

La scoperta dell'espansione del cosmo

Quando la cosmologia cominciò a essere scienza

Silvio A. Bonometto e Marino Mezzetti

INAF – Osservatorio Astronomico di Trieste

Il problema cosmologico si era posto sin dai tempi di Newton, ma una ragionevole impostazione scientifica diventa possibile solo dopo la scoperta della Relatività Generale. La prima metà del Novecento è il periodo in cui fisici teorici e astronomi hanno finalmente strumenti e dati per fare, della cosmologia, una scienza. Ma i meriti delle diverse scoperte sono stati equamente distribuiti? In particolare, è poi vero che Edwin Hubble ha scoperto l'espansione cosmica?

Il cosmo si espande. Oggi è un dato osservativo. Tutti i testi, dai sussidiari delle elementari, alla paludata *Enciclopedia Britannica*, attribuiscono la scoperta dell'espansione cosmica a Edwin Hubble. Anche se, da sempre, la *grandeur* d'oltralpe spinge perché la proporzionalità distanza-velocità sia denominata *legge di Hubble-Lemaître*.

La storia, in realtà, è assai più complessa e le correzioni alla *vulgata* andrebbero ben al di là dell'aggiunta di un nome. Diciamolo allora subito e

chiaramente: Hubble ha grandi meriti scientifici, ma c'è una buona dose di "senno di poi", nell'affermare che lui o don Lemaître abbiano scoperto che il cosmo s'espande.

Tutto comincia ai tempi di Newton: Poco dopo la formulazione della "gravitazione universale", Isaac Newton fu infatti interpellato dall'arcivescovo di Canterbury, Richard Bentley, sulla stabilità dell'Universo, nel suo complesso, a fronte della sua autogravità. La risposta sta in una famosa lettera, che possiamo ancora leggere nella biblioteca del Trinity College di Cambridge. Newton deve dolorosamente ammettere la sua impotenza: con la sola gravitazione newtoniana, si incontrano risultati contraddittori.

Tre secoli più tardi, Albert Einstein trova la risposta alla domanda: come evolve una sostanza omogenea e isotropa, sottoposta solo alla sua autogravità. La sua nuova teoria della gravitazione, la *Relatività Generale* (vedi il riquadro), in effetti, va molto al di là della gravitazione universale newtoniana. Anche se, per i casi che Newton sapeva risolvere, il risultato è sostanzialmente lo stesso. Adesso, alla domanda del Rev. Bentley, si



Figura 1: Isaac Newton (in alto) e Richard Bentley (in basso). Dalla loro corrispondenza risulta che Isaac Newton si era posto il problema cosmologico.

comincia a dare risposta.

Tuttavia Einstein si rende subito conto che il suo cosmo omogeneo e isotropo si deve espandere o contrarre. Risultato imbarazzante, dal momento che gli astronomi del tempo non avevano dubbi: l'Universo era composto di stelle e coincideva con la Galassia, la Via Lattea, che non si espandeva nè si contraeva. Quanto all'idea che alcune *nebulose* potessero essere altre "galassie", ci aveva pensato persino Immanuel Kant, la si considerava superata e anti-scientifica. Era a tutti evidente la correlazione tra geometria della galassia e posizione delle nebulose, che si osservavano prevalentemente ad alta latitudine galattica. Un assurdo, dal punto di vista statistico: se le nebulose fossero state oggetti extra-galattici non avrebbero dovuto risentire della geometria della Via Lattea, ma essere distribuite isotropicamente nel cielo.

Ovvio l'imbarazzo di Einstein. Sono gli anni della grande guerra e Einstein lavora all'Istituto Kaiser Guglielmo in Berlino. Per discutere le sue idee può comunque fare una visita a Leida, nella neutrale Olanda. Qui ha svariati colloqui col giovane Willem de Sitter, cui segue una lunga corrispondenza. È de Sitter a suggerire l'esistenza di sistemi extra-galattici in recessione, magari fatti di sostanza non-barionica. Einstein contro-

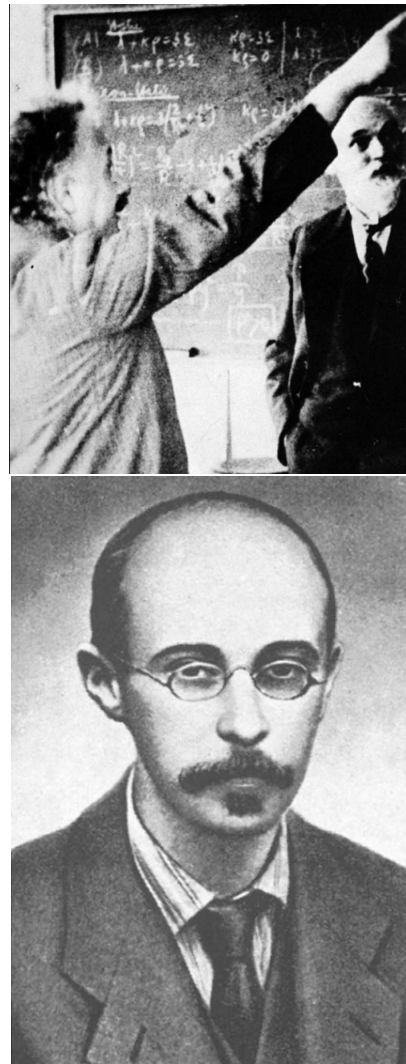


Figura 2: Alcuni tra i fondatori della moderna cosmologia: Willem de Sitter a colloquio con Albert Einstein nel 1934 (in alto) e Aleksandr Friedmann (in basso).

propone la *costante cosmologica* Λ . Insomma, nella corrispondenza del 1916, già si parlava di materia oscura non barionica e di energia oscura (Λ).

La guerra finisce e, tra il 1921 e il 1922, escono gli studi di Aleksandr Friedmann sui modelli cosmologici. Nonostante siano pubblicati su una rinomata rivista tedesca¹, passano quasi inosservati. Friedmann ne è così deluso da abbandonare la cosmologia. Le autorità sovietiche lo nominano direttore dell'istituto sismologico di San Pietroburgo, ma il poveretto si ammala di tifo e muore. Nell'universo omogeneo e isotropo di Friedmann, tutte le distanze crescono nel tempo allo stesso modo, secondo un fattore di

¹Zeitschrift für Physik, Vol.10, pg 377: *Über die Krümmung des Raumes*

Relatività e gravitazione

La Relatività Generale (RG) è una teoria della gravitazione universale. Nei casi in cui la forza di gravità si può calcolare con la gravitazione newtoniana, le differenze con la RG sono tanto piccole da trovarsi al di sotto dell'errore sperimentale.

In RG, peraltro, la sorgente di gravitazione non è più solo la massa (o la massa-energia), ma anche la pressione. Densità d'energia e pressione sono infatti componenti del tensore "stress-energy" che è la sorgente della curvatura spazio-temporale. Friedmann, dalle equazioni di Einstein, ricava la legge $a(t) \propto t^{2/[3(1+w)]}$, in cui $w = P/\rho c^2$ è il rapporto tra pressione e densità d'energia.

Se la sorgente dell'espansione è priva di pressione (polvere), la legge si semplifica in $a(t) \propto t^{2/3}$. Se la sorgente è "radiazione", per cui $P = (1/3)\rho c^2$, la legge diventa $a(t) \propto t^{1/2}$. L'esponente del tempo resta comunque < 1 e ciò significa che le distanze crescono più lentamente del tempo: per esempio, quando il tempo raddoppia, le distanze crescono meno del doppio.

L'espansione è accelerata se, invece, le distanze crescono più velocemente del tempo; questo richiede che sia $w < -1/3$. Per la costante cosmologica Λ , che rappresenta $\sim 70\%$ della sorgente dell'espansione, nella nostra epoca cosmica, risulta $w \equiv -1$. Un altro sistema fisico con pressione negativa può essere un campo scalare autointeragente.

scala $a(t)$; ma il modo in cui $a(t)$ è cresciuto nel passato e, soprattutto, il suo comportamento futuro dipendono dalla densità nel modello; qui Friedmann aveva distinto tra universi chiusi e aperti, determinando le geometrie dello spazio-tempo e trovando soluzioni analitiche per $a(t)$, nei vari casi. Oggi questi modelli sono ricordati associando il suo nome a Robertson e Walker, che li riscopriranno quasi un decennio più tardi.

Altro cosmologo "della prima ora" fu, appunto, l'abate Pierre Lemaître, che aveva aggiunto, nella classificazione dei modelli, l'eventuale presenza di una costante Λ .

C'è dunque tutto un fermento sul piano teorico, anche se non possiamo nasconderci una critica di base: chi assicurava a cotanti scienziati che il cosmo fosse proprio omogeneo e isotropo, almeno su grande scala? Il punto è che, fatta questa ipotesi, il problema si impostava e risolveva; se la si lasciava cadere, si entrava in un marasma di casi e sottocasi, di dubbia risolubilità. Giusto quindi affrontare il problema semplice, meno giusto confidare che il mondo fisico dovesse supinamente adattarsi all'elegante modello matematico.

Se poi dal piano teorico passiamo ai programmi osservativi, dovremo attendere qualche anno in più. E tuttavia l'evento memorabile si compie nel Capodanno del 1925. Gli astronomi dell'epo-

ca non frequentavano veglioni e, in quella data, erano riuniti in assemblea per ascoltare la comunicazione di Edwin Hubble alla 33^a riunione della società astronomica americana, che portava un titolo smaccatamente tecnico: *Su alcune Cefeidi nella costellazione di Andromeda*. Usando il telescopio Hooker di Mount Wilson, dal diametro di 240 cm, Hubble aveva misurato la distanza della nebulosa M31 in Andromeda, collocandola definitivamente fuori della Via Lattea.

In realtà, Hubble usava una taratura errata per le Cefeidi (vedi il riquadro), che dava circa $1/3$ delle distanze reali. M31 si trova a poco meno di 800 kpc; Hubble le attribuiva invece una distanza $\simeq 260$ kpc. Le dimensioni della Via Lattea sono comunque ~ 20 kpc.

Cosa restava allora degli eccellenti argomenti statistici che escludevano la natura extragalattica per le nebulose? Se le nebulose si osservavano solo a alta latitudine galattica, doveva esserci qualcosa che oscurava quelle di bassa latitudine. Se la luce delle supernovae era tanto splendente da eguagliare quella della nebulosa ospite, bisognava trovare il meccanismo che permetteva a una singola stella di irradiare quanto un miliardo di soli. Siamo negli anni Venti, e l'idea che le stelle irradiano energia nucleare non esiste proprio; anzi, non esiste nemmeno l'idea delle reazioni nucleari. Si sa anche poco degli

Cefeidi e altre stelle variabili (I)

Quella delle stelle cefeidi è una lunga storia, iniziata con la scoperta, da parte dell'astronomo John Goodricke, nel 1784, della stella δ Cephei. La luminosità di δ Cephei varia di un fattore 2 nell'ambito di 5 giorni; la costellazione del Cefeo si trova tra Cassiopea e Draco. Nel corso dell'Ottocento seguirono altre scoperte di stelle variabili dello stesso tipo, all'interno della Via Lattea. Si riuscì così a stabilire trattarsi di stelle assai luminose, fino a 1000 volte il Sole.

Ma la scoperta fondamentale viene fatta da Antonietta Swan Leavitt, a cavallo tra l'Ottocento e il secolo scorso: esaminando le cefeidi della *Grande Nube di Magellano*, Antonietta scoprì una relazione lineare tra il logaritmo dei tempi di variazione e luminosità intrinseca. Nota la distanza di una Cefeide, e il periodo di oscillazione della sua luce, si sapeva così la sua luminosità intrinseca; confrontandola con la misura terrestre della sua luminosità, se ne deduceva la distanza. Per questo, si dice che le Cefeidi sono delle *candele standard*: sono come lumi di intensità nota, sicché il loro splendore apparente, a ogni distanza, può essere previsto. Viceversa, dallo splendore apparente di una "candela standard", si deduce la sua distanza.

Tarando la scala di questi "lumi" su alcune cefeidi della Via Lattea, la Leavitt stimò allora che la *Grande Nube di Magellano* distava 15–20 kpc dal Sole. Incontriamo già qui la sottostima di un fattore 3, dato che la nube è un satellite della Via Lattea e si trova a poco meno di 50 kpc dalla nostra galassia. Allo stesso modo Edwin Hubble ci dirà che M31 si trova a 260 kpc di distanza (invece di 790). In questo caso, però, non c'è scampo; siamo fuori dalla Via Lattea, le cui dimensioni si aggirano sui 20 kpc.

Oggi sappiamo che Antonietta aveva fatto di tutta l'erba un fascio: le stelle che lei considerava uniformemente cefeidi, si distribuiscono in 3 categorie: Cefeidi di tipo I e II, nonché *RR Lyrae*, sulla coda di minore luminosità (~ 50 volte il Sole). (Continua)

equilibri interni delle stelle, della loro evoluzione, dei suoi stadi finali: quando reazioni nucleari esotermiche non sono più possibili, la pressione cala drammaticamente e la stella implode, liberando la sua energia gravitazionale. In sostanza, viene da dire che la scoperta di Hubble è una grossa lezione da imparare, di fronte alle asserite certezze professionali di tanti gloriosi scienziati.

Negli anni successivi Hubble e Humason studiano stelle Cefeidi (vedi riquadro) in varie altre nebulose "vicine", stimandone così le distanze. Ma non sono i soli. A Mount Wilson lavora anche Gustaf Strömberg che, nel 1925, pubblica una lista di velocità radiali per ammassi globulari e nebulose extragalattiche. Pierre Lemaître usa i suoi dati in un articolo del 1927, che seleziona 43 "nebulose" dalla lista di Strömberg, deducendone un valore del ritmo di espansione del cosmo. Il valore che l'abate dà, per quello che sarà poi chiamato *parametro di Hubble*, va oltre i 600 (km/sec)/Mpc.

A differenza di Hubble, l'abate Pierre non ha un diretto controllo sui dati. Ma questo non è il suo maggior problema. Infatti, essendo bel-

ga, pubblica in francese le sue deduzioni sugli *Annales de la société scientifique de Bruxelles* e, per molti anni, le sue conclusioni saranno ignorate dal dibattito scientifico.

Qui merita di essere sottolineata l'onestà intellettuale di Lemaître il quale, seppur in nota, ci ricorda che l'errore nelle determinazioni delle distanze è dello stesso ordine di grandezza dell'intervallo di distanze coperto dalle osservazioni; inoltre –dice l'abate– *le galassie hanno una velocità "peculiare", indipendente dall'espansione, dell'ordine di 300 km/sec*. Tutte oneste riserve che resteranno estranee al celebrato articolo di Hubble, del 1929.

Hubble, infatti, dopo aver visto che, usando le Cefeidi, gli era possibile stimare la distanza di solo 7 galassie (e i risultati erano deludenti), cerca anche lui di inventare metodologie per allargare il suo campione. Un primo metodo si basa sulla ricerca della stella più brillante, nelle galassie in cui riusciva a risolvere le stelle. L'ipotesi è che la stella più brillante di ogni galassia abbia la stessa luminosità. Dalla sua luminosità apparente si potrebbe allora dedurre la distanza.

Il metodo è abbastanza approssimativo, ma, se

Cefeidi e altre stelle variabili (II)

La maggior parte delle stelle che si osservano stanno bruciando idrogeno, che si trasforma in elio, e si collocano sulla *Sequenza Principale* (SP), cioè su una ristretta banda quasi rettilinea del piano con coordinate T ed L (temperatura e luminosità). Il Sole è una stella della SP e ha idrogeno disponibile per circa altri 4 miliardi di anni. Poi il suo "core" sarà composto di ^4He . Finito l'idrogeno, il core della stella si contrae, mentre le zone esterne si dilatano. La contrazione fa crescere la temperatura del core finché diventa possibile una complessa reazione che permette a 3 nuclei di ^4He di formare un nucleo di ^{12}C . L'innescò di questa reazione è, in genere, esplosivo e si parla di "*carbon flash*". L'esplosione dilata nuovamente il core, ma alla fine il sistema riesce a trovare un suo equilibrio, col core stabilmente più caldo, in cui prosegue la combustione dell'elio.

E quando l'elio si è a sua volta esaurito, cosa succede? Qui la risposta è variegata, a seconda di massa e composizione chimica. È a questo punto che la stella può imboccare un percorso che la porta a diventare una variabile, magari cominciando a bruciare idrogeno o elio in strati esterni al core. Ciò causa una instabilità negli strati ancora più esterni, che si espandono e ricontraggono. Siccome l'immagine della stella è comunque puntiforme, ne seguono le apparenti variazioni che si osservano nel suo splendore.

La variabilità di Cefeidi e RR Lyrae non è dunque dovuta a variabilità delle reazioni nucleari nei loro strati più interni, ma a ampie variazioni del loro diametro.

È importante soprattutto isolare le vere cefeidi dalla RR Lyrae (sostanzialmente meno luminose e con minore pendenza della curva luminosità-periodo), sulla base di una spettrografia adeguata. Una volta eliminato l'*inquinamento* delle RR Lyrae, la relazione periodo-luminosità s'impenna, e si ottiene una buona scala di distanze. Che poi si precisano ancor meglio, separando cefeidi di tipo I e tipo II.

ben tarato e applicato a un campione consistente, può dare risultati non assurdi. Hubble lo tarò sulle galassie in cui risolveva le Cefeidi e quindi anche questi dati sono inquinati dall'errore fatto per le Cefeidi.

Il campione così si allarga a 20 galassie, ma Hubble non è contento e aggiunge 4 galassie prese dalla costellazione della Vergine. Non vale neppure la pena di discutere come ne stimasse le distanze, che sono 8 volte superiori ai suoi risultati. Alla sottovalutazione contribuiscono vari fattori. A differenza di Lemaître, ad esempio, Hubble non parla nemmeno di velocità peculiari. Oggi sappiamo che, sostanzialmente, c'è un moto locale d'insieme, che coinvolge gran parte delle galassie, tra la Via Lattea e l'ammasso della Vergine; per lo più, nel giro di qualche decina di miliardi d'anni, tutte queste galassie finiranno per entrare a far parte direttamente dell'ammasso.

Si tratta di dati ormai consolidati nei decenni. Tuttavia, nel dicembre 2017, un ampio gruppo di ricercatori francesi, israeliani, del Mary-

land e delle Hawaii è andato oltre, pubblicando sull'*Astrophysical Journal* la ricostruzione dei moti passati e futuri, per circa 1400 galassie entro 30 Mpc dalla Via Lattea. Anche le galassie della Vergine che appaiono in allontanamento da noi, hanno una velocità legata a questi moti su vasta scala, con un modesto contributo dall'espansione globale.

Ovviamente, Hubble sapeva poco di tutto questo e, comunque, non gli dà gran peso (a differenza di Lemaître). In definitiva, dunque, il celebrato articolo del 1929, in cui sostiene esistere una *rozza legge di proporzionalità tra le distanze stimate e le velocità di recessione* si basa su un campione di galassie incompleto, scelto con criteri persino difficili da ricostruire. Hubble se ne serve per stimare la costante di proporzionalità tra velocità e distanza, trovando 500 (km/sec)/Mpc (vedi Figura 3).

A questo proposito è utile ridiscutere la cosa usando dati aggiornati (vedi Figura 4). Scopriamo così che tutte le galassie di cui Hubble misurava la distanza con le Cefeidi –meno una–

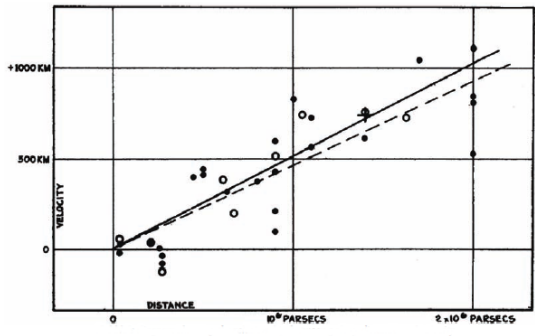


Figura 3: Copia del grafico originale di Edwin Hubble, che considera galassie con velocità che arrivano a 1000 km/sec (curiosamente –ed erroneamente– espresse in “KM”).

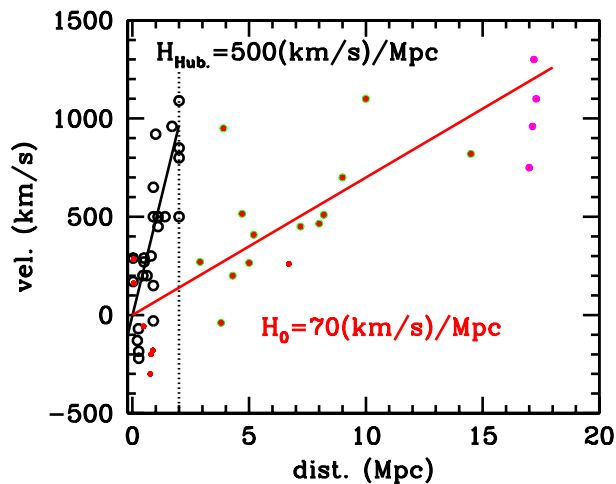


Figura 4: Distanze e velocità reali delle galassie del campione di Hubble, confrontate con i suoi “dati”. Anzitutto, l’ascissa che, nel grafico di Hubble, arriva fino a ~ 2 Mpc, va estesa a 20 Mpc (10 volte tanto). I circoletti vuoti ripetono i “dati” di Hubble entro 2 Mpc. I puntini rossi sono le vere distanze e velocità delle galassie che Hubble stimava usando le Cefeidi. Le distanze delle galassie indicate da puntini rosso-verde erano state stimate tramite la stella più brillante. Le ultime 4 galassie appartengono al Virgo cluster, tra 15 e 20 Mpc dalla Via Lattea. Come spiegato nel testo, la consistenza dei dati “aggiornati” con il valore vero di H_0 [$\simeq 70$ (km/sec)/Mpc] non è statisticamente significativa.

sono effettivamente entro 1 Mpc dalla Via Lattea (puntini rossi in Figura 4). In parte esse si allontanano, in parte si avvicinano. Per esempio, M31 in Andromeda si sta avvicinando alla Via Lattea, con cui si scontrerà tra 5 miliardi di anni. Queste velocità sono *moti peculiari*, nulla hanno

a che fare con l’espansione.

Se guardiamo alle galassie segnate con puntini rosso-verde, si comincia a avere l’idea di una crescita della velocità in funzione della distanza. Ma il risultato è ingannevole. Il punto è che si dovrebbe usare un “campione” di galassie, tutte al di sopra di una determinata luminosità intrinseca. Invece, nel campione di Hubble, via via che la distanza cresce si usano galassie di luminosità intrinseca crescente, trascurando quelle più fioche. Del resto, Hubble sembra lasciasse nel cassetto un paio di galassie con distanze misurate in questo modo, sulla base proprio del criterio che erano troppo fioche, e che davano velocità non consistenti con la tesi dell’espansione. Quanto, infine, alle galassie del Virgo cluster (puntini violetti in Figura 4), c’era un tale errore sulla distanza che non ha senso neppure discuterne.

Peraltro, se si correggono i dati di Hubble del fattore 3, dovuto alla cattiva taratura sulle Cefeidi, la costante di proporzionalità, da 500 (km/sec)/Mpc, scende subito a 170 (km/sec)/Mpc. Il suo valore vero è oggi conosciuto, viene indicato con H_0 e si aggira sui 70 (km/sec)/Mpc.

In Figura 4 viene anche tracciata la nuova “legge di Hubble” corrispondente a 70 (km/sec)/Mpc (linea rossa). Il grafico sembrerebbe indicare che, fatte le debite correzioni, si arrivi al risultato giusto. Si tratta, invece, di poco più di una coincidenza, su cui torneremo tra breve.

Va anche detto che Hubble era sicuramente parco di citazioni. Ma qualcosa gli scappa lo stesso quando scrive che i suoi dati possono essere utilizzati per dare una base “numerica” allo studio della *curvatura dello spazio*. Parlare di curvatura significa riferirsi alla Relatività Generale. Sebbene non citati, i risultati dei relativisti non gli erano dunque ignoti² e oggi potremmo dire che l’operazione di Hubble è simile a quella di molti fisici contemporanei: cercare nei dati disponibili la conferma di previsioni teoriche. Non è la prima volta che la teoria è giusta, ma l’asserita conferma sperimentale è, quanto meno, prematura.

²Nel testo viene fatto il nome di deSitter, ma nessun articolo suo, o di altri relativisti, compare nella bibliografia.

Comunque, a quel punto, il mondo scientifico è sconvolto. La previsione einsteiniana era immersa in un contesto teorico che pochi ancora comprendevano: si disse persino che solo una ventina di persone al mondo avessero un cervello adatto a capire la relatività. Il dato sulle galassie è invece molto più concreto. Se si allontanano con velocità proporzionale alla distanza, vuol dire che sono tutte partite dallo stesso punto. Basta far scorrere l'orologio all'indietro e si incontra l'istante della grande esplosione che dà origine all'Universo. Fred Hoyle, cui tutto questo sembrava poco credibile, con il termine ancor oggi adottato, quel *Big-Bang* cui non attribuiamo più alcun significato di irrisione.

Più sagacemente, usando i modelli di Friedmann, i cosmologi degli anni Trenta cercano di distinguere le alternative sulle leggi della passata espansione cosmica. A seconda della densità media del cosmo, che allora era impossibile stimare, il Big-Bang si colloca a diversa distanza nel passato. Viene comunque dato per scontato che la sostanza cosmica sia sorgente di attrazione gravitazionale e provochi quindi un progressivo rallentamento dell'espansione, la *decelerazione* del moto delle galassie. Si definisce anche un "parametro di decelerazione" q_0 , per classificare i modelli, accanto al parametro di Hubble H_0 ; ma i tempi non sono maturi per riuscire a porre limiti sul suo valore.

Bisognerà attendere fino agli anni a cavallo tra Novecento e nuovo millennio; nel 1998, gli astronomi statunitensi Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt e Adam Riess mostrano infatti qualcosa che allora sarebbe stato giudicato sconvolgente: l'espansione dell'universo sta accelerando anziché rallentare, sembra dunque esserci una componente cosmica che produce una sorta di *antigravità*.

Per rendersi conto della portata di questa scoperta, basta guardare la Fig. 5, che descrive l'andamento delle distanze in funzione del tempo. In ordinata sono riportate le distanze, rapportate a quelle odierne. In ascissa c'è il tempo nel passato, indicato con segno negativo.

Per il modello Λ CDM, in cui rientra la costante cosmologica Λ di Einstein, il Big-Bang si colloca circa 13.8 miliardi di anni nel passato. La più rapida salita della curva rossa implica un'origine dei tempi più vicina, meno di dieci miliardi

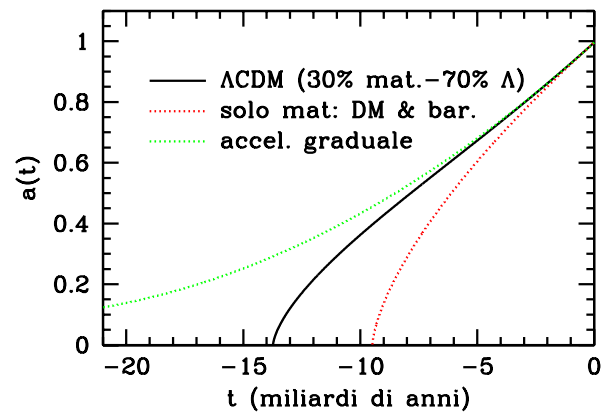


Figura 5: *Andamento delle scale, in funzione del tempo. La curva nera si ottiene nel modello Λ CDM, quello che meglio si adatta a tutti i dati osservativi. La curva rossa ci mostra l'andamento che avrebbe il fattore di scala in assenza della "costante cosmologica". La curva verde, infine, ci mostra l'andamento del fattore di scala se l'espansione cosmica, nel passato, avesse sempre gradualmente accelerato, con l'accelerazione oggi riscontrata nei dati. Andando all'indietro nel tempo, questa curva verde non raggiunge mai l'asse delle ascisse, le scale quindi non vanno mai a zero; ci si avvicina allo zero solo asintoticamente: preso un qualunque tempo, nel passato, esisterebbero comunque tempi antecedenti in cui l'Universo era più compatto, ma tuttavia già esisteva. In altri termini, non c'è un Big-Bang. Va sottolineato che questo andamento è oggi falsificato da un gran numero di dati.*

di anni orsono. Così sarebbe se non ci fosse Λ . Nel modello Λ CDM, il cosmo è dunque *più vecchio* di quanto sarebbe in assenza della costante cosmologica e val la pena di sottolineare subito che, nella Via Lattea, si osservano piccole stelline di età superiore ai 10 miliardi di anni, mentre l'età di molti ammassi globulari raggiunge i 12 miliardi di anni. Si tratta dell'età stessa della Via Lattea.

La curva verde, invece, non ha una chiara base dinamica. Essa assume che il cosmo si espanda con una velocità che va gradualmente crescendo. In un remoto passato, l'espansione era lentissima e si può arretrare arbitrariamente nel tempo, mentre la velocità d'espansione continua a calare, senza che le distanze mai s'annullino; se non asintoticamente, al tendere del tempo a $-\infty$. Avremmo cioè un cosmo che si è sempre espanso in modo accelerato, fino a raggiungere la velocità



Figura 6: Allan Sandage al telescopio di Mount Palomar.



Figura 7: Il telescopio spaziale Hubble (HST). Lanciato nel 1990, ruota attorno alla Terra a 540 km di quota, con una velocità di 27350 km/h. Per il suo specchio è stato scelto lo stesso diametro del telescopio Hooker di Mount Wilson, 240 cm, che permise a Edwin Hubble di scoprire la natura extragalattica delle nebulose. I risultati ottenibili (e ottenuti) sono peraltro assai superiori, grazie al vantaggio essenziale di trovarsi fuori dall'atmosfera terrestre. Si ritiene che gli strumenti a bordo di HST resteranno operativi per almeno un'altra decade. Nel frattempo è previsto (per il 2021?) il lancio del nuovo telescopio spaziale "James Webb".

di espansione e il ritmo di accelerazione attuali.

Va subito detto che oggi c'è un'infinità di dati che mostra la fallacia di quest'ultimo modello, a cominciare da tutte le osservazioni sul fondo microonde (CMB: cosmic background radiation). Ma, al momento della scoperta dell'espansione, questi dati non c'erano; tuttavia nessuno pensò a un'espansione accelerata e si diede per scontato che i dati significassero l'esistenza di un "tempo-zero"³. Fisicamente, l'ipotesi arbitraria era che

³L'alternativa cui molti pensarono fu quella dello "stato stazionario", causato da una continua generazione di nuova materia, che quagliava rapidamente in galassie, capaci di riempire i vuoti lasciati dall'espansione. Le basi di questa alternativa erano sostanzialmente ideologiche; il trapasso della cosmologia da questione filosofico-ideologica a scienza non si era ancora del

l'autogravità della sostanza cosmica non avrebbe mai potuto essere repulsiva. Oggi sappiamo che ciò non solo è possibile, ma accade veramente.

Ma veniamo al punto dolente, al campione di Hubble. Se guardiamo la parte del campione compresa entro 6 Mpc, stiamo usando dati di galassie che si trovano nel cosiddetto "piano supergalattico". Alcuni si riferiscono ad esso come "gruppo locale", denominazione che rischia di essere fuorviante, perché altri indicano con questo nome solo un gruppettino di galassie entro un paio di Mpc dalla Via Lattea. Entro 6 Mpc, comunque, anche i dati di Hubble non sono troppo inquinati. In effetti, entro questa distanza sembra esserci un lieve eccesso di galassie in allontanamento, rispetto a quelle che si avvicinano. Un'impressione cui non segue nessun risultato quantitativo, se si opera una regressione lineare sui dati, che risulta compatibile con lo zero (del resto si tratta, in sostanza, di quanto affermava Lemaître). In effetti i moti delle galassie sono disordinati, in quasi-equilibrio *viriale*: la somma delle energie cinetiche approssima la metà della somma delle energie di legame. Le velocità misurabili in quest'ambito non sono velocità d'espansione. A parte un'unica galassia, esse vanno da -300 a +500 km/sec, grosso modo 1/1000 della velocità della luce. Ricordiamo qui che già Pierre Lemaître era al corrente che le velocità peculiari delle galassie "vicine" si aggiravano sui 300 km/sec. In realtà, nei dintorni della Via Lattea, ci sono anche galassie sostanzialmente più lente, come si addice a un volume in cui il processo di virializzazione è ancora in corso. Incidentalmente, la presenza di un volume così ampio in cui le velocità peculiari delle galassie restano (relativamente) basse, che procede tanto lentamente verso la virializzazione, è direttamente collegata alla presenza della costante cosmologica Λ che, negli ultimi 3-4 miliardi di anni, è divenuta la sorgente dominante dell'espansione.

Attorno ai 10 Mpc di distanza dalla Via Lattea, comunque, l'espansione dovrebbe procedere a 700 km/sec⁴. In un tipico ammasso di galassie, tuttavia, ci si aspettano velocità viriali fino a 1000-3000 km/sec.

Viceversa, il prodotto $H_0 d$ approssima 1000-

tutto compiuto.

⁴La sua velocità è data da $H_0 \times d$, dove d è la distanza; in questo caso, appunto, 10 Mpc.

Dall'ultima Assemblea Generale (GA) della Unione Astronomica Internazionale (IAU)

The Resolution B4 on a suggested renaming of the Hubble Law which was presented for voting at the XXXth IAU General Assembly in Vienna (20-31 August 2018) generated a lively and interesting discussion among the GA participants. Therefore the Executive Committee decided to consider the result of the vote in Vienna as indicative and proposed to invite the entire IAU community to express their vote on Resolution B4 electronically. The result of the electronic vote will be considered final.

In the IAU Announcement (<https://www.iau.org/news/announcements/detail/ann18048/>) you will find some background and bibliographic information, the final text of the proposed Resolution, a summary of the discussion that took place in Vienna and the result of the straw vote.

La Risoluzione B4 "sul suggerimento di cambiare nome alla Legge di Hubble", sottoposta a votazione alla XXX Assemblea Generale a Vienna (20-31 Agosto 2018), ha dato origine a una vivace e interessante discussione tra i partecipanti all'assemblea. Peraltro, il Comitato Esecutivo ha deciso di considerare i risultati del voto a Vienna come indicativi, proponendo che l'intera comunità IAU esprima elettronicamente il proprio voto sulla risoluzione B4. Il risultato della votazione elettronica sarà considerato definitivo.

Nel verbale IAU (<https://www.iau.org/news/announcements/detail/ann18048/>) si forniscono le basilari informazioni bibliografiche, il testo finale della delibera proposta, nonché un riassunto della discussione di Vienna e i risultati della votazione tenutasi a titolo di prova.

3000 km/sec a una distanza di 15–40 Mpc. Un campione di galassie che mostri i segni di un'ipotetica espansione dovrebbe quindi estendersi *al meno* oltre i 20 Mpc. In un certo senso, i cosmologi sono fortunati di vivere nel gruppo locale, in cui i moti viriali sono significativi, ma un po' meno robusti. Così, disponendo di dati che si estendevano oltre una decina di Mpc, Sandage, Tamman e deVaucouleurs riuscirono a dare stime significative di H_0 ; ma siamo negli anni Quaranta e Cinquanta del Novecento ⁵.

Incidentalmente, si pensi a cosa significano le velocità peculiari: tutta la massa di un colosso di miliardi di soli lanciata a una velocità di 3000 km/sec; in laboratorio si ottengono simili velocità solo manovrando su minuscoli ioni.

Oggi, comunque, disponiamo di campioni di galassie sufficientemente profondi per permetterci di calcolare direttamente H_0 . La principale

sorgente di informazione, in questo senso, è il telescopio spaziale intitolato al nome di Hubble (in Figura 7).

Peraltro, al valore di H_0 si giunge anche tramite altre tecniche, che prescindono dall'analisi del moto delle galassie (in realtà sussiste ancora una discreta tensione, tra i valori forniti dal telescopio spaziale, sicuramente oltre i 70 (km/sec)/Mpc e quelli ricavati, per esempio, dai dati sul fondo microonde, che si aggirano sui 68 (km/sec)/Mpc; molto lavoro recente è stato dedicato a comprendere se ciò nasca da un *bias* osservativo, o ci sia una ragione fisica). Comunque, il moto d'espansione d'assieme, di tutte le galassie nel cosmo, cui vanno poi aggiunte le velocità peculiari delle singole galassie, viene denominato *flusso di Hubble*. La conclusione è dunque che il flusso di Hubble, cioè *l'espansione cosmica, si osserva solo su scale superiori a una ventina di Megaparsec*. Hubble convinse tutti di averla vista. Ma il "campione" che si era costruito era gravemente inquinato e sicuramente inadeguato.

⁵Le difficoltà incontrate sono ulteriormente illustrate dal fatto che, mentre Sandage e Tamman stimavano $H_0 = 50$ (km/sec)/Mpc, deVaucouleurs e collaboratori insistevano che i dati portavano a un valore poco inferiore a 100. I risultati non erano assolutamente conciliabili, in quanto entrambi i gruppi sostenevano di aver raggiunto una precisione superiore al 10%.



Silvio Bonometto: è nato a Venezia nel 1939, si è laureato in fisica a Padova nel 1961, Libero Docente di fisica teorica nel 1970. Professore associato e poi ordinario (dal 1984) di Fisica Teorica a Padova e Perugia. Dal 1988 al 2010 è professore ordinario di Astrofisica a Milano e Milano–Bicocca. Dal 2010 associato all’Istituto Nazionale di Astrofisica presso l’Osservatorio di Trieste. È Autore di 3 libri e di oltre 200 articoli (una ventina dopo il 2010) con migliaia di citazioni. Ha collaborato con molti ricercatori italiani e stranieri, tra cui Joel Primack, Anatoli Klypin e Martin Rees. Tra i suoi numerosi allievi, molti coprono posizioni internazionali e nazionali di grande prestigio, e hanno contribuito in modo essenziale alla fondazione della moderna scuola di cosmologia in Italia.

Marino Mezzetti: è nato a Trieste nel 1951 e si è laureato in Fisica cum laude presso l’Università di Trieste nel 1975. Dopo 20 mesi di servizio militare in Marina, ha lavorato come astronomo presso l’Osservatorio Astronomico di Trieste dal 1977 alla fine del 1985. Dall’inizio del 1986 al novembre 2015 è stato professore associato presso l’Università di Trieste, dove ha insegnato fisica sperimentale, astronomia e cosmologia. Attualmente è associato INAF presso l’Osservatorio Astronomico di Trieste. La sua attività di ricerca ha riguardato la fisica stellare, le galassie, i sistemi di galassie e la cosmologia. Ha pubblicato oltre 200 lavori scientifici, in gran parte sulle principali riviste internazionali di astrofisica con referee, con oltre 3000 citazioni ed un h index pari a 28, ed ha organizzato più di una dozzina di congressi internazionali su argomenti di astrofisica extragalattica e cosmologia. Dal 2001 al 2010 è stato responsabile del Corso di Laurea Specialistica in Astrofisica e Fisica Spaziale, poi divenuto corso di Laurea Magistrale in Astrofisica e Cosmologia presso l’Università di Trieste.