

UN UNIVERSO AL DI LA' DI OGNI IMMAGINAZIONE

di Antonio Feoli

Dipartimento di Ingegneria, Università del Sannio, Benevento, Italia.

La scienza moderna ha inizio con Galileo, nel momento in cui egli sostiene il metodo scientifico sperimentale, ma, d'altra parte, si rende conto che le chiavi per comprendere l'Universo sono la matematica e la geometria [1]: "La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'Universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto."

Per avere, però, una teoria soddisfacente sull'evoluzione dell'Universo si sono dovuti aspettare altri 300 anni. La cosmologia moderna, infatti, nasce quando la teoria della Relatività Generale di Einstein [2] consente di applicare la matematica e la geometria all'intero Universo. Ciò accadde nel 1917, quando Einstein pubblicò il suo primo articolo sull'argomento, a partire dalla semplice ipotesi che l'Universo debba apparire lo stesso per chiunque lo osservi, da qualunque posizione, e che la sua struttura su grande scala debba essere omogenea ed isotropa. Egli suppose, quindi, che la densità d'energia ρ dell'universo debba essere (in prima approssimazione) un fluido perfetto, "spalmato" uniformemente in ogni parte del cosmo.

In quel fondamentale articolo [3], Einstein scrisse: "Se assumiamo che l'universo sia spazialmente finito, siamo portati a ipotizzare che ρ debba essere indipendente dal particolare luogo. [...] Dalla nostra ipotesi sull'uniformità della distribuzione delle masse che generano il campo, consegue che la curvatura dello spazio richiesto debba essere costante. [...] Esiste un sistema di riferimento relativamente al quale la materia può essere

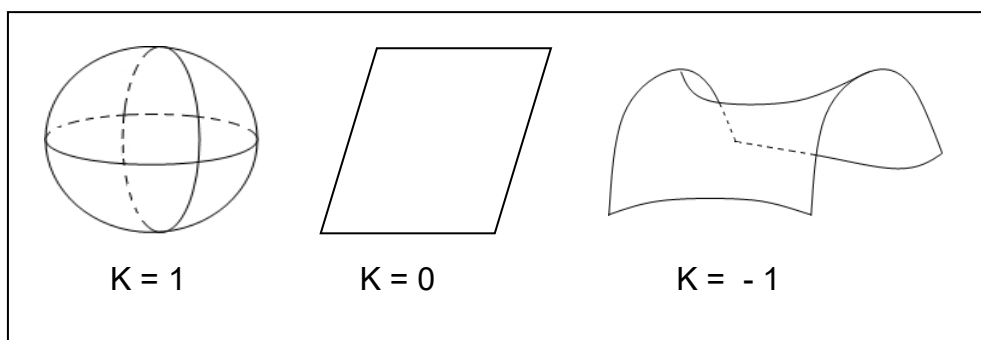
guardata come permanentemente a riposo”.

Quest' ultima frase di Einstein consente di introdurre un tempo che è lo stesso per tutti gli osservatori dell'Universo (tempo cosmico) e le ipotesi di una curvatura costante e di un'uniforme distribuzione della densità di energia conducono anche a una forma spaziale che non prevede luoghi singolari o privilegiati: l'Universo di Einstein è uguale per tutti. Tutto ciò si traduce in geometria con una particolare espressione per la distanza tra due punti nello spazio-tempo, che oggi scriviamo in questo modo:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left\{ \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right\} \quad (1)$$

La richiesta dell'esistenza di un tempo cosmico viene soddisfatta non mettendo alcuna funzione davanti al tempo, il quale risulta così lo stesso per tutti gli osservatori. L'ipotesi di isotropia porta ad avere le dimensioni spaziali tutte moltiplicate per lo stesso fattore di scala $a(t)$ incognito. Infine, siccome la densità di energia dipende solo dal tempo, anche $a(t)$ deve dipendere solo dal tempo. Se $a(t)$ è una funzione crescente del tempo, anche la distanza tra due punti nello spazio cresce a sua volta in modo isotropo.

La condizione imposta da Einstein, secondo cui la curvatura spaziale deve essere costante, riduce le possibili geometrie dell'Universo a soltanto tre possibilità contenute nella costante K , che può assumere tre diversi valori. Se $K = 1$ otteniamo il primo modello studiato da Einstein, che descrive un universo chiuso avente la forma spaziale di una sfera con raggio $a(t)$. Al contrario, se $K = 0$ abbiamo uno spazio piatto Euclideo, mentre con $K = -1$ otteniamo il modello aperto di universo, la cui forma ricorda una sella.



Partendo dalla metrica (1), la descrizione della nascita, evoluzione e possibile fine dell'Universo (considerato come un unico oggetto sottoposto alle leggi della fisica) è finalmente possibile semplicemente studiando tre equazioni differenziali che scriverò esplicitamente; in tal modo anche chi non è un cosmologo, potrà darvi un'occhiata veloce, proprio come un visitatore del Louvre può soffermarsi qualche minuto davanti alla Gioconda e riceverne un'emozione pur non essendo un esperto d'arte:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda c^2}{3} \quad (2)$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3c^2}\rho + \frac{\Lambda c^2}{3} \quad (3)$$

$$\dot{\rho} + 3\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)(\rho + p) = 0 \quad (4)$$

Nel 1917 l'umanità fece uno dei più grandi passi avanti della sua storia, ma solo poche persone ne furono pienamente consapevoli. Questo puntino tra miliardi di galassie è riuscito nell'incredibile impresa di descrivere l'intero universo con tre equazioni. Una volta risolte queste equazioni, si conoscerà in che modo la densità di energia ed il fattore di scala varino in funzione del tempo. Se $a(t)$ aumenta, significa che l'universo è in espansione, se è costante che la materia è statica, mentre se diminuisce significa che l'universo si sta contraendo. Einstein trovò soluzioni con $a(t)$ in espansione ma, poiché era convinto (come lo erano tutti nel 1917) che l'Universo fosse statico, introdusse nelle equazioni (2) e (3) l'ultimo termine, in cui appare la costante cosmologica Λ , che originariamente era assente. Solo grazie a questo "trucco" le sue equazioni consentono una soluzione con $a(t)$ costante. Einstein pubblicò quindi la soluzione "statica". Cinque

anni dopo, nel 1922, lo scienziato russo Aleksandr Fridman [4] fece un importante passo avanti, pubblicando una serie di modelli dell'Universo in espansione, nei quali, al contrario del modello di Einstein, $\Lambda = 0$. In breve, secondo Fridman, non c'è alcun bisogno di introdurre la costante cosmologica Λ , a condizione che si rinunci a un Universo statico. Inizialmente, Einstein fu molto critico nei confronti dei modelli di Fridman, ma molto presto dovette piegarsi all'evidenza.

Dapprima gli studi di Slipher sugli spettri [5] e poi quelli di Lemaitre [6], Hubble e Humason [7] fornirono la prima prova sperimentale con cui i teorici della cosmologia dovettero confrontarsi: l'universo si stava espandendo. In particolare, nel 1929 Hubble provò che le galassie si stanno allontanando da noi a una velocità "V = H d" che è proporzionale alla distanza, proprio come previsto dai modelli pubblicati da Fridman e da Lemaitre (e H fu chiamata costante di Hubble).

Alla fine, Einstein capì che la sua soluzione statica non era quella giusta e, dal momento che non gli era mai piaciuta la costante cosmologica, che egli aveva definito nel 1919 "dannosa per la bellezza formale della teoria" [8], la abbandonò definitivamente ritenendola "lo sbaglio più grande" della sua vita. L'universo era andato al di là della stessa immaginazione di Albert Einstein.

In tal modo la costante cosmologica fu rifiutata per molti anni e venne messa nel "cestino" contenente tutte le idee inutili della storia della cosmologia, anche se Eddington e Lamaitre [6] avevano costruito una serie di interessanti modelli in espansione basati sull'esistenza di Λ (che oggi sono tornati di moda e considerati di grande fascino).

Nel 1932 Einstein e De Sitter [9] pubblicarono insieme la soluzione al modello di Universo più semplice, quello piatto ($K = 0$), senza costante cosmologica, che prevede nell'era dominata dalla radiazione un fattore di scala $a(t)$ proporzionale a $t^{1/2}$ e, nell'era della materia, un fattore di scala proporzionale a $t^{2/3}$. Inoltre, questo modello permette di calcolare che la densità della massa contenuta oggi nell'Universo sia

$\rho_c / c^2 = 3H_0^2 / 8\pi G \approx 10^{-29} \text{ g/cm}^3$ (chiamata densità critica), dove abbiamo scelto $H_0 \approx 70 \text{ km}/(\text{sec} \cdot \text{Mpc})$ come stima sperimentale della costante di Hubble. Tale modello sarà considerato per molti anni la migliore descrizione dell'ultimo periodo della storia dell'Universo.

Un ulteriore passo fondamentale verso la comprensione dell'evoluzione dell'Universo fu compiuto verso la fine della seconda guerra mondiale, grazie ad un gruppo di scienziati guidati da George Gamow. In una serie di articoli molto importanti, scritti tra il 1946 ed il 1950, Alpher, Bethe, Gamow e Hermann [10] calcolarono per l'Universo primordiale l'abbondanza relativa di elementi chimici leggeri. La loro origine si può spiegare adeguatamente nel contesto del modello di Big Bang Caldo, in un modo che è in accordo con ciò che possiamo realmente osservare nello stato attuale dell'Universo. Inoltre, i suddetti scienziati hanno previsto che, al di sotto di una temperatura critica, si sarebbe verificato un disaccoppiamento tra materia e radiazione. Essi calcolarono che la radiazione calda, seguendo l'espansione dell'Universo e raffreddandosi sempre di più, sarebbe stata rilevabile anche ai giorni nostri con una temperatura di circa 5°K.

Nel 1965 Penzias e Wilson [11] scoprirono per caso una radiazione isotropa con una temperatura di 3.3°K nella gamma delle microonde ed essa fu subito riconosciuta da Dicke e Peebles come la radiazione cosmica prevista da Gamow, Alpher e Hermann. Sia le previsioni di abbondanza relativa di Idrogeno ed Elio che quelle relative alla temperatura della Radiazione Cosmica di Fondo a Microonde (CMBR) furono in seguito perfezionate da altri autori e attualmente costituiscono due prove a sostegno della teoria del Big Bang Caldo. Le ultime stime [12] danno una temperatura della CMBR pari a 2.725°K e un'abbondanza di Elio primordiale pari a circa il 24% (il resto era quasi tutto Idrogeno).

Alla fine degli anni sessanta il modello del Big Bang Caldo ebbe finalmente basi solide, fondandosi su tre prove sperimentali: l'espansione delle galassie, l'esistenza della radiazione cosmica di fondo e la corretta previsione dell'abbondanza relativa di elementi

leggeri. Hawking [13] conferma che: “C'è un'evidenza indiretta dell'accordo fra osservazioni e previsioni delle abbondanze di elementi leggeri che il modello è buono fino a circa un solo secondo dopo il big bang. Tuttavia il modello non spiega perché l'universo era così come era dopo un secondo. Ciò è semplicemente assunto come una condizione iniziale”.

Il dibattito fra i cosmologi si è concentrato per molti anni su ciò che è accaduto nel primo secondo successivo al Big Bang, ma rimaneva una fondamentale domanda aperta anche sul destino e sulla forma dell'Universo. Tutto dipende dal valore della densità di energia. Se la densità di energia contenuta nell'universo è minore di quella critica (in questo caso $K = -1$), l'Universo è a forma di sella e si espanderà per sempre. Se, invece, l'odierna densità di energia supera quella critica, l'Universo sarà sferico ($K = 1$), e, a un certo valore del tempo cosmico, cesserà di espandersi e inizierà a contrarsi. Nell'unico caso in cui la densità è proprio uguale al valore critico, l'Universo sarà piatto. Ci sono quindi infiniti valori della densità a favore degli universi sferico o a sella e un unico valore a favore di quello piatto. Naturalmente, ci si attende che l'Universo non sia piatto perché è il caso meno probabile.

Al fine di comprendere quale strada prenderà il nostro Universo, la ricerca sperimentale ha analizzato, negli ultimi anni due fenomeni: il red-shift delle Supernove e le anisotropie della Radiazione di Fondo Cosmico. Tutte le informazioni sperimentali sull'evoluzione e sulla composizione dell'Universo sono collegate alla radiazione elettromagnetica emessa da stelle, galassie ecc. La prima radiazione rilevabile fu emessa durante l'era del disaccoppiamento dalla materia, circa 380000 anni dopo il Big Bang. Dunque, una foto della Radiazione Cosmica di Fondo a quel tempo rappresenta oggi la più antica fonte di informazione possibile. Quando riusciremo ad analizzare anche le onde gravitazionali primordiali, otterremo qualche informazione sui primi istanti dell'Universo. Per ora l'interesse dei cosmologi si è concentrato sulla misura delle anisotropie della CMBR.

Lo scopo era tracciare una mappa del cielo dove fossero identificate le zone dell'universo in cui la temperatura è di pochissimo (0.0002°K) superiore o inferiore alla temperatura media di 2.725°K . Prima il satellite COBE (Cosmic Background Explorer), poi il progetto BOOMERANG e quindi i satelliti WMAP e PLANCK, hanno permesso di analizzare in dettaglio la struttura della CMBR. Le fluttuazioni della CMBR formano alcune piccole zone di poco più calde e più dense, dalle quali hanno avuto origine le prime galassie. Queste zone assumono la forma predetta dallo scenario dell'universo piatto ($K = 0$) ed escludono le altre due possibilità ($K = -1$ e $K = 1$). Ancora una volta si immagina per l'Universo un certo comportamento e i dati sperimentali smentiscono le previsioni.

Grazie allo studio della CMBR si è potuto capire che l'universo sarà in perenne espansione. Ma le sorprese non sono finite: le equazioni di Einstein prevedono che questa espansione rallenti col passare del tempo, mentre gli astronomi hanno scoperto che l'Universo sta accelerando. A partire dal 1997, gli astrofisici del Supernova Cosmology Project [14] hanno osservato molte supernove lontane ed hanno confrontato le previsioni teoriche delle equazioni di Einstein con la posizione di queste Supernove nel diagramma Magnitudine – Redshift. Ne è risultato che quello che meglio si adattava ai dati sperimentali non era il modello di Einstein – De Sitter, come ci si sarebbe aspettati, bensì il modello ΛCDM , che è così chiamato perché è di nuovo basato sull'introduzione del termine Λ nelle equazioni di Einstein e sull'esistenza di una considerevole quantità di Materia Oscura Fredda (Cold Dark Matter). La grande novità sta nel fatto che l'universo, anziché decelerare, sta attraversando una fase di accelerazione e così si espanderà per sempre. Gli scienziati moderni, senza affatto preoccuparsi di fare qualcosa di “dannoso per la bellezza formale della teoria”, non hanno esitato a utilizzare Λ , non per fermare l'espansione (che era l'obiettivo iniziale di Einstein), ma per indurre un'accelerazione. La costante Cosmologica venne dunque recuperata dal “cestino” della storia della Cosmologia e utilizzata come termine 'antigravitazionale' per risolvere il problema

dell'universo in accelerazione. Questo termine in più rappresenta una nuova forma di energia (diversa da quella contenuta in ρ) e, siccome la sua origine è ancora oscura, viene battezzato Dark Energy. Lo scenario che ci presenta il modello standard della cosmologia è dunque quello di un universo piatto, in espansione accelerata, che ha attualmente un'età di circa 13,7 miliardi di anni, che è formato [15] dal 68.5% di Energia Oscura, dal 26.6% di Materia Oscura e, solo per il 4.9%, da Materia Normale come protoni, neutroni ed elettroni. Inutile sottolineare che, ammettendo di non conoscere l'origine del 95% dell'energia contenuta nell'Universo, resta ancora molto spazio per immaginare nuove teorie e per restare ancora stupiti dalle sorprese di un Universo che ancora una volta andrà al di là della nostra immaginazione. Einstein ci insegna, però, che il cosmo è stato creato in maniera tale che la sua comprensione è difficile e faticosa, ma non impossibile, perché "Sottile è il Signore, ma non malizioso".

Bibliografia

- [1] Galileo Galilei, "Il Saggiatore" 1623 (in "I classici del pensiero italiano – Galileo Galilei" Biblioteca Treccani, 2006 p.121)
- [2] A. Einstein, "Feldgleichungen der Gravitation", Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), Sitzungsberichte, (25 Novembre 1915) p. 844; "Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie" Annalen der Physik 49 (1916) p. 769;
- [3] A. Einstein, "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie", in Sitz. Preuss. Akad. Wiss., Berlin, (1917) p.142. [traduzione Inglese in: "The Principle of Relativity" H. A. Lorentz et. al. (Dover Publications Inc, New York, 1952) p.177]
- [4] A. Fridman, "Über die Krümmung des Raumes", Zeitschrift für Physik, 10 (1922) p. 377.
- [5] V. M. Slipher, "Spectrographic observations of nebulae". 17° meeting della American Astronomical Society, Agosto 1914.
- [6] G. Lemaitre, "A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extragalactic nebulae", MNRAS, 91 (1931) p. 483. [Traduzione Inglese tratta

da: Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, XLVII A, 49 (1927)], A. S. Eddington, "On the instability of Einstein's spherical world", MNRAS, 90, (1930) p. 668;

[7] E. Hubble, "A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae", Proc. Natl. Acad. Sci. (USA), 15 (1929) p. 168; E. Hubble & M. Humason, "The velocity-distance relation among extragalactic nebulae", Ap. J., 74 (1931) p. 35.

[8] A. Einstein "Spielen Gravitationsfelder im Aufber der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle?", Sitz. der Preuss. Akad. Wissenschaften 1919. [Traduzione Inglese in: "The Principle of Relativity" p. 191]

[9] A. Einstein and W. de Sitter, "On the relation between the expansion and the mean density of the universe", Proc. Natl. Acad. Sci. (USA), 18 (1932) p. 213.

[10] G. Gamow, "Expanding universe and the origin of elements", Phys. Rev., 70 (1946) p. 572; R. A. Alpher and R. C. Herman, "Evolution of the universe", Nature, 162 (1948) p. 774 e anche Rev. Mod. Phys. 22 (1950) 153; R. A. Alpher, H. A. Bethe and G. Gamov, "The origin of chemical elements", Phys. Rev., 73 (1948) p. 80

[11] A. A. Penzias and R.W. Wilson, "A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s", Ap. J. 142 (1965) p. 419.

[12] "Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Five years results". Vedi sito web: <http://map.gsfc.nasa.gov>

[13] S.W. Hawking, Introduction to: "The very early universe" proceedings of the Nuffield workshop (Cambridge, 1982) p. 2.

[14] S. Perlmutter et al., Ap. J. 483 (1997) p. 565; B. Schmidt et al., Ap. J. 507 (1998) p. 46; A.J. Riess et al., 116 (1998) p. 1009.

[15] N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown, et al. (Planck Collaboration), Astronomy and Astrophysics 641, A6 (2020)