

## Inflazione: due indizi fanno (forse) una prova

Annibale D'Ercole

COM'È noto, si ritiene che l'universo si sia originato da una grande esplosione cosmica detta Big Bang. La teoria del Big Bang ha il merito di riuscire a rendere conto, in modo naturale, di alcuni fatti osservativi, quali l'espansione dell'universo e la presenza della radiazione cosmica di fondo (scoperta da Penzias e Wilson nel 1964) interpretata come il residuo del bagliore associato all'esplosione iniziale. Tuttavia, nonostante questi (ed altri) indubbi, straordinari successi, la teoria standard del Big Bang non è in grado di spiegare altre caratteristiche dell'universo che pure si evincono dalle osservazioni. Due di queste caratteristiche sono: 1) omogeneità della distribuzione media della materia e della radiazione di fondo; 2) valore della densità media dell'universo pari ad un ben preciso valore critico. Vediamo in dettaglio questi due punti:

1. *Uniformità della radiazione di fondo* – Nel 1992 il satellite COBE, operante misure radiometriche, ha mostrato che la radiazione di fondo è estremamente isotropa, ovvero mostra sostanzialmente sempre la stessa intensità (con variazioni minori di una parte su 100.000) qualunque sia la direzione del cielo in cui si osserva. Questo significa che la materia che ha emesso la radiazione è sostanzialmente tutta alla stessa temperatura e si pone allora un importante problema. Due corpi inizialmente a diversa temperatura tenderanno ad acquistare una temperatura intermedia comune ad entrambi solo se potranno entrare in contatto. Si considerino ora due fotoni della radiazione cosmica emessi ai confini dell'universo osservabile che ci raggiungono da direzioni opposte della sfera

celeste. Le regioni di provenienza dei due fotoni non hanno mai comunicato in passato giacché i loro fotoni si stanno “incontrando” solo ora; poiché nessun segnale fisico può propagarsi più velocemente della luce, queste regioni non hanno ancora avuto il tempo di livellare i valori di densità e temperatura, e non c'è dunque motivo per cui debbano mostrare radiazione di stessa intensità, a meno che inizialmente tutte le porzioni di universo – anche quelle che “non si sono mai viste” – esibiscano “casualmente” gli stessi valori di densità e temperatura.

2. *Densità critica* – il Big Bang provoca l'espansione dello spazio e della materia in esso contenuta. D'altra parte le varie galassie – che possiamo immaginare, sia pure in modo ingenuo, come “schegge” dell'esplosione iniziale – si attraggono reciprocamente e quest'azione gravitazionale agisce da freno all'espansione cosmologica perché le galassie tendono a ricadere l'una sull'altra. L'evoluzione temporale dell'universo risulta allora determinata da un valore particolare della densità media della materia, detto “densità critica”. Se la densità è superiore alla densità critica, la gravità infine prevale e l'universo è destinato a “chiudersi” collassando su se stesso. In caso contrario, l'espansione persevererà a tempo indefinito. È possibile mostrare che, se nei primissimi istanti di vita l'universo avesse avuto una densità superiore a quella critica anche solo di una parte su  $10^{60}$  (1000...00; 1 seguito da 60 zeri!), la gravità avrebbe rapidamente prevalso e l'universo si sarebbe richiuso in pochi anni e non avrebbe potuto sopravvivere per 13,7 miliardi di anni, come invece sappiamo. Se d'altra parte la densità fosse stata inferiore a quella critica per una parte su  $10^{60}$ , l'universo si sarebbe espanso così rapidamente da apparire sostanzialmente vuoto e il gas iniziale non avrebbe fatto in tempo a “raggrumarsi” in galassie, stelle e pianeti. Per ottenere un universo quale noi lo conosciamo è dunque necessario che la sua densità sia proprio quella critica. Questa evenienza non ha spiegazione nel modello standard di Big Bang, e viene vista come una singolare “casualità”.

Benché nulla vieti che coincidenze possano effettivamente verificarsi, i fisici sono sempre diffidenti nei loro riguardi, specialmente se le coincidenze sono due. Nel 1981, Alan Guth ha proposto una modi-

\* 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», [www.bo.astro.it/sait/giornale.html](http://www.bo.astro.it/sait/giornale.html).

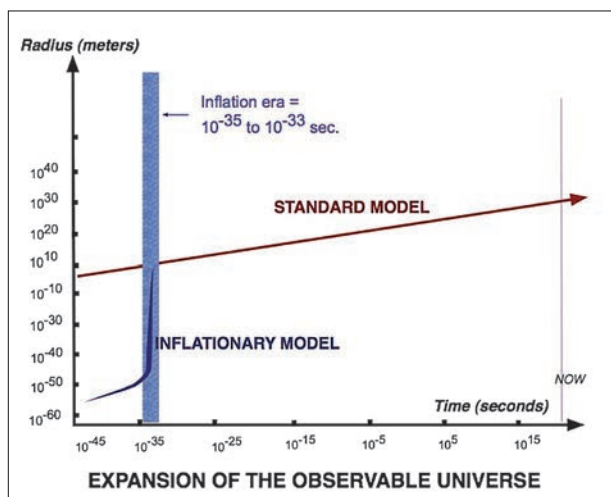


FIG. 1. La linea rossa indica l'andamento temporale dell'espansione dell'universo secondo il Big Bang classico. La linea blu mostra l'andamento secondo il modello inflazionario: l'espansione è assai più rapida nel periodo compreso tra  $10^{-35}$  e  $10^{-33}$  secondi e successivamente si stabilizza sui valori standard. Si noti come, secondo tale modello, l'universo attualmente osservabile avesse originariamente una dimensione assai minore di quella prevista dal Big Bang classico.

fica allo scenario del Big Bang classico, ipotizzando che l'universo abbia sperimentato un'espansione accelerata nel brevissimo periodo che intercorre fra  $10^{-35}$  (0,00...1; con 34 zeri dopo la virgola!) e  $10^{-32}$  secondi dopo l'esplosione. In questo intervallo l'universo si è dilatato, esponenzialmente raddoppiando le sue dimensioni ogni  $10^{-35}$  secondi circa e arrivando a crescere fino a  $10^{50}$  volte: per questo motivo questa fase viene detta "inflazione". Esaurita la fase inflazionaria, l'universo ha continuato ad espandersi al tasso assai meno frenetico previsto dal Big Bang standard (FIG. 1). L'ipotesi di Guth risolve le perplessità legate al Big Bang standard e mostra che le coincidenze, in effetti, non sono tali, ma "devono" verificarsi.

1. *Soluzione al problema dell'uniformità della radiazione cosmica* – L'eccezionale velocità di espansione durante l'inflazione ha fatto sì che tutta la porzione di universo oggi osservabile abbia raggiunto le dimensioni attuali a partire da un volume assai minore rispetto a quello previsto dal Big Bang standard. Questo ha permesso alla luce (e alle informazioni fisiche) di attraversare interamente questo volume prima dell'"innesco" dell'inflazione, omogeneizzando così i valori della densità cosmica e dell'intensità della radiazione di fondo. L'inflazione ha poi trascinato regioni diverse di questo volume a distanze tali da "farle perdere di vista" giacché la loro velocità di allontanamento è arrivata ad essere superiore a quella della luce. Quest'ultima affermazione può sembrare in contraddizione con l'enunciato della teoria della relatività riguardo all'insuperabilità della velocità della luce, ma, in effetti, non è così. Assimiliamo lo spazio cosmico in espansione alla superficie di un palloncino che viene gonfiato, e segniamo con una penna due punti sulla superficie di quest'ultimo; questi due punti sono chiaramente fermi rispetto alla superficie, pur

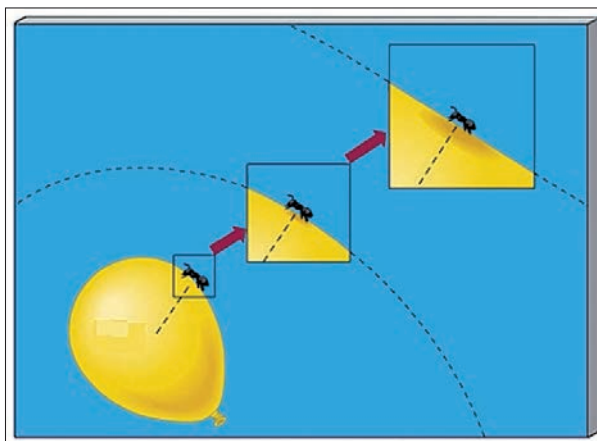


FIG. 2. Una limitata porzione della superficie di un palloncino appare sempre più piatta man mano che quest'ultimo si gonfia. Analogamente, la porzione osservabile dello spazio cosmico appare sempre più piatta man mano che l'universo si espande. Questo effetto è enormemente amplificato durante l'inflazione.

allontanandosi tra loro a causa dell'espansione del palloncino. La relatività vieta agli oggetti di superare la velocità della luce nel loro moto attraverso lo spazio, ma non pone limiti alla loro velocità di recessione dovuta all'espansione dello spazio stesso. Pertanto, tornando all'inflazione, regioni dello spazio osservabile che oggi non sono causalmente connesse lo sono state in passato, e questo spiega perché l'universo osservabile appare omogeneo.

2. *Soluzione al problema della densità critica* – Secondo la relatività generale, un qualunque corpo, ad esempio una stella, genera effetti gravitazionali curvando lo spazio attorno a sé. Un'ipotetica cometa passante nei pressi della stella non risente di alcuna forza e continua a muoversi liberamente; tuttavia, attraversando uno spazio curvo, essa deflette dalla sua traiettoria rettilinea come succede a una pallina da ping-pong che, rotolando su una superficie di gommapiuma, passi vicino ad un avvallamento. Pertanto, la materia nell'universo, considerata nella sua totalità, è in grado di determinare una curvatura dello spazio cosmico complessivo. Assimilando nuovamente quest'ultimo alla superficie di un palloncino che si gonfia, vediamo (FIG. 2) che, man mano che il volume aumenta, lo spazio diventa sempre meno curvo, fino al punto che regioni limitate circostanti un ipotetico osservatore appaiono praticamente piatte all'osservatore stesso (per molti secoli, ad esempio, la maggior parte dell'umanità ha creduto di vivere su una Terra piatta). È dunque del tutto naturale che, a seguito dell'enorme espansione inflazionaria, la regione di universo accessibile alle nostre osservazioni appaia piatta e che, di conseguenza, la densità dell'universo abbia proprio il valore critico. Infatti, secondo la relatività, densità superiori porterebbero a uno spazio curvo "chiuso" (come la superficie di una sfera), destinato prima o poi a collassare su se stesso, mentre densità inferiori porterebbero ad uno spazio curvo "aperto" (come la superficie di una sella infinitamente estesa) in perenne espansione (FIG. 3).

Il meccanismo per cui l'universo "decide" di espandersi esponenzialmente durante un determinato in-

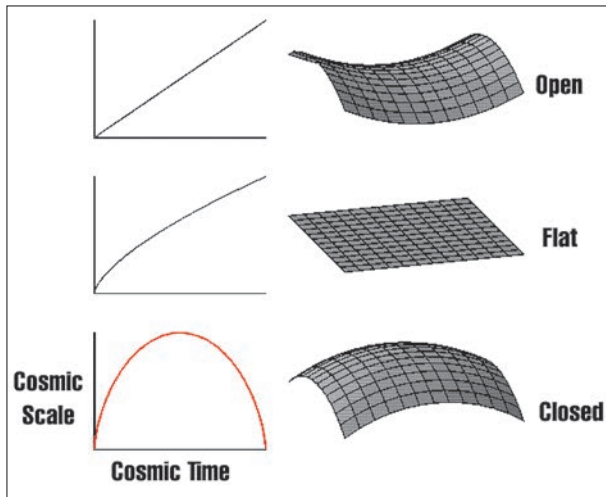


FIG. 3. I diagrammi sulla sinistra indicano l'andamento temporale delle dimensioni dell'universo a seconda del valore della densità cosmica. Per valori inferiori a una determinata densità critica l'universo si espande per sempre, mentre per valori superiori è destinato a collassare su se stesso. Questo comportamento si riflette sulle proprietà geometriche dello spazio cosmico che, secondo la relatività, dipendono dall'ammontare della massa. Una densità cosmica inferiore a quella critica determina uno spazio aperto a curvatura negativa (analogo alla superficie di una sella), mentre l'opposto implica uno spazio chiuso a curvatura positiva (come quello di una superficie sferica). Una densità cosmica pari a quella critica origina uno spazio piatto in cui valgono le usuali leggi della geometria euclidea.

tervallo temporale risiede nelle proprietà quantistiche dello spazio che, contrariamente a quanto contemplato dalla fisica classica, non si limita ad essere un contenitore inerte di fenomeni fisici, ma è esso stesso protagonista attivo tramite fluttuazioni quantistiche che, in base al principio di indeterminazione, impediscono al vuoto di essere totalmente privo di energia (abbiamo accennato a questo problema nel numero scorso, e nei fascicoli del «Giornale di Astronomia» n. 2 del 2000 e n. 4 del 2004).

Terminiamo questa nota sottolineando che i dettagli dell'inflazione rimangono sconosciuti, e l'inflazione stessa rimane una speculazione in assenza di prove osservative certe. Tuttavia, molti cosmologi ritengono che i due indizi qui discussi (omogeneità dell'universo e piattezza dello spazio) rappresentino (quasi) una prova.<sup>1</sup>

*Non è naturalmente possibile fare riferimento in questa sede alle equazioni relativistiche che sottendono l'evoluzione cosmica né alle equazioni quantistiche che regolano il comportamento dello spazio vuoto il quale, contrariamente alla visione classica, in determinate condizioni (come quelle che si verificano all'inizio del Big Bang) ha un'influenza determinante sui fenomeni che vi si svolgono. È tuttavia didatticamente proficuo considerare un mo-*

<sup>1</sup> In verità, l'inflazione è in grado di spiegare anche altri fatti, quali l'assenza di monopoli magnetici e alcune caratteristiche della radiazione di fondo e delle strutture su larga scala.

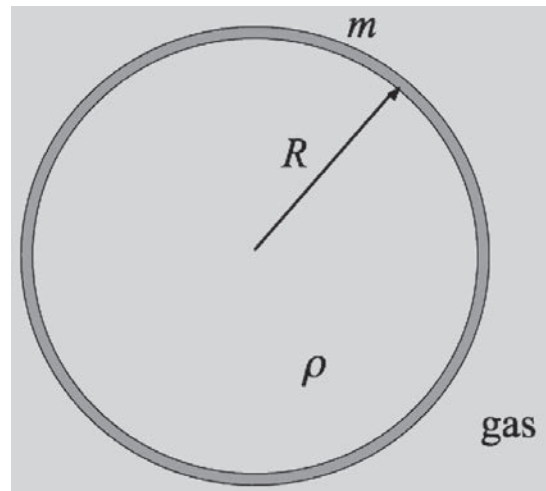


FIG. 4. Guscio sferico in espansione di un gas con densità uniforme.

dellino “giocattolo” che, sia pure nella sua rozzezza, coglie alcuni aspetti interessanti sia del Big Bang standard, che dell'inflazione. Consideriamo una visione semplificata dell'universo in cui la materia, distribuita con densità  $\rho$  uniforme su larga scala, si espanda in modo isotropo. Questo significa che ogni punto dell'universo è equivalente a qualunque altro, e può essere considerato “il centro”. Concentriamoci allora su una regione sferica di raggio  $R$  delimitata da un guscio di massa  $m$  che si va espandendo con velocità  $v$ , e dunque con energia cinetica  $K = 0,5m v^2$  (FIG. 4). Il guscio possiede anche un'energia di legame gravitazionale data dal potenziale  $U = -GMm/R$  generato dalla massa  $M = (4\pi/3) \rho R^3$  contenuta nel volume delimitato dal guscio. L'energia totale  $E_0$  del guscio è allora

$$\frac{1}{2} m v^2 - \frac{GMm}{R} = E_0. \quad (1)$$

Col procedere dell'espansione  $R$  aumenta e  $U$  diminuisce (in valore assoluto). Poiché l'energia totale  $E_0$  deve rimanere costante, anche  $K$  deve diminuire, implicando un continuo rallentamento dell'espansione. Se  $E_0$  è positiva vuol dire che l'energia cinetica è superiore al legame gravitazionale e il guscio, pur rallentando progressivamente, è in grado di espandersi per sempre. In caso contrario il richiamo gravitazionale avrà la meglio e il guscio rallenterà fino ad arrestarsi, per poi collassare verso il centro.<sup>2</sup> Ora, dalla teoria della relatività sappiamo che non è la materia ad espandersi, ma lo spazio in cui essa si trova.<sup>3</sup> Il segno di  $E_0$ , dunque, non de-

<sup>2</sup> Le osservazioni indicano che in realtà l'espansione cosmica sta accelerando (si veda questa stessa rubrica nel n. 2 del «Giornale di Astronomia» del 2000). Tuttavia questo aspetto è ininfluenza nel presente discorso e noi lo trascuriamo.

<sup>3</sup> Si considerino gli acini di uvetta (la materia) all'interno di un panettone (lo spazio) che stia lievitando. Benché fermi rispetto all'impasto, gli acini si allontanano reciprocamente a causa dell'espansione di quest'ultimo.

termina le proprietà dinamiche della materia, ma piuttosto quelle geometriche dello spazio cosmico su larga scala. Per  $E_0 > 0$  lo spazio ha una curvatura negativa (similmente, in due dimensioni, alla curvatura di una superficie a forma di sella); per  $E_0 < 0$  avrà una curvatura positiva (simile a quella di una superficie sferica), ed è destinato a richiudersi su sé stesso. Nel caso particolare in cui  $E_0 = 0$  lo spazio è piatto (come la superficie di un tavolo) e l'energia cinetica pareggia esattamente quella gravitazionale, impedendo all'universo di collassare e consentendogli un'espansione "al limite".

Dalle osservazioni sappiamo che vale la legge di Hubble, ovvero che le galassie appaiono allontanarsi da un osservatore con una velocità proporzionale alla loro distanza rispetto all'osservatore stesso:  $v = HR$ , dove  $H$  è detta costante di Hubble. Sostituendo allora questa espressione della velocità nell'eq. (1), e ponendo  $E_0 = 0$ , otteniamo

$$\frac{1}{2} H^2 R^2 = \frac{GM}{R}.$$

Una volta riscritta la massa in termini di densità e volume, si ottiene

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}.$$

Questa è l'espressione della densità nel caso  $E_0 = 0$ , ovvero la densità critica che discrimina gli universi chiusi da quelli aperti e che determina un universo piatto. A dispetto del suo nome,  $H$  varia nel tempo; poiché il tasso di espansione in passato era maggiore, a parità di distanza le galassie apparivano più veloci di oggi, e dunque il valore di  $H$  era maggiore. Il valore attuale, dedotto dai dati radio raccolti dal satellite *WMAP* fino al 2010, è pari a  $H_0 = 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$  e dunque la densità critica attuale vale  $\rho_c = 9,47 \cdot 10^{-30} \text{ g cm}^{-3}$  (a scopo comparativo, ricordiamo che la densità dell'aria a livello del mare è pari a  $1,28 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ ).

Riprendiamo ora l'eq. (1) formulando questa volta un'ipotesi puramente formale sul cui significato fisico per il momento non indugiamo: supponiamo che la densità rimanga costante durante l'espansione, invece di diminuire come l'inverso del volume. Nel caso in cui  $E_0 = 0$ , abbiamo:

$$v = \left( \frac{8\pi G \rho}{3} \right)^{1/2} R \quad (2)$$

L'eq. (2) indica che la velocità di espansione del guscio è proporzionale al suo raggio. Dunque, contra-

riamente al caso standard descritto dall'eq. (1), man mano che  $R$  aumenta, la velocità cresce sempre più inducendo un'espansione "frenetica" di tipo esponenziale. Quest'andamento è tipico della fase inflazionaria.

Questo risultato è stato ottenuto assumendo la costanza della densità durante l'espansione, un'ipotesi inaccettabile in fisica classica, in quanto implica un aumento della massa  $M$  all'interno del guscio, contrariamente alla legge di conservazione.<sup>4</sup> Tuttavia, a tale massa è associata un'energia  $Mc^2$  (dove  $c$  è la velocità della luce) ed è alla conservazione dell'energia che dobbiamo guardare. In effetti, l'aumento di  $M$  implica un aumento (in valore assoluto) di  $U$  che però è compensato dall'aumento di  $K$  dovuto all'accelerazione inflazionaria; di conseguenza l'energia totale  $E_0 = U + K$  è conservata. Poiché, come abbiamo visto nel livello base, l'inflazione (e l'esistenza stessa del nostro universo come noi l'osserviamo) implica uno spazio piatto, questo significa che ad ogni istante, e dunque anche al momento della nascita, l'energia totale  $E_0$  sia nulla.

Fin dai tempi di Democrito, Epicuro e Lucrezio si è ritenuto che «niente può essere creato dal nulla», un assunto riformulato più prosaicamente ai giorni nostri con il motto «non esiste un pasto gratis». Il Big Bang standard, in effetti, segue questo postulato assumendo che la materia (energia) sia presente fin dall'inizio. Se però l'ipotesi inflazionaria è corretta, qualunque cosa può essere creata dal nulla, e l'universo rappresenta un definitivo «pasto gratis».

<sup>4</sup> A causa del principio di indeterminazione, non è possibile che lo spazio sia vuoto, cioè che densità ed energia siano esattamente nulle; le fluttuazioni quantistiche producono particelle e antiparticelle dalla vita brevissima che tornano ad annichilirsi immediatamente. In condizioni particolari come quelle che si verificano nei primi istanti di vita dell'universo, l'energia associata a questo ribollire di particelle non si stabilizza al minor livello possibile, come ci si aspetta per il "vero vuoto", ma si attesta su livelli superiori, dando luogo a una condizione di "falso vuoto". Questa situazione può essere paragonata alla sopraffusione dell'acqua: in determinate condizioni è possibile abbassare la temperatura dell'acqua al disotto di 0 gradi centigradi senza che ghiacci; in questo caso l'acqua contiene più energia termica del "normale"; questa situazione è instabile ed è sufficiente una minima perturbazione perché l'acqua ghiacci "improvvisamente", rilasciando l'extra-energia rapidamente. Anche il falso vuoto è instabile e l'extra energia liberata decadendo nel vero vuoto produce la spinta inflazionistica, mantenendo la propria densità costante durante questa fase (ne abbiamo accennato nel numero scorso).