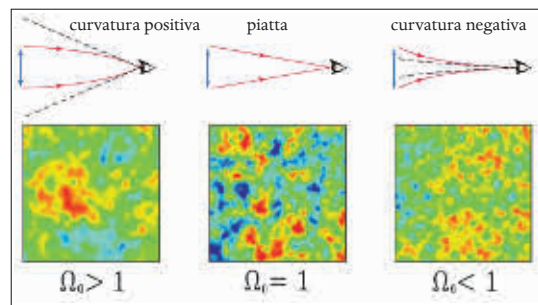


FIG. 14. Influenza della geometria dell’universo sulle dimensioni apparenti delle “macchie” osservate della CMB. La doppia freccia blu indica le dimensioni reali di una macchia. Le frecce rosse illustrano la traiettoria, curvata a seconda della geometria, dei raggi luminosi provenienti dalla macchia (cfr. FIG. 4). Le linee rosse tratteggiate indicano la dimensione angolare della macchia nelle diverse geometrie.

(FIG. 12d). E così come la posizione e l’altezza dei picchi nello spettro sonoro ci permettono di individuare lo strumento o la persona che ha emesso il suono, analogamente i picchi nello spettro della CMB ci permettono di capire in che tipo di universo viviamo.

Analizzare in dettaglio l’intero spettro della CMB per estrarne la messe di dati in esso contenuti va decisamente al di là delle possibilità di queste pagine. Tuttavia, a scopo esemplificativo, descriviamo come il picco principale ci fornisce i valori di Ω_0 e Ω_b . Abbiamo visto che questo picco deriva da regioni con dimensioni lineari dell’ordine del diametro dell’orizzonte al momento del disaccoppiamento, ossia $L \sim 8 \times 10^5$ anni luce. Dal momento che da allora l’universo si è espanso di un fattore ~ 1000 , anche queste regioni hanno subito una pari dilatazione e pertanto al giorno d’oggi abbiamo $L \sim 8 \times 10^8$ anni luce. D’altra parte il raggio dell’universo osservabile è stimato essere $R_{os} \sim 46 \times 10^9$ anni luce.¹⁵ Pertanto, in un universo piatto, le macchie associate al primo picco presentano un’estensione angolare $\theta_L \sim L/R_{os} \sim 1^\circ$ (il doppio del diametro lunare); la stessa macchia apparirebbe sotto un angolo maggiore o minore in uno spazio, rispettivamente, chiuso o aperto (FIG. 14). Effettivamente la FIG. 13 mostra che il picco osservato è posizionato a $\theta = 1^\circ$ confermando che $\Omega_0 = 1$, mentre la FIG. 15 illustra come, riducendo il valore di Ω_0 nelle simulazioni al computer, il picco si sposta a valori maggiori di ℓ (ossia valori minori di θ).

¹⁵ In caso di universo statico la superficie di ultima diffusione sarebbe effettivamente ad una distanza di circa 14×10^9 anni luce, lo spazio percorso durante la vita dell’universo dai fotoni emessi al disaccoppiamento. Tuttavia, dal momento che l’universo ha continuato ad espandersi da quando questi fotoni sono stati emessi, la distanza tra la Terra e il bordo dell’universo osservabile è di circa 46 miliardi di anni luce.

Per quanto riguarda il valore di Ω_b , esso è collegato all'altezza del picco. In precedenza abbiamo detto che il plasma, attratto da una concentrazione di materia oscura, si addensa incrementando la sua temperatura. In verità il plasma risente anche della propria autogravità, pertanto una maggiore quantità di materia barionica implica un maggiore addensamento e un maggior valore dell'incremento ΔT ; l'altezza del picco aumenta dunque (anche) in conseguenza del maggior valore di Ω_b (FIG. 15).¹⁶

Dopo il disaccoppiamento il gas neutro, ormai privo della pressione dei fotoni, ha avuto modo di legarsi gravitazionalmente alle strutture di materia oscura formando galassie. La distribuzione spaziale di queste ultime su larga scala è conseguenza della propagazione e dell'interferenza delle onde primordiali prima del disaccoppiamento.

¹⁶ La procedura descritta è alquanto semplificata. Il procedimento esatto, tuttavia, va al di là degli scopi di questa nota.

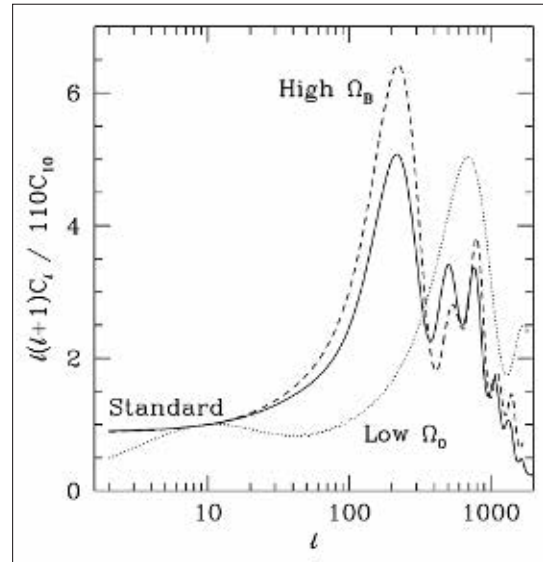


FIG. 15. Esempio dell'influenza del valore dei parametri sul profilo dello spettro di potenza della CMB. La linea continua è una replica di quella mostrata in FIG. 13. A scopo dimostrativo, in questa figura viene illustrato soltanto l'effetto della variazione di Ω_0 e Ω_b . Un raddoppio di Ω_b aumenta il primo picco (linea tratteggiata), mentre una diminuzione di Ω_0 ne sposta la posizione (linea punteggiata) verso θ minori.

Annibale D'Ercole si è laureato in Fisica all'Università di Roma "La Sapienza". Astronomo associato presso l'INAF-Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS), si occupa di simulazioni numeriche di idrodinamica, applicate alle nebulose e al gas interstellare delle galassie. È autore di numerosi articoli divulgativi pubblicati presso questa e altre riviste.