

Breve resoconto dell'Incontro Interdisciplinare del 15 dicembre 2025

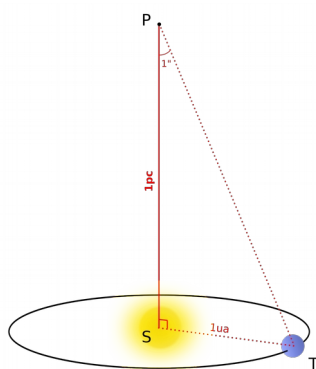
a cura di fra Sergio Parenti O.P.

LONGO - La cosmologia è una delle branche più importanti dell'astrofisica contemporanea e si occupa della geometria e dell'infinità dell'universo. Il cielo stellato per tanti secoli è stato oggetto di grande discussione su cosa fossero questi luminari del cielo: il Sole, La Luna, le stelle, la Via Lattea. Le varie culture hanno sempre osservato il cielo, ma da Galileo in poi dall'osservazione ad occhio nudo si è passati all'uso degli strumenti, scoprendo oggetti che ad occhio nudo non erano visibili e portando ad una descrizione diversa dell'universo dal punto di vista matematico.

Il cielo è fatto di stelle, poi ci sono le galassie che sono aggregati di cento miliardi ed oltre di stelle. Noi siamo nella Via Lattea, un poco alla periferia della galassia: la zona dove si formano le stelle nuove. Ci sono galassie di vario tipo: ellittiche, a spirale, lenticolari, ... Lo studio dell'universo lontano ci fa vedere come si distribuiscono le galassie nell'universo.

Da poco è stato lanciato un nuovo satellite dell'ESA, chiamato Euclid, per studiare la struttura e la geometria dell'universo. Tutte queste osservazioni ci portano ad un universo che cresce e si espande nel tempo. Cosa vuol dire che l'universo è infinito o ne conosciamo la geometria? L'oggetto più distante da noi mai mandato dall'umanità è la sonda Voyager, inviata nel 1977, che è appena uscita dal sistema solare. Come calcolare le distanze in astrofisica? La Luna dista circa 384400 chilometri (circa un secondo luce): circa mille volte la distanza della stazione orbitante (circa 400 km.). La distanza Terra - Sole sono circa 150 milioni di chilometri, la distanza della Terra da Giove sono circa 588 milioni di km., le dimensioni del sistema solare più basse sono circa 18,7 miliardi di km. Conviene quindi usare altre unità di misura: il tempo che la luce impiega. La Terra dista dal Sole 8,3 minuti luce, la distanza della Terra da Giove sono 32 minuti luce, le dimensioni del sistema solare sono 17 ore luce. La sonda Voyager è stata lanciata quasi 50 anni fa ed è appena arrivata alla fine del sistema solare, quando la luce ci mette 17 ore.

La Via Lattea e le galassie a noi vicine (la Grande Nube di Magellano, la Piccola Nube di Magellano, la galassia di Andromeda, che è a noi gemella) quali distanze hanno? La stella a noi più vicina, Proxima Centauri, è a 4 anni luce. Bisogna usare allora una nuova unità di misura, il parsec, che è la distanza di una stella che si vede, passando 6 mesi dell'orbita della Terra attorno al Sole, proiettata nel cielo a circa un secondo d'arco.



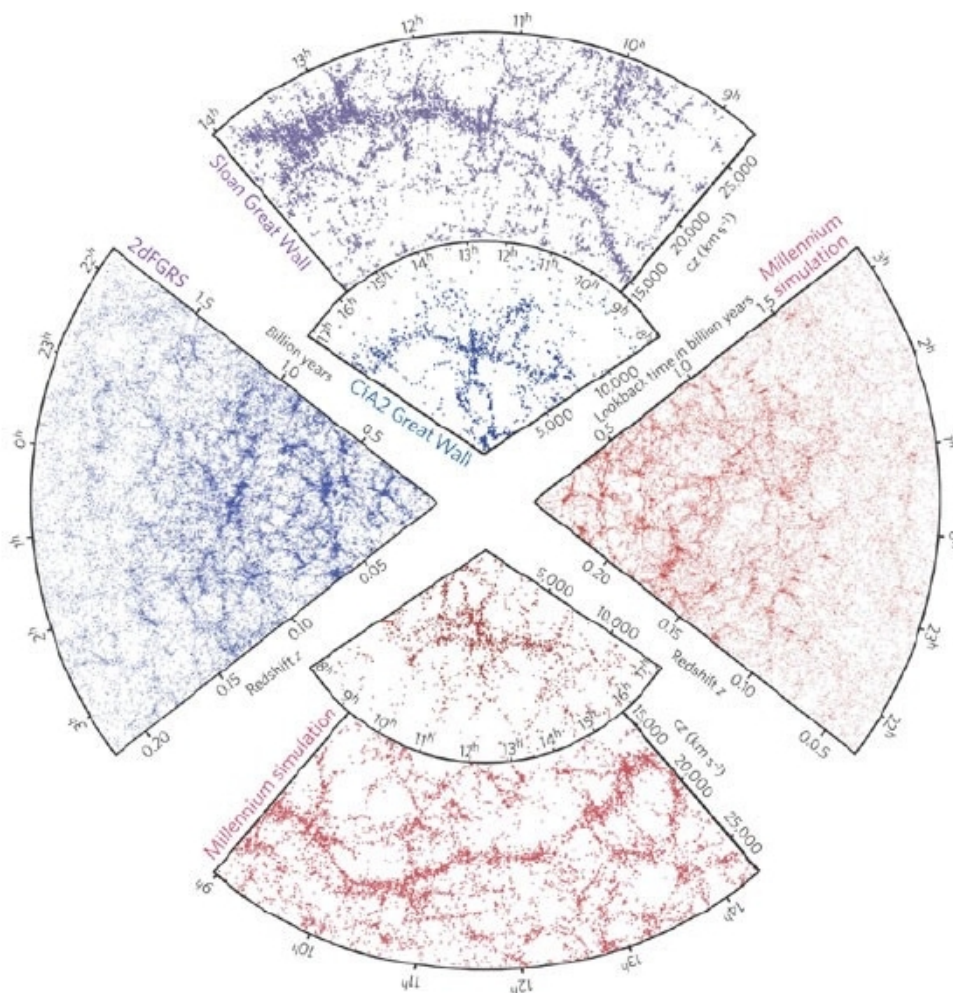
(1ua [unità astronomica] = distanza media Terra-Sole; da Wikipedia)

Un parsec sono 3,6 anni luce. Il centro della galassia sta a circa 8000 pc (25000 anni luce), le galassie vicine stanno a noi a 48000 pc, la galassia di Andromeda sta a noi a 78 kpc, cioè 2.54 milioni di anni luce; e queste sono le galassie a noi vicine: quanto grande sta diventando l'universo!

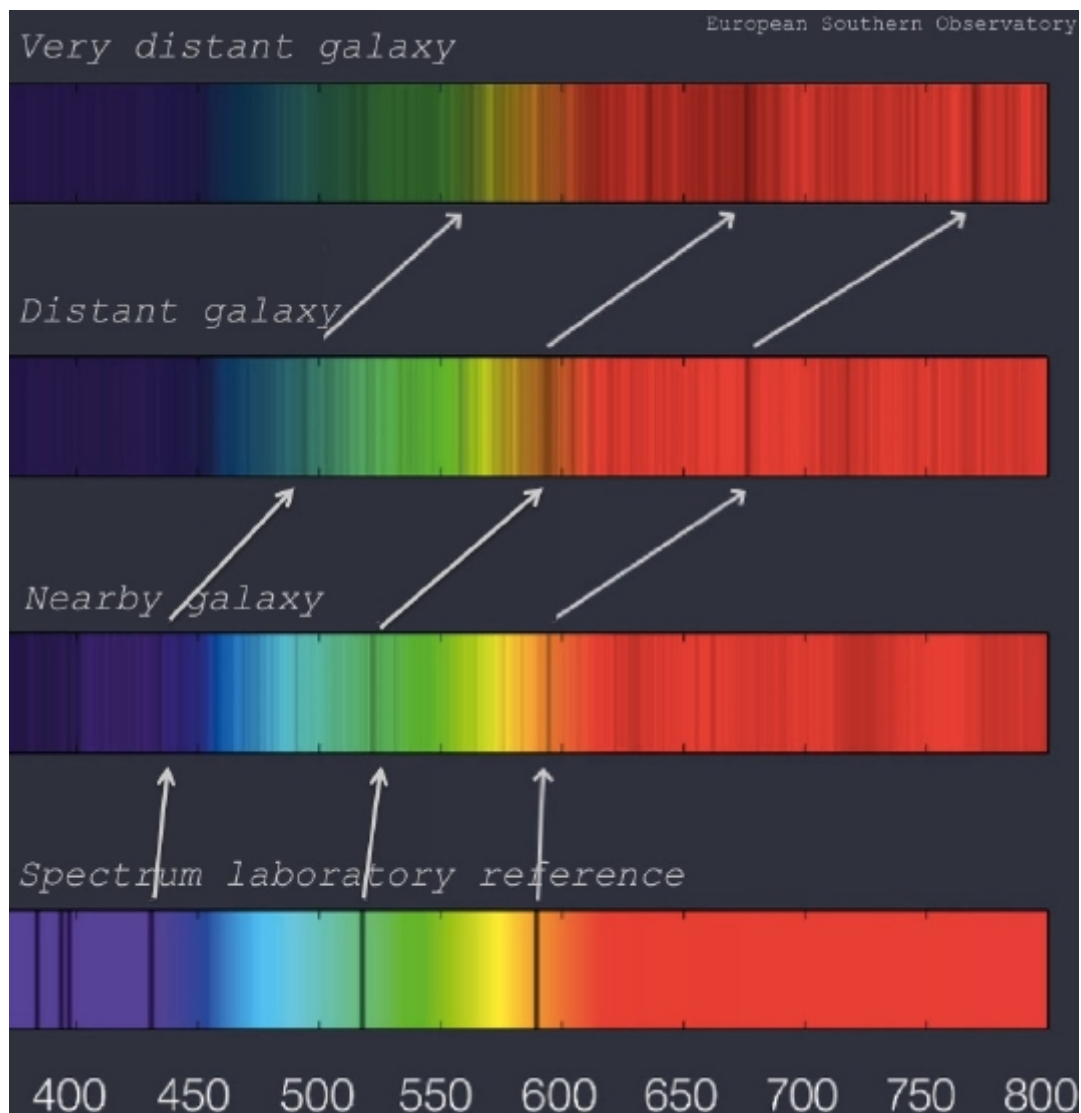
Le galassie non stanno da sole, ma sono in “ammassi” legati gravitazionalmente. Gli ammassi sono di dimensioni diverse. La Via Lattea, con la galassia di Andromeda, quella a Triangolo ed altre, fa parte di un piccolo ammasso che fa parte del super-ammasso della Vergine. Le dimensioni del gruppo locale sono 5 milioni di parsec. Le dimensioni del super-ammasso della Vergine sono 16 megaparsec (milioni di parsec).

Ma queste sono solo le dimensioni dell'ammasso di cui facciamo parte. Per capire le dimensioni dell'universo dobbiamo capire che cosa voglia dire “mappare”, disegnare dove sono gli ammassi di galassie.

In questo disegno, dove si cominciano ad evidenziare strutture di frattali, nella parte in blu ci sono osservazioni degli ammassi a noi vicini, mentre in rosso ci sono le simulazioni numeriche di come l'universo si sarebbe dovuto costruire sulla base di alcuni parametri fisici di cui vi dirò. Vedete la similarità tra le due descrizioni.



Dobbiamo cercare di capire come descrivere questo universo così grande in miliardi di anni. Hubble aveva visto che le galassie più sono distanti più velocemente si allontanano da noi. Oggi parliamo della legge di Hubble-Lemaître. Questa osservazione si fa sulla base del redshift.



Se si immagina che le galassie grosso modo emettano luce nella stessa maniera, come il suono di un'ambulanza si fa più grave quando si allontana da noi, le righe dello spettro della luce emessa dalle galassie si spostano verso il rosso. Più sono distanti, più velocemente si allontanano da noi e tra loro. Da qui l'ipotesi del Big-Bang. Sono come oggetti fermi su una superficie di un palloncino che però si espande nel tempo. L'universo si espande, aumenta lo spazio-tempo tra di essi, e lo spettro della luce emessa si sposta verso il rosso. Così utilizziamo il redshift della luce per misurare le distanze, confrontando le grandezze della luce emesse ed osservate.

Redshift = z ; lunghezza d'onda = λ ; frequenza = f

$$z = \frac{\lambda_{\text{obsv}} - \lambda_{\text{emit}}}{\lambda_{\text{emit}}} \quad \left| \quad z = \frac{f_{\text{emit}} - f_{\text{obsv}}}{f_{\text{obsv}}}$$

Ecco le dimensioni dell'universo in mega parsec ed in miliardi di anni luce (Gly):

$$z = 0.1 - 463.4 \text{ Mpc or } 1.512 \text{ Gly}$$

$$z = 0.5 - 2863.1 \text{ Mpc or } 9.338 \text{ Gly}$$

$$z = 1.0 - 6701.2 \text{ Mpc or } 21.857 \text{ Gly}$$

$$z = 5.2 - 49894.0 \text{ Mpc or } 162.734 \text{ Gly}$$

$$z = 12 - 130540.7 \text{ Mpc or } 425.770 \text{ Gly}$$

$$z = 1000 - 13946225.5 \text{ Mpc or } 45486.866 \text{ Gly}$$

Possiamo usare z come misura di distanza. A $z = 0.1$ siamo a circa un miliardo di anni luce di distanza da noi, e così via.

E possiamo misurare l'età dell'universo ed i tempi in miliardi o milioni di anni (year: yr)

$$z = 0.1 - 12.411 \text{ Gyr}$$

$$z = 0.5 - 8.628 \text{ Gyr}$$

$$z = 1.0 - 5.903 \text{ Gyr}$$

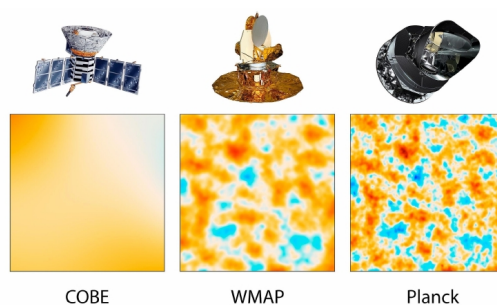
$$z = 5.2 - 1.129 \text{ Gyr}$$

$$z = 12 - 0.372 \text{ Gyr}$$

$$z = 1000 - 0.434 \text{ Myr}$$

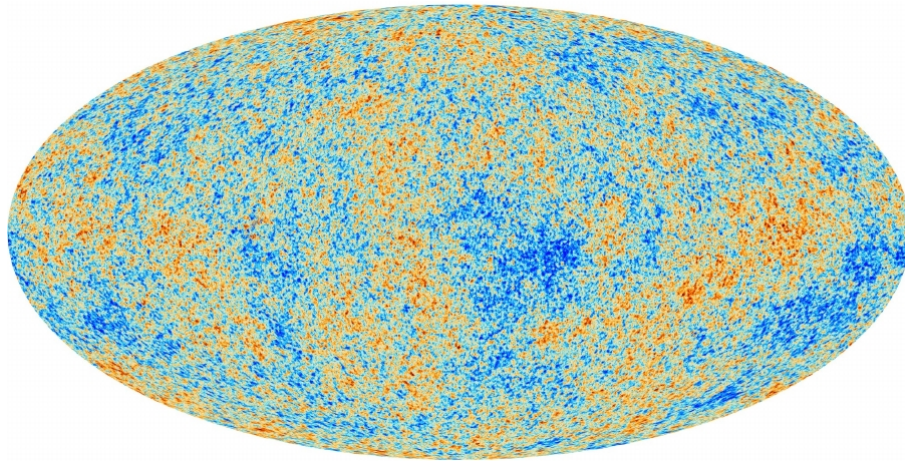
A $z = 1000$ l'universo aveva solo 420 milioni di anni. A $z = 12$ le galassie stanno a circa 425000 anni luce da noi. Allora l'universo aveva circa 0.3 miliardi di anni. Adesso l'universo ha circa 13 miliardi di anni: dunque quella luce poteva arrivare fino a noi. Questo vuol dire che l'universo si sta espandendo a velocità che supera quella della luce. Noi arriviamo a vedere fino a $z = 1000$, che è la radiazione di fondo, l'ultima visibile, scoperta per caso da Penzias e Wilson.

Questa radiazione permea l'universo e le sue variazioni di lunghezza d'onda sono talmente localizzate che sono state studiate dagli anni '80 (sonda COBE) fino al 2018 (sonda Planck).



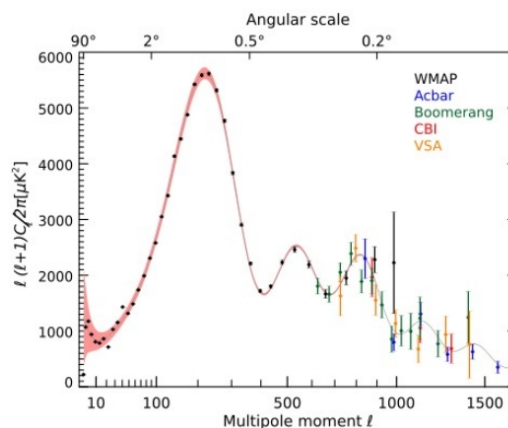
L'analisi della radiazione emessa quando l'universo aveva 0.4 miliardi di anni ci ha permesso di studiare la struttura dell'universo, mappare le anisotropie, mappare dove sono gli ammassi.

Abbiamo così la mappa dell'universo: ecco quella che ci offre la sonda Planck.



I colori rosso e blu fanno vedere le anisotropie; piccole differenze di lunghezza d'onda di una parte del cielo rispetto ad un'altra.

Così abbiamo le misure delle anisotropie della radiazione di fondo. Le curve che vedete qui sotto segnano la distanza angolare delle anisotropie ed hanno una grande importanza. Le sonde WMAP e Planck ci danno una scala grande, ma abbiamo strumenti anche per misure a scale più piccole.



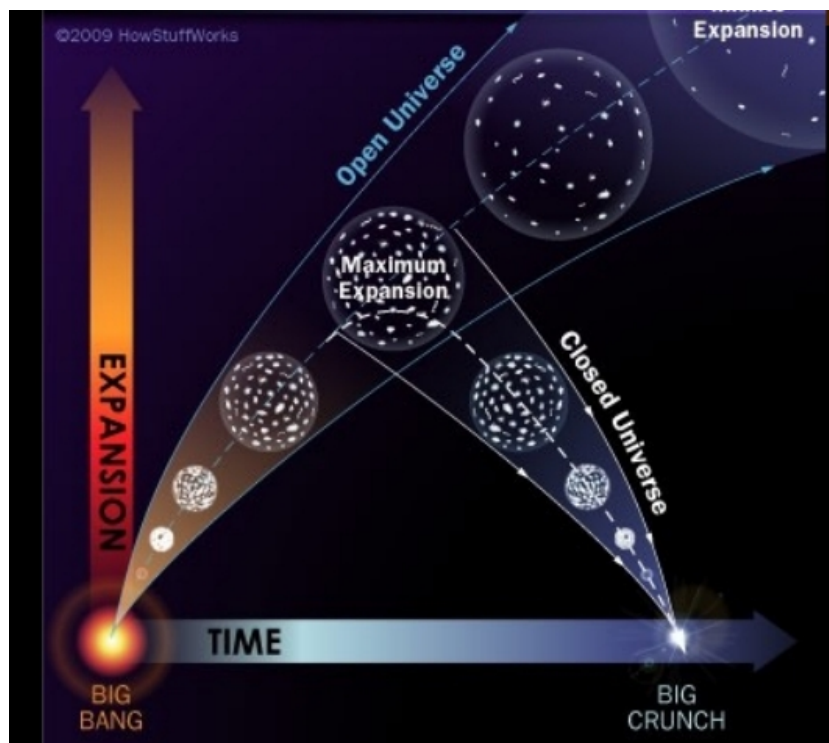
Tutto questo ci fa vedere la struttura del Big-Bang. Vediamo le radiazioni cosmiche di fondo, vediamo le prime stelle, le prime galassie, vediamo che l'universo si sta espandendo, al di là della legge di Hubble e Lemaître.

Lo vediamo dalla geometria dell'universo, in cui anche l'aspetto frattale diventa importante: lo vediamo dal rapporto della matematica con l'universo. La mente umana ha creato o scoperto una struttura matematica che poi è servita a capire l'universo, senza che questo fosse stato previsto prima.

Tutto parte dall'equazione della relatività generale di Einstein (con varie problematiche di cui potremo parlare poi). La parte a sinistra descrive la geometria dell'universo, la parte a destra descrive l'energia racchiusa nell'universo.

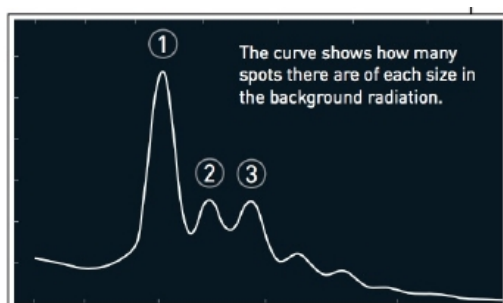
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Questa geometria è una geometria dello spazio-tempo e questi punti, dove misuriamo il tempo man mano che si espande la loro posizione relativa, ci danno la distanza media tra le galassie ed i loro super-ammassi in funzione del tempo rispetto a noi. Fra il Big-Bang (circa 13 miliardi di anni fa) ed il tempo 0 rispetto a noi, l'universo potrebbe aver avuto un big-crunch ritornando al Big-bang iniziale.



Possiamo studiare l'universo nel suo insieme e capire come si stia evolvendo. La radiazione di fondo ha circa 400000 anni, non è più in equilibrio termico e, poiché l'universo nel frattempo si espande, ha attualmente una temperatura di circa 2.7 kelvin, che è considerata come radiazione di corpo nero.

Le posizioni dei picchi nel grafico della scala angolare ci danno informazioni su quanta materia ordinaria ci sia (il 5% della materia-energia dell'universo) e quanta materia oscura (il 26%). Il primo picco ci dice pure che l'universo è piatto (euclideo) in espansione. E tutto il resto?

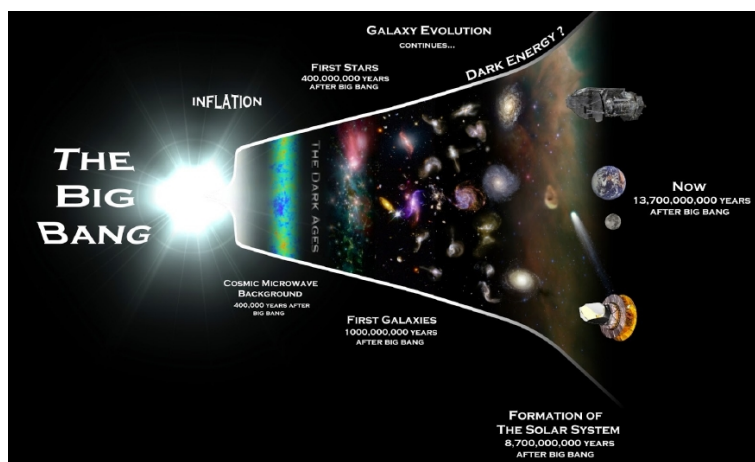


- ① The first peak shows that the universe is geometrically flat, i.e. two parallel lines will never meet.
 - ② The second peak shows that ordinary matter is just 5% of the matter and energy in the universe.
 - ③ The third peak shows that 26% of the universe consists of dark matter.
- From these three peaks, it is possible to conclude that if 31% (5%+26%) of the universe is composed of matter, then 69% must be dark energy in order to fulfil the requirement for a flat universe.

Il telescopio spaziale Euclid sta cercando una risposta dandoci una mappa dell'universo a $z = 2$, andando alla ricerca delle supernovae, in particolare quelle di tipo 1A: sono esplosioni che

avvengono quando una nana bianca (la fase finale dell'evoluzione di una stella come il Sole) esplode nei suoi strati superficiali per la materia che le cade addosso. Così uno vede che la luce emessa dalla supernova in diverse fasi della sua età sta mostrando che l'universo sta accelerando la sua espansione. Questa accelerazione non era prevista. Quindi l'energia oscura domina la densità dell'universo e ci saranno sempre più zone dell'universo che saranno irraggiungibili alla nostra osservazione, perché molto più distanti della distanza che la luce può percorrere per arrivare fino a noi.

Possiamo però fare simulazioni numeriche, sapendo come sarebbe un universo fatto solo di materia oscura, oppure anche con la materia normale ... Da qui si comprende come la struttura dell'universo sia frattale: essa viene dal bilanciamento delle componenti. La gravità attrae la materia oscura vicina (la materia oscura mantiene un effetto gravitazionale), Abbiamo così le prime stelle e la prima luce a 400000 anni.



Non possiamo osservare quanto avvenne prima, ma possiamo studiare le reazioni avvenute all'inizio dell'universo nei grandi acceleratori di particelle, come il Large Hadron Collider (LHC) del CERN a Ginevra. Così l'astrofisica e la fisica delle particelle si parlano.

Lo studio dell'universo può essere illustrato da questa immagine, dove noi siamo al centro, e vediamo andando indietro nel tempo fino alla struttura frattale ed alla linea rossa che rappresenta la radiazione di fondo.



Oltre c'è una parte non osservabile che però conosciamo perché la fisica resta la stessa che abbiamo noi. Oltre l'universo non è osservabile. In alcun modo.

JULVE - La mappa dell'universo con le anisotropie corrisponde ad un'immagine dell'universo di circa 13 miliardi di anni fa, quando l'universo diventa trasparente per il disaccoppiamento materia-radiazione. Tra 10 miliardi di anni, supponiamo, come si vedrà questo fondo di microonde? Perché l'immagine evolve nel tempo.

LONGO - Certo. Noi la vediamo a 2.7 kelvin, allora la si vedrà ad una temperatura più bassa. Tra dieci miliardi di anni vedremo la radiazione che potrà raggiungerci allora. Ci sarà la radiazione di fondo, ma la vedremo più fredda. Invece le anisotropie, che dipendono dal momento del disaccoppiamento, resteranno più o meno le stesse, anche se saranno più grandi per via dell'espansione dell'universo.

CASADIO - Praticamente per ogni galassia c'è un buco nero. Dunque il cielo è pieno di attrattori che tendono ad attrarre tutta la materia che riescono. La dinamica dell'universo porterà ad una rarefazione? Le anisotropie come resteranno le stesse?

LONGO - L'universo è dappertutto uguale, ma con queste anisotropie di struttura frattale. I punti dello spaziotempo sono i superammassi di galassie, che sono strutture gravitazionalmente legate. Le galassie che ne fanno parte si fonderanno, con i loro buchi neri. Nel frattempo lo spaziotempo si allarga senza fine e le strutture non legate gravitazionalmente si allontanano all'infinito. Noi vediamo solo una piccolissima parte dell'universo. La fisica abolisce le quantità infinite. Anche la densità infinita dei buchi neri è inesplorabile.

FACCHINI - L'impressione di immensità dell'universo è quello che ci pone domande.

LONGO - L'universo si espande a velocità che supera quella della luce. Gli oggetti che vediamo li vediamo dove erano. Guardando le stelle, guardiamo il passato. Le galassie che vediamo ora sono tanto lontane che la loro luce non potrà più raggiungerci.

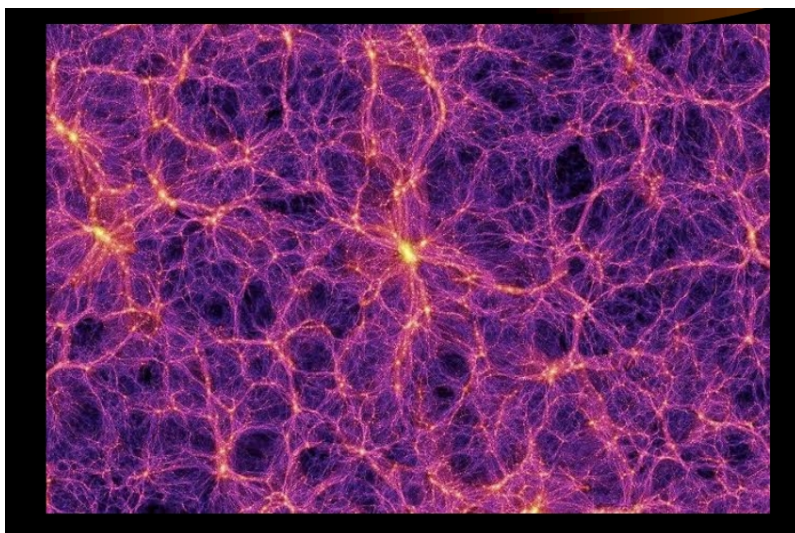
JULVE - L'universo visibile ha un numero molto grande, ma finito, di galassie. Col tempo questo numero diminuirà perché alcune usciranno dall'universo visibile.

LONGO - Penso di sì.

BERTUZZI - La struttura frattale mi sembra qualcosa che si autoriproduce. Come avviene nell'universo?

LONGO - Nelle immagini che vi ho mostrato delle simulazioni, il dettaglio ingrandito - probabilmente di una galassia supermassiva - fa vedere una struttura con una parte al centro presente un po' dovunque, anche in piccolo. Probabilmente se uno andasse ad ingrandire una parte ritroverebbe la stessa struttura che si replica.

Qualcuno è andato a cercarle nell'universo. Le simulazioni riproducono l'universo che osserviamo. Le simulazioni però non vengono fatte per imitare un universo osservato, ma vengono fatte in base alle equazioni di Einstein con i contributi di materia, materia oscura, ecc. Questo rende la cosa eclatante.



BERTUZZI - Ma l'universo dove si espande? C'è un di fuori oppure tutto quello che esiste fa parte dell'universo?

LONGO - Noi facciamo parte di una piccola zona dell'universo che si espande. Non vi ho parlato della "inflazione": l'universo all'inizio avrebbe avuto una espansione molto più rapida di quella che avrebbe avuto dopo. Noi facciamo parte di una piccola "bolla". Ma tutto l'universo c'è, anche se non potremo mai osservarlo. E l'universo non si espande in qualcosa d'altro: è lo spazio-tempo tra le galassie che si espande, come la superficie di un palloncino. Noi non possiamo immaginare qualcosa al di là delle tre dimensioni spaziali e della dimensione temporale. Questo rende non banali le nostre discussioni.

CASADIO - Se hai un frattale, hai una dimensione che dovrebbe autoriprodursi. Può dipendere dalla tua sensibilità (la scala della tua rappresentazione) l'impressione che ci sia anche nell'universo questa riproduzione?

LONGO - Attualmente la struttura dell'universo è così. Man mano che si espande, diventerà più grande. Sono strutture gravitazionalmente legate, mentre l'universo si espande al di là delle strutture gravitazionalmente legate.

PARENTI - La gravitazione abbraccia tutto l'universo o solo la parte a noi visibile?

LONGO - Abbraccia tutto l'universo nella parte dominata dalla materia (ordinaria, che emette luce, e oscura). L'energia oscura non ha effetti gravitazionali, ma semmai anti-gravitazionali.

CASADIO - Se ho capito, è stata mandata una sonda per studiare la materia oscura?

LONGO - Appunto: Euclid: per capire come evolve la struttura dello spazio-tempo nel tempo, guardando le galassie, e per scrutare l'energia oscura cercando le supernovae.

FACCHINI - L'inizio del sistema solare resta 4 miliardi di anni fa?

LONGO - Sì. Anche la teoria del Big-Bang resta quella: 13,7 miliardi di anni fa.

CASADIO - Quanto pesano queste realtà oscure sulla nostra quotidianità?

LONGO - Il fatto che ci siano componenti dell'universo così importanti e non ancora note dovrebbe stimolare la curiosità piuttosto che far pensare il contrario. Inoltre gli astronomi cercano di comunicare quello che studiano. Questo permette a tutti di avere il desiderio di studiare il cielo.

CASADIO - Ma energia e materia oscure quanto pesano nella mia fisica di tutti i giorni?

LONGO - Non pesano niente. Noi siamo fatti di materia ordinaria. La materia oscura ha su quella ordinaria effetti gravitazionali che esigono una densità che non c'è nelle vicinanze della Terra. Queste dimensioni cosmologiche hanno poco impatto su di noi, mentre lo hanno nello studio della grandezza dell'universo.

PARENTI - Aristotele criticava Platone, per il quale "infinito" era ciò cui non si poteva aggiungere più nulla, mentre per Aristotele è infinito ciò cui si può sempre aggiungere qualcosa. L'infinito Aristotele lo cerca nella divisibilità all'infinito della quantità in parti di essa. Questo gli permetteva di spiegare l'origine dei numeri naturali (che... sono infiniti!). Invece quando i teologi hanno applicato a Dio il nome "infinito" hanno dovuto parlare di "infinito in atto" per non attribuire l'infinito secondo Aristotele, che è sempre in potenza. I matematici, però, dicono di aver necessità di parlare di un infinito in atto. Mi pare che sant'Alberto Magno (e Tommaso lo segue) dica che un conto è il discorso logico, un conto il discorso reale. Quando il matematico dice che l'insieme dei numeri naturali è infinito in atto, considera "attuale" tutto ciò che è in astratto (ma "in astratto" nel senso di Aristotele) conoscibile. Quindi nella storia ci sono state molte discussioni che potevano essere evitate e ci hanno fatto perdere tempo. Adesso la fisica dà ragione ad Aristotele, anche se nasce da una fisica (galileiana) che voleva dare ragione a Platone. Uno dei nostri problemi dovrebbe essere quello dell'oggetto matematico, geometria compresa.