



Dalle stelle alle galassie al Big Bang

Questa presentazione è divisa in tre parti: nella prima descriverò brevemente gli strumenti a disposizione degli scienziati per studiare il Cosmo; poi farò una rapida trasvolata dalle stelle più vicine fino agli oggetti più lontani che oggi riusciamo a osservare; infine cercherò di comporre le informazioni così raccolte in un quadro unitario, secondo i risultati attuali della Cosmologia.



Galileo Galilei raffigurato nella corte interna del Gioiello

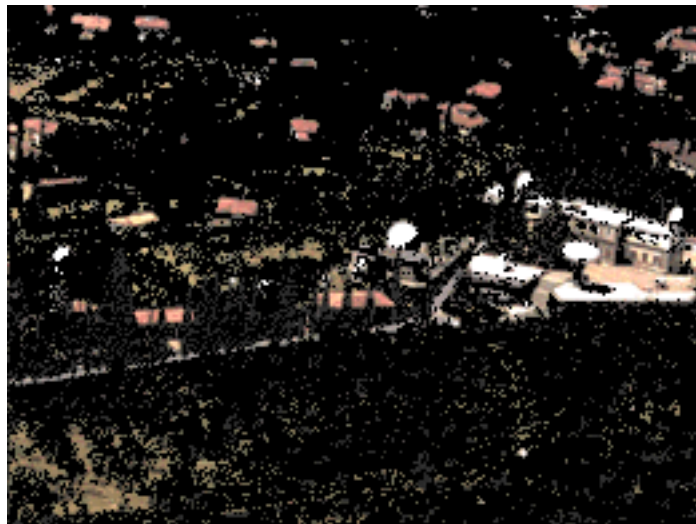
Le istituzioni astronomiche di Firenze si trovano sulla collina di Arcetri, sede dell'Osservatorio Astrofisico e del Dipartimento di Astronomia. La tradizione scientifica dei luoghi risale a Galileo Galilei, che trascorse l'ultima parte della sua vita nella villa del Gioiello, a Pian de' Giullari.



Veduta della Specola dal Giardino di Boboli

Nei secoli successivi gli studi astronomici ebbero sede presso la Specola, adiacente a Palazzo Pitti in via Romana.

Infine, nella seconda metà dell'800 venne fondato l'attuale Osservatorio Astrofisico, ora riunito con gli altri Osservatori italiani nell'Istituto Nazionale di Astrofisica – INAF.



Veduta dell'Osservatorio di Arcetri attorno al 1990

Da molti anni ormai è impossibile eseguire da Arcetri osservazioni di buona



qualità scientifica, a causa dell'inquinamento atmosferico e della vicinanza con la città. Arcetri e l'INAF, insieme con altri partner internazionali, hanno appena inaugurato il Grande Telescopio Binoculare (LBT) in cima al Monte Graham nel deserto dell'Arizona.



Veduta esterna della "cupola" di LBT



Veduta interna con LBT in primo piano

Si tratta di uno strumento tra i più avanzati, con due specchi gemelli con un diametro di 8.4 metri ciascuno.



The VLT Array on the Paranal Mountain

ESO PR Photo 14a/10 (24 Nov 2010)

© European Southern Observatory



Le quattro “cupole” del Very Large Telescope dell’E.S.O.

L’Italia è anche membro dello European Southern Observatory – ESO, che gestisce un insieme di telescopi di grande diametro nel deserto del Cile settentrionale.

Gli oggetti celesti emettono radiazione elettromagnetica a tutte le lunghezze d’onda dello spettro, non soltanto nella banda visibile. In particolare le onde radio sono le uniche, insieme con la luce visibile, che possono essere osservate da terra attraverso l’atmosfera, grazie a sistemi di radiotelescopi come il Very Large Array nel New Mexico.



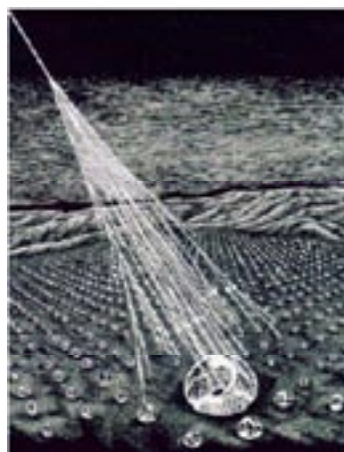
Il sistema di radiotelescopi del VLA



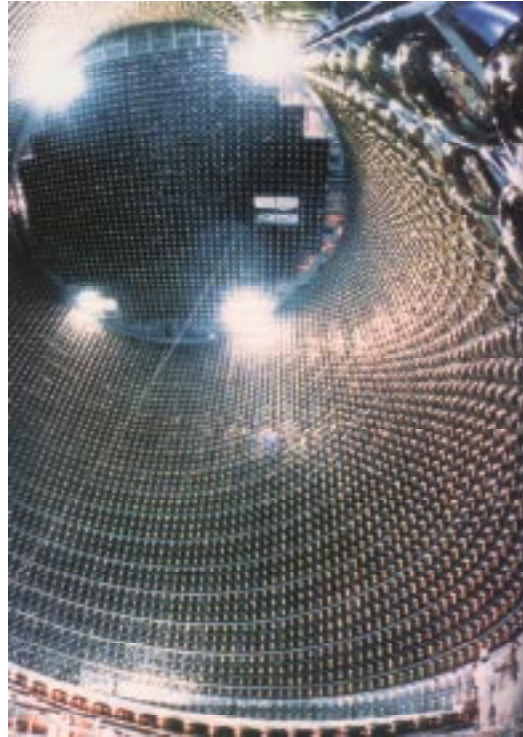
Lo Hubble Space Telescope

Al di fuori della banda visibile e di quella radio, l'atmosfera è opaca alle onde elettromagnetiche, e per eseguire osservazioni è inevitabile ricorrere a satelliti artificiali.

Ma le onde elettromagnetiche non sono gli unici messaggeri inviati dai corpi celesti. Gli scienziati si stanno attrezzando per rivelare altri tipi di segnali, per esempio raggi cosmici (nuclei atomici di materia ordinaria, accelerati fino a quasi la velocità della luce da meccanismi ancora non chiari); neutrini (particelle subatomiche emesse durante le reazioni di fusione nucleare); onde gravitazionali (oscillazioni dello spazio-tempo generate da masse in movimento, previste dalla teoria della relatività).



Rappresentazione artistica di uno sciame iniziato da un raggio cosmico; i rivelatori a terra sono gli elementi costitutivi dell'esperimento Auger, in Patagonia



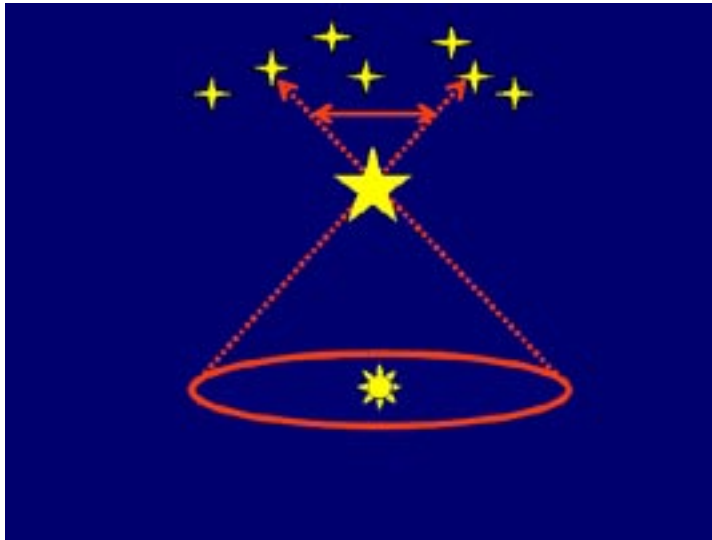
Interno del rivelatore di neutrini Super-Kamiokande, in Giappone



*I due bracci del rivelatore di onde gravitazionali VIRGO (INFN-CNES)
a Cascina (Pisa)*



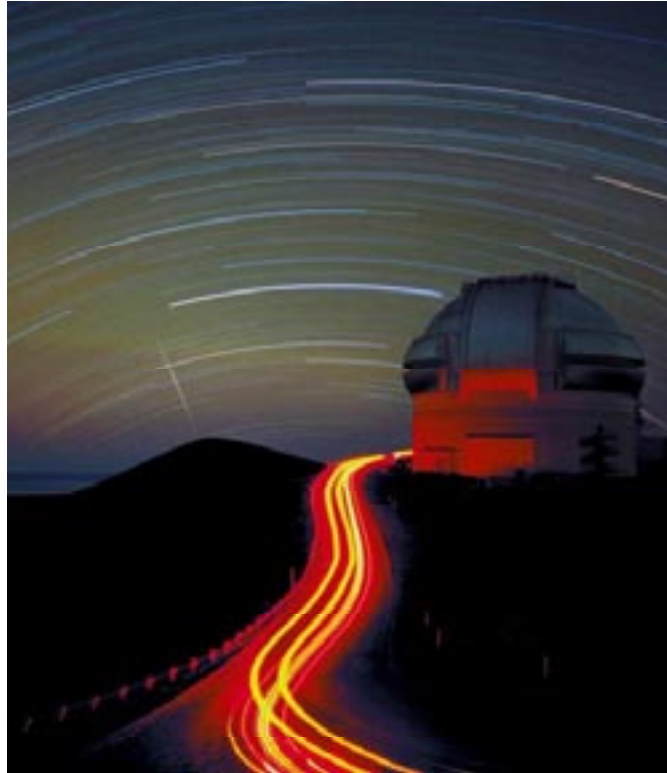
Dobbiamo ora introdurre alcune definizioni. Le distanze degli oggetti astronomici sono talmente grandi da essere misurate in unità particolari. L'anno luce è la distanza percorsa dalla luce in un anno, ovvero circa diecimila miliardi di chilometri, 10¹⁸ cm. Si usa più spesso il parsec, che è la distanza alla quale il raggio dell'orbita della Terra attorno al Sole sottende un angolo di un secondo d'arco.



Schema per la definizione della parallasse annua di una stella

Il termine viene da “PARAllasse di un SECondo”; un parsec è uguale a circa 3 anni luce. Per distanze ancora maggiori si usano i multipli kiloparsec, Megaparsec, Gigaparsec. Siccome la luce viaggia a una velocità limitata, e un segnale ancora più veloce non esiste, gli oggetti lontani ci appaiono come erano nel passato: guardare lontano equivale a guardare indietro nel tempo, un oggetto distante un Gigaparsec ci appare come era tre miliardi di anni fa.

Ora siamo sufficientemente attrezzati per compiere il nostro viaggio astronomico. Per prima cosa alziamo gli occhi verso il cielo notturno.



Il movimento apparente del cielo trasforma le immagini delle stelle in archi di circonferenza.

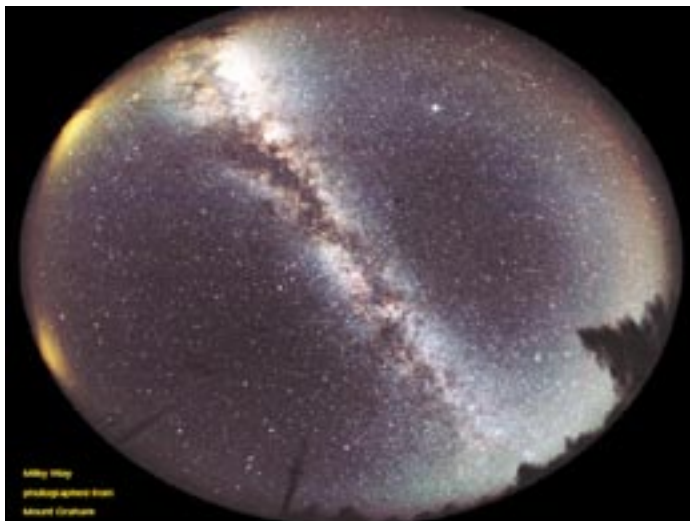
Tutto quello che si vede a occhio nudo (tranne le nubi di Magellano e la nebulosa di Andromeda) sono stelle appartenenti alla nostra Galassia, distanti poche decine di parsec. Per nostra fortuna esistono oggetti ben più spettacolari e affascinanti delle stelle, come ad esempio le nebulose planetarie (esse sono il risultato della violenta espulsione degli strati esterni di una stella vecchia).



La Helix Nebula vista da HST

La Galassia alla quale apparteniamo è un disco con un diametro di circa cento mila anni luce, a queste distanze le singole stelle non si possono distinguere a occhio nudo e ci appaiono come una striscia lattiginosa, chiamata dagli antichi Via Lattea.

La Via Lattea è solo una delle molte galassie esistenti nell'Universo. Andromeda è una delle più vicine, a circa due milioni di anni luce.



La Via Lattea vista da Mount Graham



La Galassia di Andromeda

All'occhio nudo appare come una macchia indistinta, ma il telescopio permette di riconoscere le singole stelle. Galassie di tutte le forme riempiono l'Universo fino a molti miliardi di anni luce da noi.

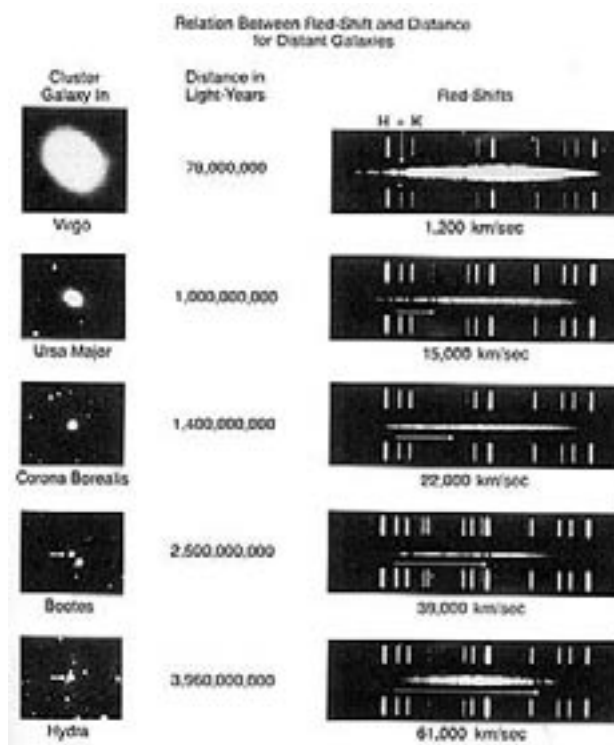


Il Deep Field di HST



Tra le molte cose nuove apprese dalla osservazione delle galassie lontane, la più sorprendente e importante è quella illustrata nella figura che segue.

Lo spettro emesso dalle galassie, come quello delle stelle che le compongono, contiene alcune righe, caratteristiche degli elementi chimici più abbondanti; ebbene, quanto più una galassia è lontana, tanto più le righe del suo spettro sono spostate verso il rosso rispetto alle stesse righe misurate in laboratorio.



Galassie via via più deboli (e lontane) mostrano la doppia riga in assorbimento a lunghezze d'onda via via più rosse.

Lo spostamento verso il rosso è indicato con il simbolo z , pari al rapporto tra la lunghezza d'onda della riga osservata nella galassia e quella misurata in laboratorio, diminuito di 1. La legge di proporzionalità tra distanza e *redshift* è nota come legge di Hubble, dal nome dello scopritore.

La prima interpretazione possibile della legge di Hubble è che il *redshift* sia dovuto all'effetto Doppler, cioè al moto di allontanamento delle galassie le une dalle altre. In questa interpretazione, finché $z \ll 1$ la velocità di



allontanamento è circa cz , con c la velocità della luce. Quando z supera 1 e tende a infinito, occorre usare le formule della relatività speciale, e si trova che la velocità di allontanamento tende a c . Vedremo in seguito che in realtà questa interpretazione cinematica non è corretta; essa è comunque sufficiente per svolgere alcune considerazioni.

In formule la legge di Hubble si scrive $D = H v = H cz$, e la costante di proporzionalità H è detta costante di Hubble. Allora la quantità $1/H = cz/D$ è la stessa per tutte le galassie, ha le dimensioni fisiche di tempo, e vale (incluso gli effetti della decelerazione) circa 14 miliardi di anni.

Quattordici miliardi di anni fa tutte le galassie erano concentrate in un punto di altissima densità. Da allora esse si allontanano con diverse velocità ma, essendo partite tutte assieme, ciascuna ha percorso una distanza proporzionale alla sua particolare velocità. Quell'istante iniziale è il Big Bang, e segna la nascita dell'Universo, o almeno di quella parte di Universo che noi possiamo osservare.

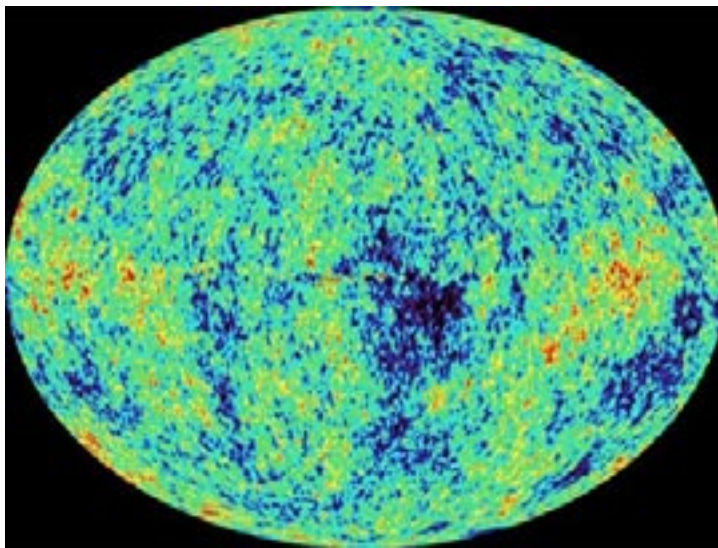
Se tutto è iniziato 14 miliardi di anni fa, la luce che ora ci arriva da un qualsiasi corpo celeste non ha potuto viaggiare per più di 14 miliardi di anni, quindi non possiamo osservare corpi celesti più distanti di 14 miliardi di anni luce. Questa distanza è la posizione attuale del cosiddetto orizzonte. Possono certo esistere corpi celesti ancora più lontani, ma la loro radiazione non ha ancora avuto il tempo di viaggiare fino a noi. Siccome l'espansione dell'Universo decelera (ma non è detto che decelererà per sempre!), mentre la luce viaggia sempre con velocità c , il nostro orizzonte ingloba porzioni sempre maggiori di Universo, e un numero sempre maggiore di oggetti lontani diventano visibili.

Gli oggetti che ora sono esattamente all'orizzonte hanno *redshift* infinito. Le galassie più lontane che riusciamo a osservare hanno *redshift* circa 7, e sono distanti circa 13.4 miliardi di anni luce. Cosa è successo nei primi 600 milioni di anni di vita dell'Universo? cosa è successo a *redshift* compresi tra 7 e infinito? Quello che vediamo è che a $z = 7$ le galassie sono ancora molto rare, evidentemente la maggior parte di esse non si è ancora formata, e così indietro nel tempo l'Universo è ancora ricco di gas diffuso, povero di stelle e galassie, e buio.

Però c'è un segnale che viene da distanze ancora maggiori: se osservato con



gli strumenti opportuni, l'Universo mostra di emettere da tutte le direzioni, con una uniformità quasi completa, una radiazione di lunghezza d'onda inferiore al centimetro, nella banda delle microonde, come quelle emesse da un corpo a 2.73 gradi al di sopra dello zero assoluto. Questo fondo cosmico di microonde ha *redshift* circa 1000, è stato emesso quando l'Universo aveva solo 400 mila anni, ed è la sorgente più lontana da noi e più vicina al Big Bang che noi possiamo osservare direttamente.



*Il fondo cosmico a microonde visto dal satellite WMAP.
Le differenze di colore corrispondono a differenze di intensità.*

Siamo giunti ai confini dell'Universo visibile, è ora tempo di raccogliere tutte le tessere del mosaico e provare a comporre in un quadro che abbia senso. Dobbiamo innanzitutto metterci nella giusta prospettiva: finora abbiamo interpretato il *redshift* degli oggetti lontani come un movimento di allontanamento: in realtà le galassie non si muovono, è lo spazio in cui esse si trovano che si espande, come un pallone che venga gonfiato. Il movimento fisico rispetto allo spazio (delle galassie, dei raggi cosmici, o della luce) avviene a velocità che non possono comunque superare c ; l'espansione dello spazio, invece, può essere arbitrariamente veloce.

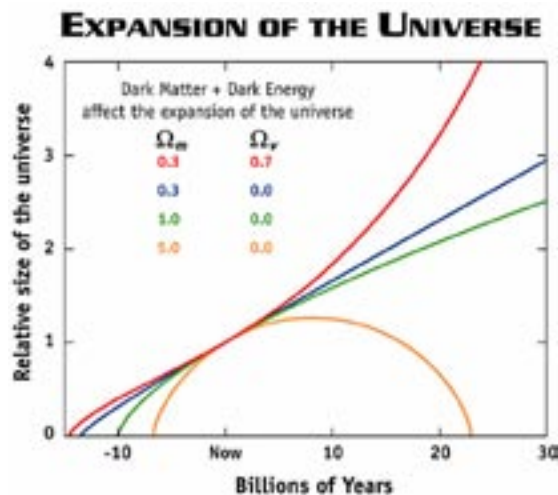
L'espansione è infinitamente veloce al Big Bang, e poi rallenta



progressivamente a causa della attrazione gravitazionale che la materia esercita su se stessa (ci sono stati, e forse ci saranno ancora, intervalli di tempo in cui l'espansione in realtà accelera, ma il quadro generale rimane valido). La luce inviata nella nostra direzione da un qualsiasi oggetto cosmico deve quindi "arrancare" contro lo spazio che si espande, come un nuotatore che debba avanzare contro la corrente di un fiume più o meno impetuoso. La competizione tra la velocità (costante) del segnale luminoso e quella (variabile) dello spazio determina la posizione dell'orizzonte che limita le nostre osservazioni.

Inoltre, il pallone che abbiamo usato come esempio si espande nello spazio a tre dimensioni. L'Universo invece non si espande in uno spazio preesistente, l'Universo è lo spazio. Come non c'è spazio "attorno" all'Universo, così non c'è tempo "prima" del Big Bang. Spazio e tempo nascono al Big Bang insieme con la materia e con la luce.

Questa descrizione qualitativa può essere messa in formule, utilizzando la teoria della relatività generale di Einstein. A seconda delle proprietà che assumiamo per la materia e la radiazione che riempiono lo spazio, otteniamo diversi risultati per l'evoluzione dell'Universo.



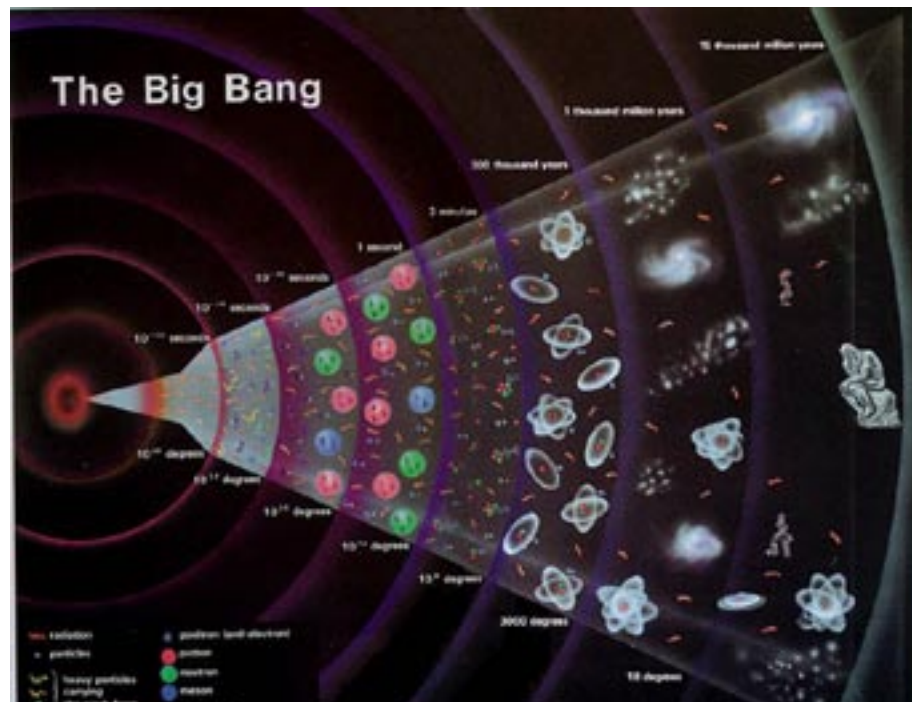
Vari modelli di Universo, con la stessa costante di Hubble al tempo presente.
La curva più alta corrisponde al modello più verosimile.

Ovviamente, il momento presente è quello su cui abbiamo meno incertezze, quindi tutte le curve evolutive hanno al momento presente la stessa pendenza



(cioè la stessa costante di Hubble). La curva che meglio rappresenta le nostre attuali conoscenze è quella più alta, che nel passato incrocia lo zero (Big Bang) circa 14 miliardi di anni fa. L'Universo è partito a velocità infinita (la curva nello zero è verticale) ed è andato rallentando finora; da adesso in poi, se prendiamo per buone le osservazioni che segnalano la presenza della cosiddetta "energia oscura", l'espansione andrà gradatamente riaccelerando, come sotto l'effetto di una molla compressa e rilasciata.

Proviamo a riassumere in poche parole tutta la Cosmologia implicita in questa curva evolutiva. L'Universo inizialmente è molto caldo e quasi completamente uniforme. Nonostante l'espansione, a $t = 3$ minuti e $z = 1010$ si formano alcuni nuclei atomici (elio etc.). L'espansione raffredda e diluisce (su grande scala), la gravità concentra e riscalda (su piccola scala). A $t = 400$ mila anni, $z = 1000$, la temperatura è scesa a circa 3 mila gradi, e protoni ed elettroni si ricombinano per formare atomi di idrogeno. La materia non più carica elettricamente diventa trasparente alla radiazione di fondo, che da allora in poi viaggia indisturbata, raffreddandosi e spostandosi verso il rosso in accordo con l'espansione dell'Universo. Essa porta fino noi, sotto forma di minute deviazioni rispetto alla completa uniformità, l'impronta degli addensamenti che poi diventeranno galassie e ammassi di galassie. Il periodo "buio" e "tranquillo" che abbiamo individuato tra $z = 1000$ e $z = 7$, tra $t = 400$ mila anni e $t = 600$ milioni di anni, è il periodo di gestazione durante il quale quegli addensamenti crescono ed evolvono fino a fabbricare stelle e a produrre gli splendori che ora vediamo.



“Vista d’insieme” dell’Universo.
 La scala radiale superiore dà il tempo trascorso dal Big Bang,
 quella inferiore la temperatura media.

Ora capiamo che il fondo cosmico di microonde è come una cortina di nebbia che ci impedisce di distinguere gli oggetti restrostanti, ma la materia, la sua composizione, e la sua distribuzione in posizione e velocità “attraversano” quella cortina e portano informazioni anche sui primissimi istanti successivi al Big Bang. La storia è ancora incompleta, ma quello di cui siamo ragionevolmente sicuri è più che sufficiente a farci pensare.

Marco Salvati