

COSMOLOGIA



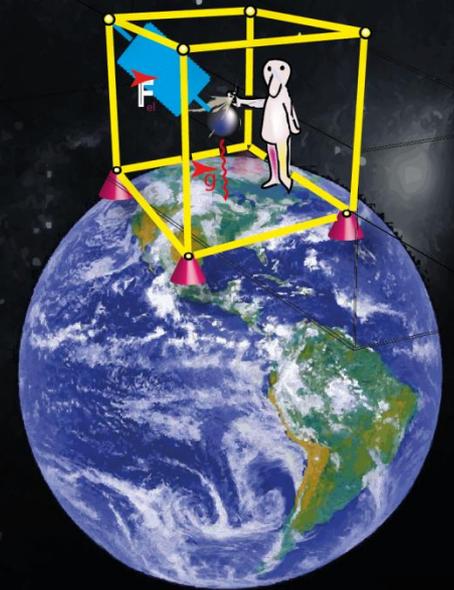
mc018

Mauro Carfora
Dipartimento di Fisica
Università di Pavia

La *Cosmologia*: Lo studio della struttura su grande scala dell' Universo e di cosa abbia generato i pianeti, le stelle e le galassie a partire dai campi di materia, ... l'origine della materia stessa ... la natura dello *Spazio* ... e del *Tempo* ...

Uno studio che Ha stimolato da sempre le grandi domande dell' Uomo ...

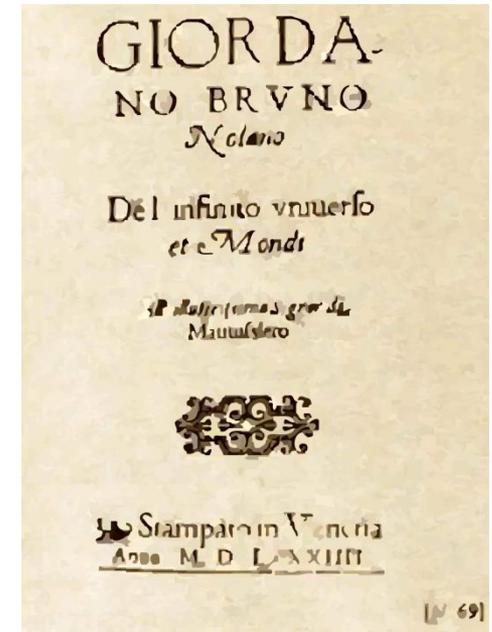
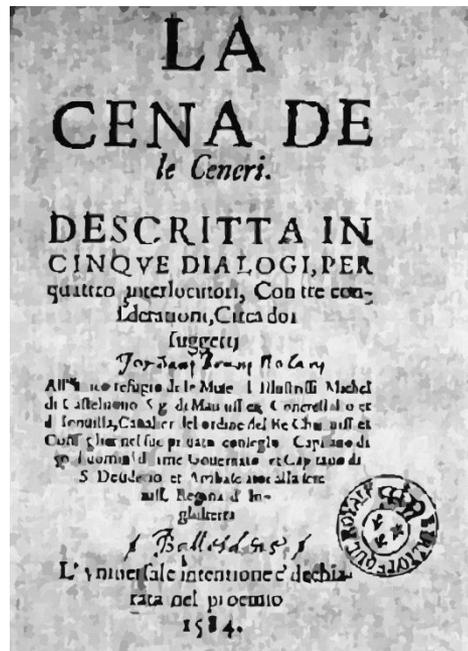
... Ma, da un punto di vista scientifico, nonostante gli sviluppi dell'astronomia dai tempi di Copernico, Galileo, Keplero e Newton...
... la *Cosmologia* è stata più speculazione che scienza fino ai primi decenni del XX secolo...



Un punto fondamentale in cosmologia ha sempre riguardato la distribuzione spaziale degli oggetti celesti al di là dei pianeti (per gran parte della storia umana, questo problema ha sostanzialmente riguardato le stelle).

- Mikolaj Kopernik (1473-1543)
(*De revolutionibus orbium coelestium*) le fissava, come Tolomeo e Platone, sempre su sfere cristalline, ma centrate sul Sole e non sulla Terra
In medio vero omnium residet Sol
- Thomas Digges (1546-1595)
A Perfit Description of the Caelestiall Orbes (1576) estese questa immagine considerando una distribuzione infinita di stelle che riempiva uniformemente tutto lo spazio.

- Anche Giordano Bruno (1548-1600)
La Cena de le Ceneri,
De l'infinito universo et mondi
 (1584) (indipendentemente) estese
 l'immagine copernicana come Digges
 inoltre considerò il Sole una stella come
 le altre.

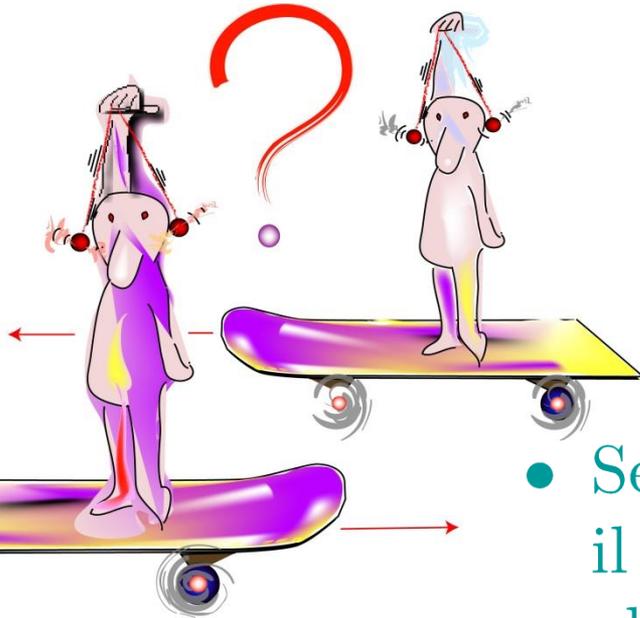




Una distribuzione infinita di stelle venne anche sostenuta da Newton che riteneva che un universo finito sarebbe collassato sul proprio baricentro in un'unica grande massa sferica. Viceversa una distribuzione infinita di massa avrebbe comportato solo collasi locali che sembravano spiegare anche la formazione del Sole e delle altre stelle. Un'idea, quest'ultima che lascia intravedere, in questo meccanismo una visione di un universo in evoluzione gravitazionale

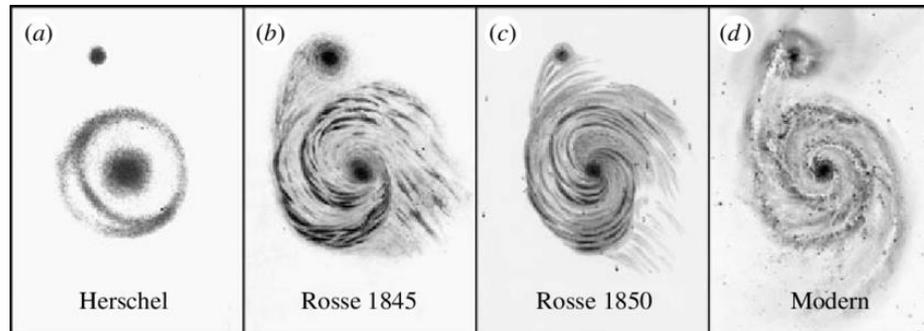
Tuttavia, la visione Newtoniana era quella di un universo (Euclideo) infinito uniformemente popolato di stelle e *statico*. Alla luce delle mutue interazioni gravitazionali sembra piuttosto strano ipotizzare questa staticità.

La meccanica Newtoniana mal si presta a fornire modelli cosmologici a meno di dare realtà alla nozione di *spazio assoluto* che in una situazione simmetrica (come in cosmologia) forza la quiete relativa delle stelle (galassie). In realtà le leggi della meccanica Newtoniana sono inapplicabili a distribuzioni infinite di massa, e l'idea Newtoniana di un universo statico è altrettanto problematica di quella di spazio assoluto.



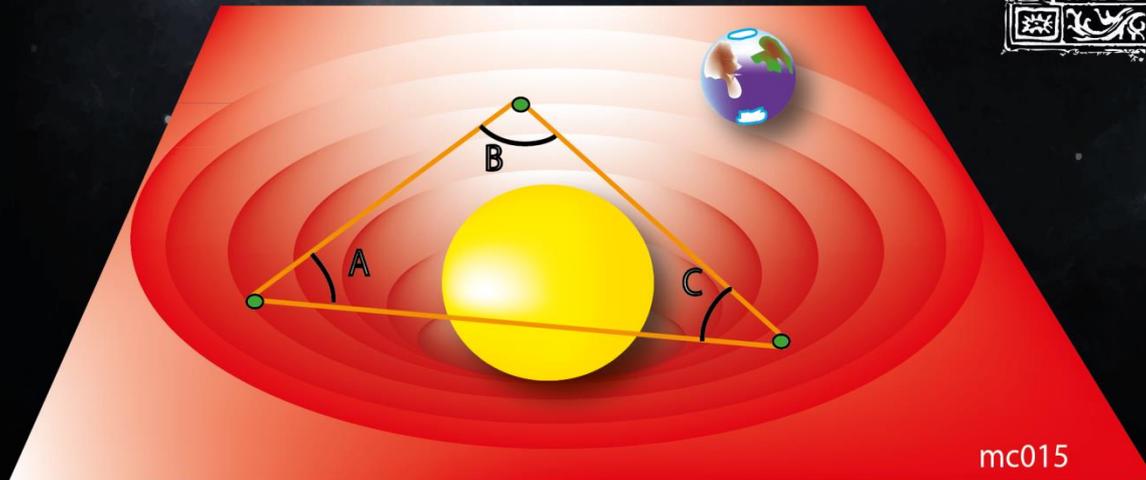
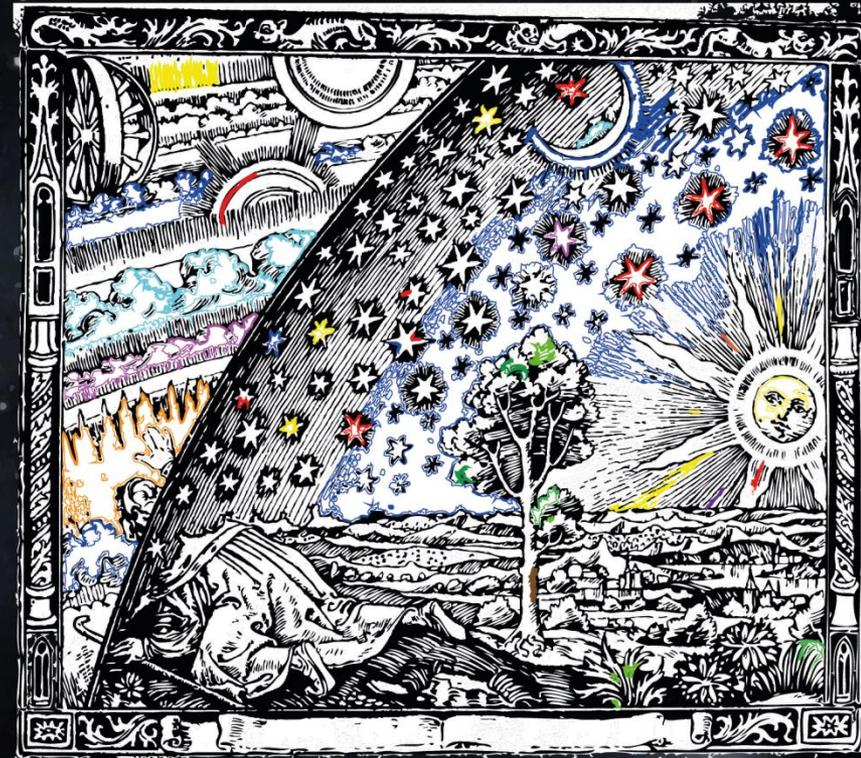
- Secondo la concezione Newtoniana il moto assoluto esiste ed è riferibile allo *Spazio Assoluto*

- Swedenborg, Lambert, Wright, Kant ...(\simeq 1750) si rendono conto della finitezza della nostra galassia e congetturano l'esistenza nello spazio di altri sistemi stellari, organizzati come la via Lattea: gli *Universi Isola*.
- I Candidati naturali erano alcune oggetti astronomici, dall'aspetto di agglomerati interstellari diffusi, le nebulose. Verso la fine del XVIII secolo (Messier, 1783) compaiono ricchi cataloghi di nebulose che si arricchiscono moltissimo nella prima metà del XIX secolo (Herschel, 1822).
- Tuttavia, le necessarie tecniche osservative si sviluppano ancora molto lentamente....

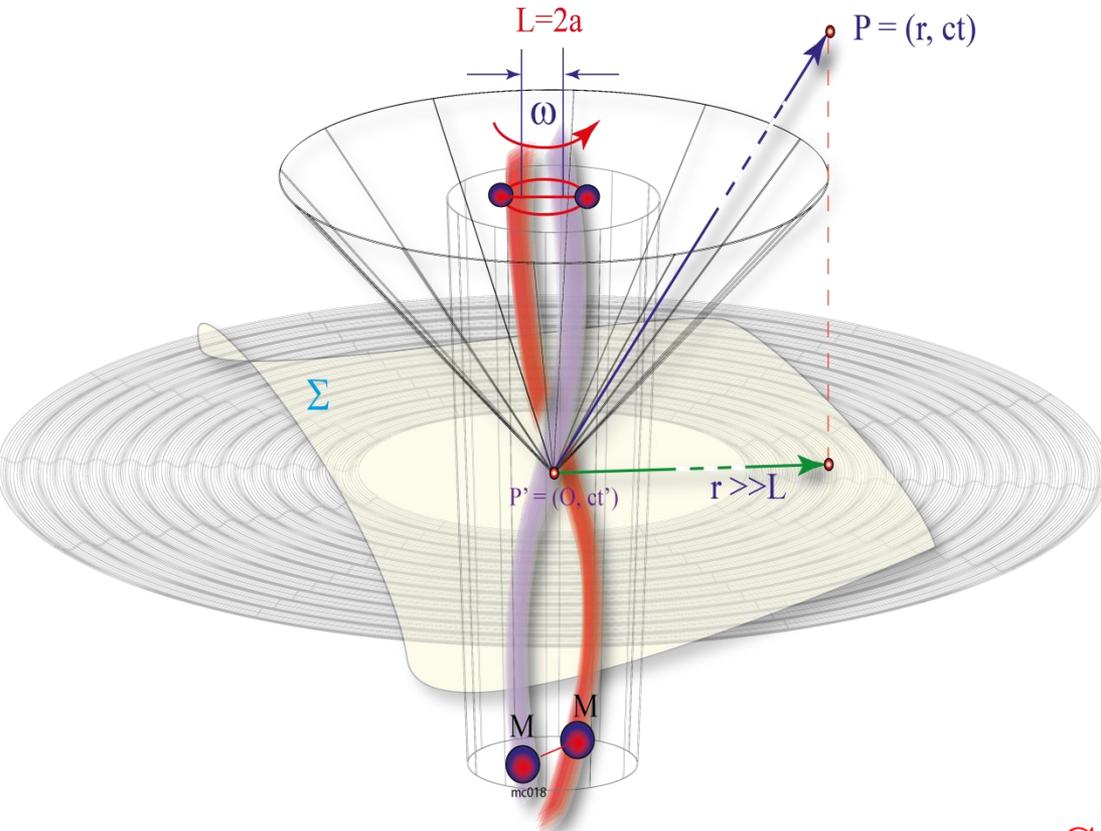


... I fatti osservativi fisicamente significativi erano pochi ed effettuati con strumenti non adeguati; le teorie, basate su queste scarse evidenze osservative, per quanto sofisticate non erano falsificabili ...

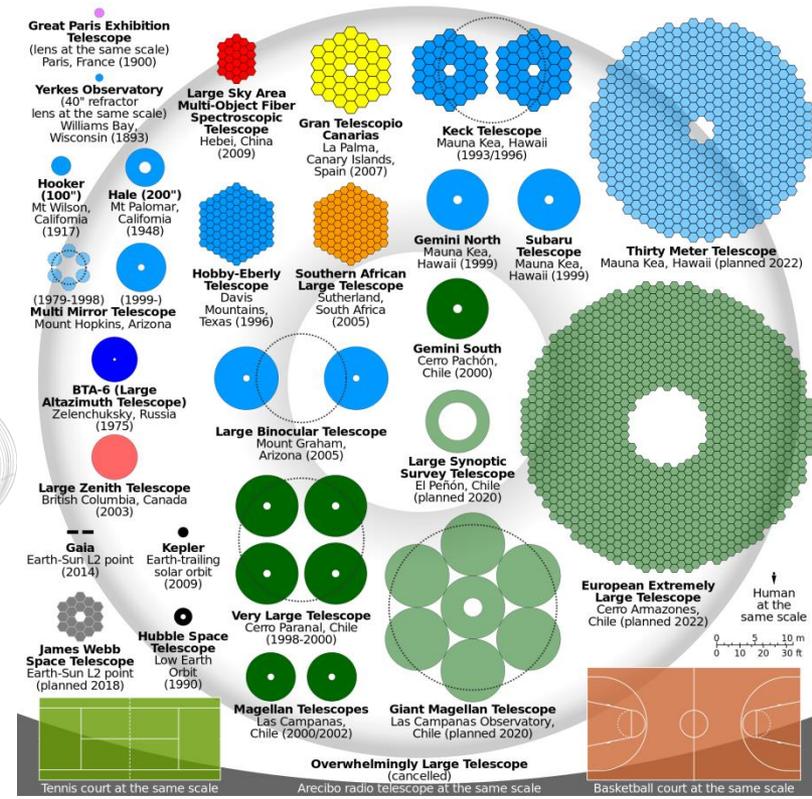
Cambiamenti radicali in questo stato di cose sono avvenuti solo con l'avvento dei grandi telescopi e con la Teoria della Relatività Generale di A. Einstein



I grandi telescopi, terrestri e spaziali, l'utilizzo dei satelliti dedicati all'osservazione cosmologica, la (prossima?) apertura di una nuova finestra osservativa legata alla rivelazione delle onde gravitazionali, gli sviluppi della fisica teorica, sono questi gli strumenti che rendono possibile l'analisi scientifica dell' Universo che sperimentiamo.



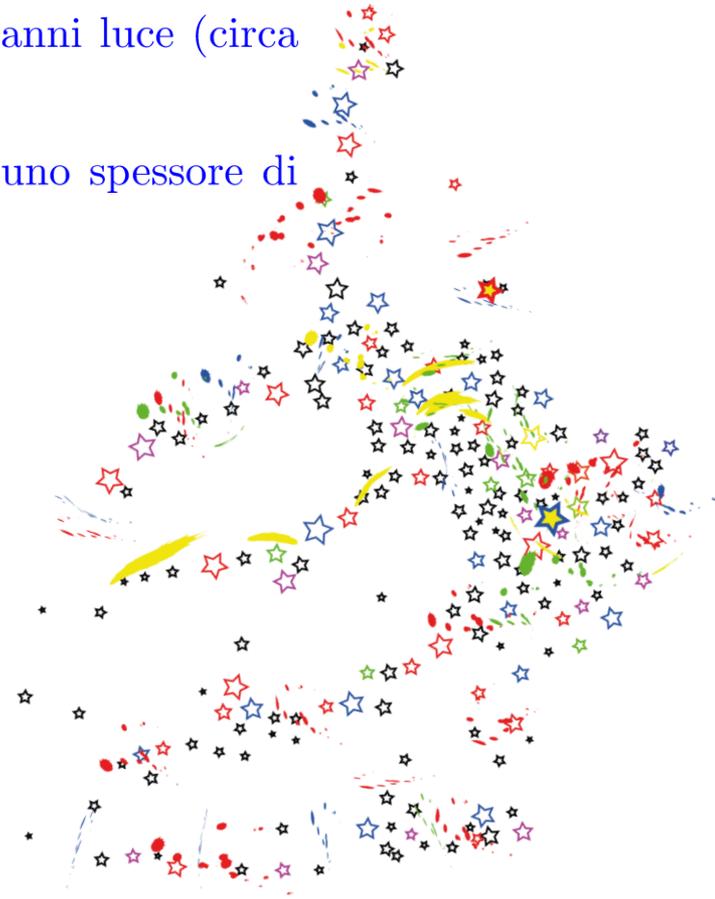
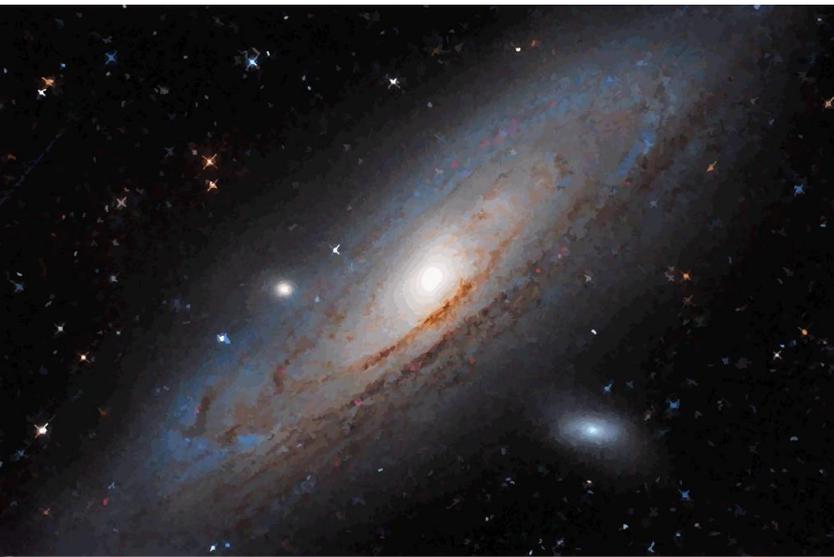
Onde Gravitazionali



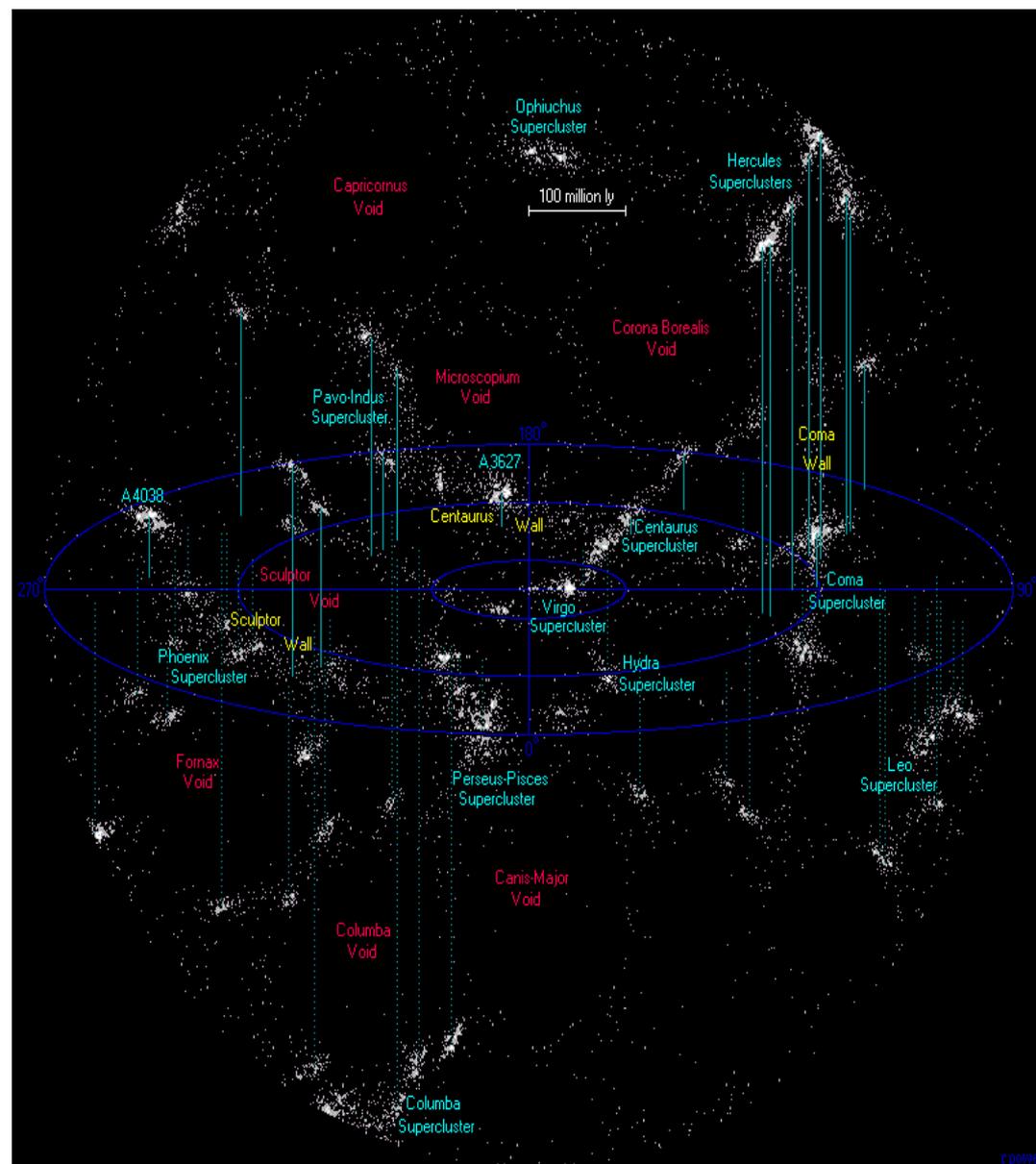
Specchi dei grandi telescopi

Uno Sguardo d'Insieme: ... Quello che vediamo ...

- Le stelle visibili a occhio nudo nella volta celeste sono circa 7000
- Una galassia ne contiene circa $10^{11} = 100\,000\,000\,000$
- In una galassia la distanze fra stelle è dell'ordine dei 10 anni luce (circa $10 \times 10\,000$ miliardi di chilometri)
- Una galassia tipica ha un raggio di 3×10^4 anni luce e uno spessore di $\simeq 10^3$ anni luce
- Due galassie vicine distano tipicamente 3×10^6 anni luce
- Si stima che il numero di galassie sia dell'ordine di 10^{11}



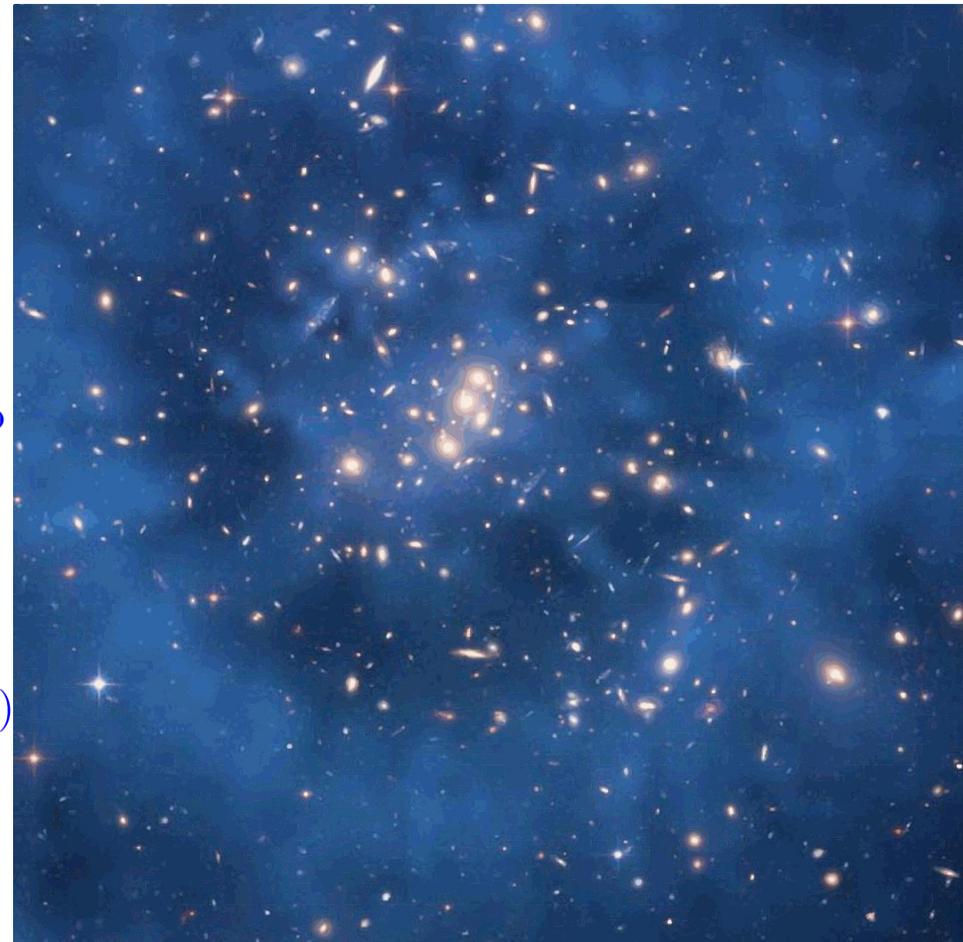
- Le Galassie non sono distribuite uniformemente nello spazio: Si riuniscono in piccoli gruppi e ammassi (clusters) con qualche eccezione (field galaxies).
- Gli ammassi possono contenere 1000, 10000 e anche più singole galassie legate dalla attrazione gravitazionale
- Gli ammassi a loro volta si organizzano in super ammassi (superclusters).
- Questo schema organizzativo sembra interrompersi a livello dei super ammassi cedendo il passo ad una struttura molto complessa, filamentosa e spongiforme:
- Gli ammassi sembrano formare catene che si riuniscono in nodi (centri di super ammassi) e danno luogo ad un reticolo cosmico le cui celle (di dimensioni di centinaia di milioni di anni luce) circondano immensi vuoti.
- ... e poi c'è una radiazione *fossile* che permea l' Universo: la radiazione cosmica di fondo (CMB: Cosmic Microwave Background)
- ... ma di questo parleremo dopo...

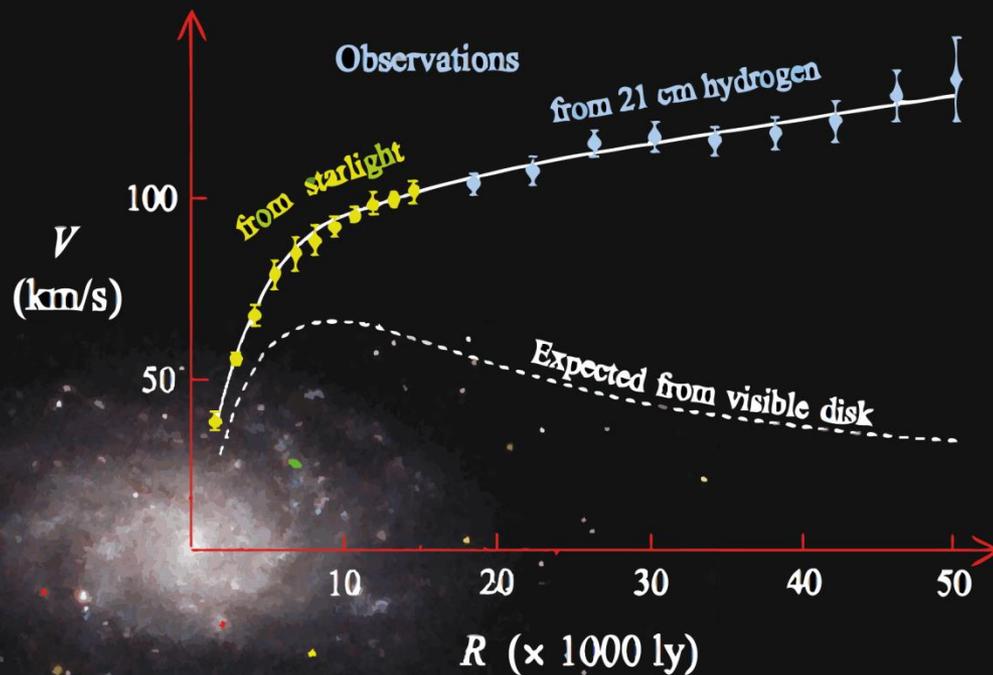


Uno Sguardo d'Insieme: ... Quello che non vediamo ... ma che c'è

- Stelle, galassie, ... sono composte di protoni, neutroni e elettroni: la *Materia Barionica*
- ... ma l' Universo contiene più materia di quante ne fornisca il puro contenuto barionico
- Indicazioni in tal senso vengono dalla dinamica delle stelle nelle galassie, degli ammassi di galassie, e da una fenomenologia osservativa, sempre indiretta, ma piuttosto ricca.
- Si stima che la *Materia Oscura* contribuisca per circa il 27% alla distribuzione della massa-energia nell' Universo, (contro uno scarso 5% della materia barionica)
- L'origine di questa forma di materia è ancora poco chiara, sebbene molti siano i candidati, alcuni barionici, altri più esotici come le WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles)
- ... ma per ora l'evidenza della esistenza della DM è solo indiretta

L'ammasso zwCI0024+1652



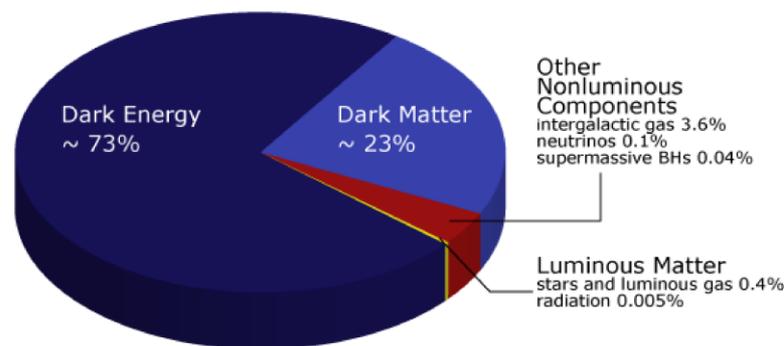


La gran parte della materia visibile in una galassia (qui M33) è concentrata nel centro. Quindi ci aspettiamo che le stelle più vicine al centro abbiano una velocità (di rotazione intorno al centro) maggiore delle stelle prossime ai bordi esterni della galassia. Tuttavia le osservazioni sono in contrasto con questa aspettativa: la curva che descrive le velocità di rotazione delle stelle non decresce con la distanza dal centro, anzi rimane sostanzialmente piatta: le stelle esterne si muovono con velocità confrontabili con quelle delle stelle prossime al centro galattico. Quindi, sebbene la gran parte della materia visibile sia concentrata nel centro, la galassia deve essere circondata da un alone di materia non visibile (Dark Matter) e la gran parte della massa di una galassia sembrerebbe essere costituita da Dark Matter, concentrata nell'alone

Uno Sguardo d'Insieme:

... Quello che non vediamo ... che (forse) c'è
... ma che non capiamo (ancora ...)

- ... e il rimanente $\simeq 70\%$? ... l' *Energia Oscura!*
- Come vedremo, l'Universo è in espansione e nel 1998 (Saul Perlmutter), dall'osservazione delle supernove di tipo IA (le pietre miliari delle strade cosmiche), è emerso un fatto sorprendente:
- contrariamente a quanto correntemente si credeva, l' espansione è accelerata
- Cosa causa questa accelerazione?
- ... una forma di massa-energia di origine e proprietà non ancora chiare associata a un campo, omogeneamente distribuito nel cosmo, che sostanzialmente interagisce solo con la forza di gravità...l' *Energia Oscura*





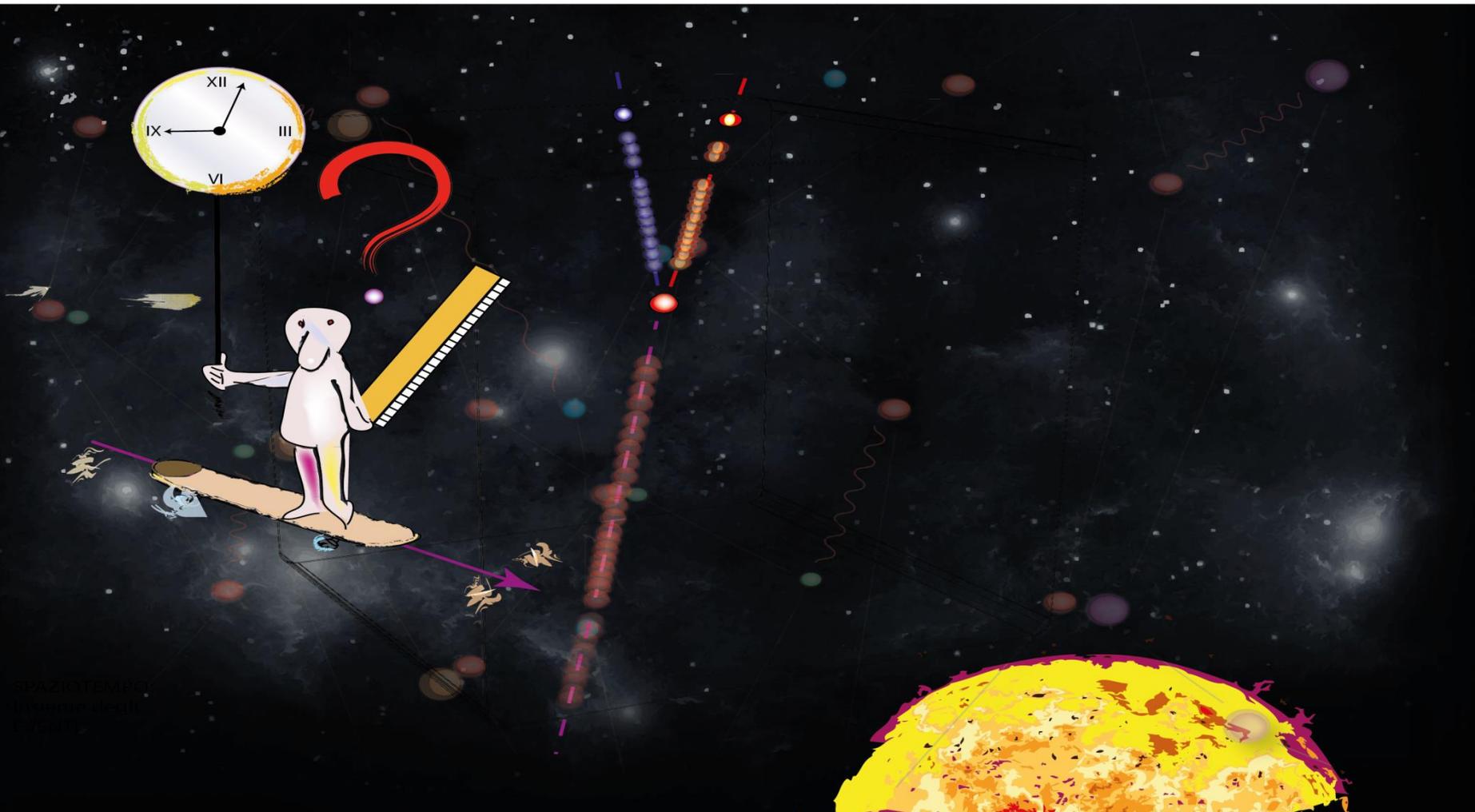
Per determinare le distanze nello spazio di oggetti astrofisici (stelle, galassie, ...) si utilizzano sorgenti astrofisiche che possano giocare il ruolo di "candele standard". Si tratta di sorgenti che emettono una quantità nota di "luce" di modo che la loro distanza possa essere valutata da quanto appare attenuata all'osservazione. Per esempio (vedi lo *Hubblesite*) se consideriamo una strada illuminata da lampioni disposti regolarmente, la loro luce, vista da una posizione determinata, risulterà attenuata in ragione del quadrato della loro distanza dal punto di osservazione. Se conosciamo la luminosità intrinseca del lampione tipo (la quantità di energia totale emessa nell'unità di tempo dal lampione) è facile risalire alle distanze dalla luminosità apparente dei vari lampioni.

Per misurare le distanze astrofisiche in regioni dello spazio "poco distanti" da noi (tipicamente distanze nella nostra galassia o in galassie appartenenti al Gruppo Locale), si utilizzano come candele standard le stelle variabili Cepheidi. Queste sono stelle giovani la cui luminosità intrinseca è rapidamente variabile e dipende dal periodo di variabilità. Misurando quest'ultimo si può risalire alla luminosità intrinseca della stella.

In ambito cosmologico è necessario usare come candele standard sorgenti astrofisiche molto più energetiche. Tipicamente stelle che esplodono, in particolare le Supernovae di tipo IA. Queste originano dalla dinamica di un sistema binario di stelle dove almeno una delle due (o entrambi) è una Nana Bianca (quello che rimane di una stella di massa prossima a quella del nostro sole, al termine del suo ciclo vitale). La nana bianca vampirizza la sua compagna e cresce in massa totale. Quando la sua massa raggiunge il "Limite di Chandrasekhar" (1.4 masse solari), la nana bianca diviene un gigantesco ordigno nucleare che esplose con una luminosità che è circa cinque miliardi di volte quella del nostro Sole. Le caratteristiche della catena che portano a questa esplosione immane sono standard e permettono di caratterizzare la luminosità intrinseca di questo tipo di supernovae. Quindi se in una galassia (o ammasso di galassie) distante si osserva una supernova di tipo IA, dalla luminosità apparente si può risalire alla distanza della galassia.

Come riusciamo a organizzare, in un modello fisico–matematico, questa ricchezza di dati osservativi che l’Universo ci offre?

Abbiamo a che fare con un paesaggio cosmico estremamente complesso... apparentemente disordinato e che per molti aspetti suggerisce più interrogativi che risposte ...



... in realtà l'Universo offre un paesaggio regolare se lo osserviamo su grande scala ...

In particolare, le osservazioni ottiche e radio-astronomiche confermano che su una scala $>$ di 100-200 milioni di anni luce quello che vediamo in una direzione è simile a quello che vediamo in tutte le altre direzioni:

L'Universo ci appare quindi

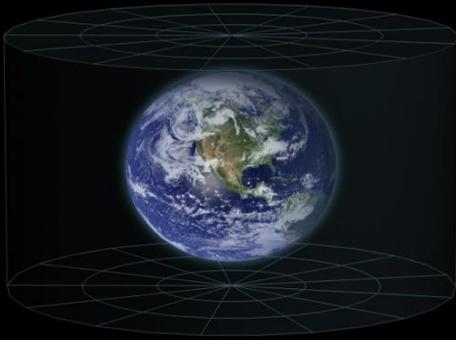
ISOTROPO

Questo implica che tutte le regioni limitate dell'universo sperimentate da queste osservazioni sono tipiche e descrivono un paesaggio cosmico che è sostanzialmente lo stesso in ciascun punto dello spazio: in altre parole l'Universo che sperimentiamo su queste scale ci appare

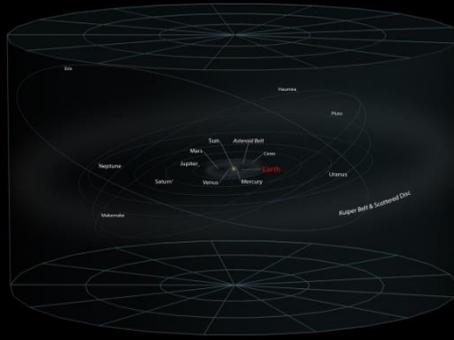
SPAZIALMENTE OMOGENEO

Effetto non banale associato alla complessa interazione fra un Universo giovane isotropo, (**CMB!**) l'attrazione gravitazionale (anisotropia), l'espansione dell'Universo, e ...

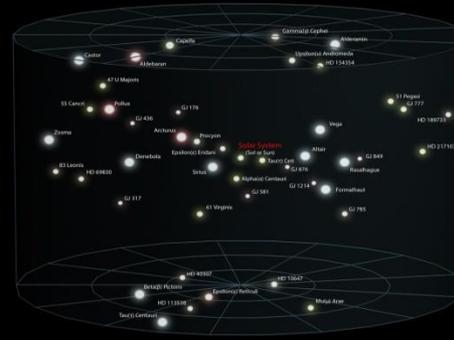
Earth



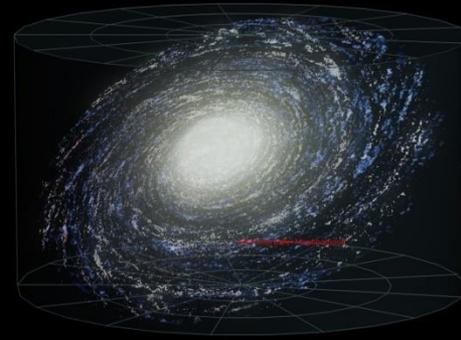
Solar System



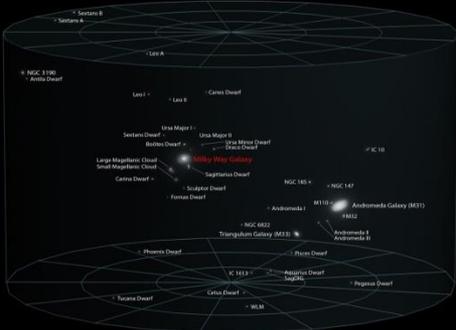
Solar Interstellar Neighborhood



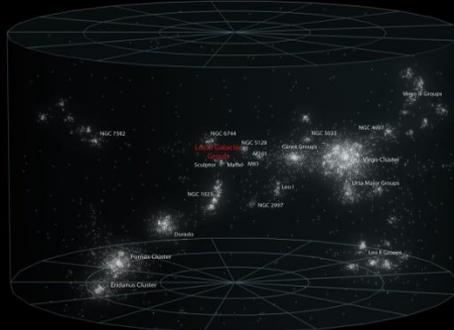
Milky Way Galaxy



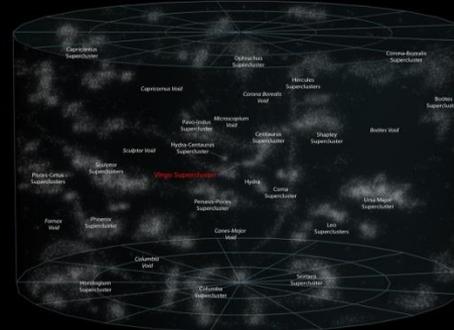
Local Galactic Group



Virgo Supercluster



Local Superclusters



Observable Universe



- ... inoltre, la nostra galassia non occupa una posizione speciale, temporalmente privilegiata, nel cosmo. Quindi riteniamo che questa regolarità su grande scala sia una caratteristica di tutto l' Universo. Per molti anni questa proprietà osservativa, di cui oggi si cerca una caratterizzazione dinamica, era riassunta in una sorta di tacito *assioma*, di grande utilità pratica e concettuale (... ma c'è un tempo per gli assiomi e un tempo per le spiegazioni, e la Fisica non ama gli assiomi ...)

Il Principio Cosmologico

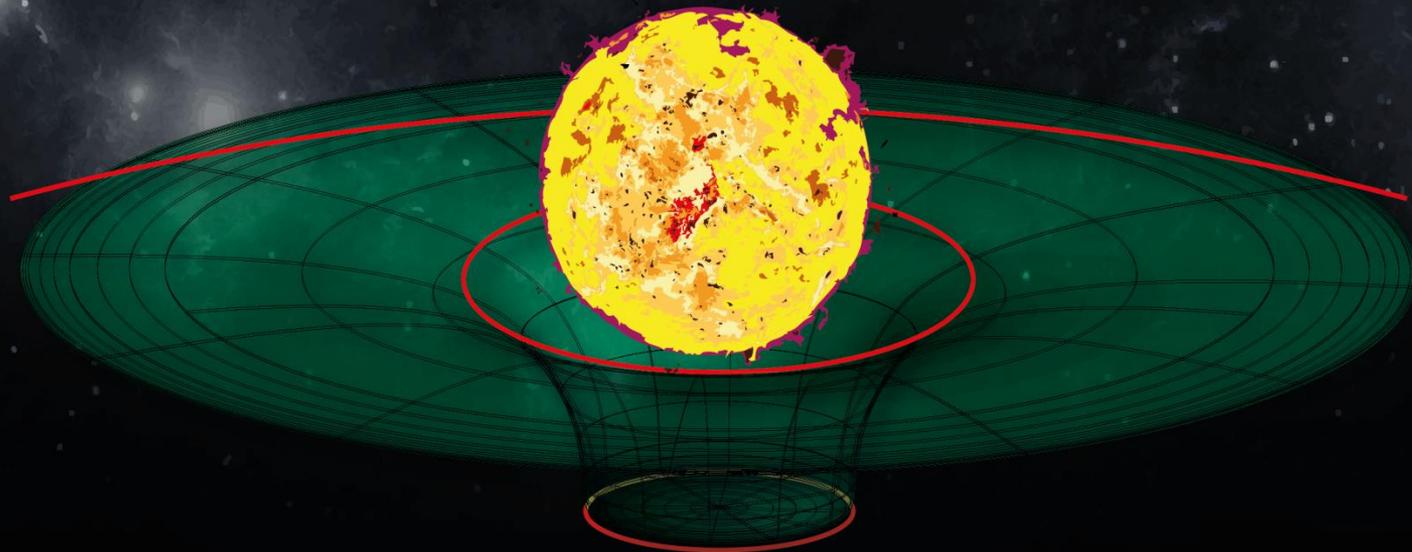
La cosmologia moderna vede come protagonista la Teoria della Relatività Generale che considera una delle interazioni fondamentali che governano l'Universo, la forza gravitazionale, come la manifestazione di

uno Spaziotempo dinamico e curvo:

la distribuzione della materia genera curvatura spaziotemporale

la curvatura spaziotemporale genera la dinamica della materia

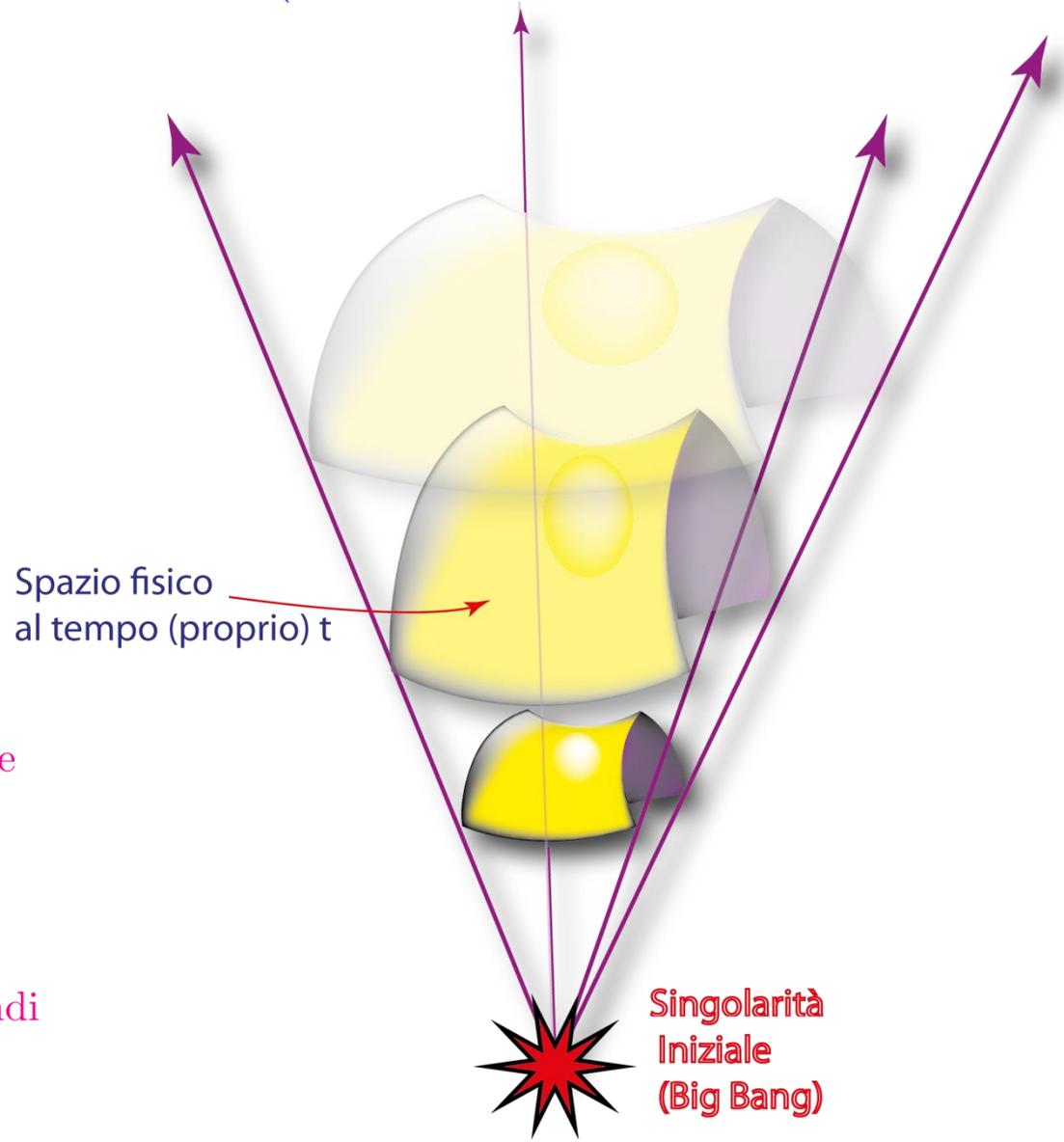
... L'Universo non può essere statico



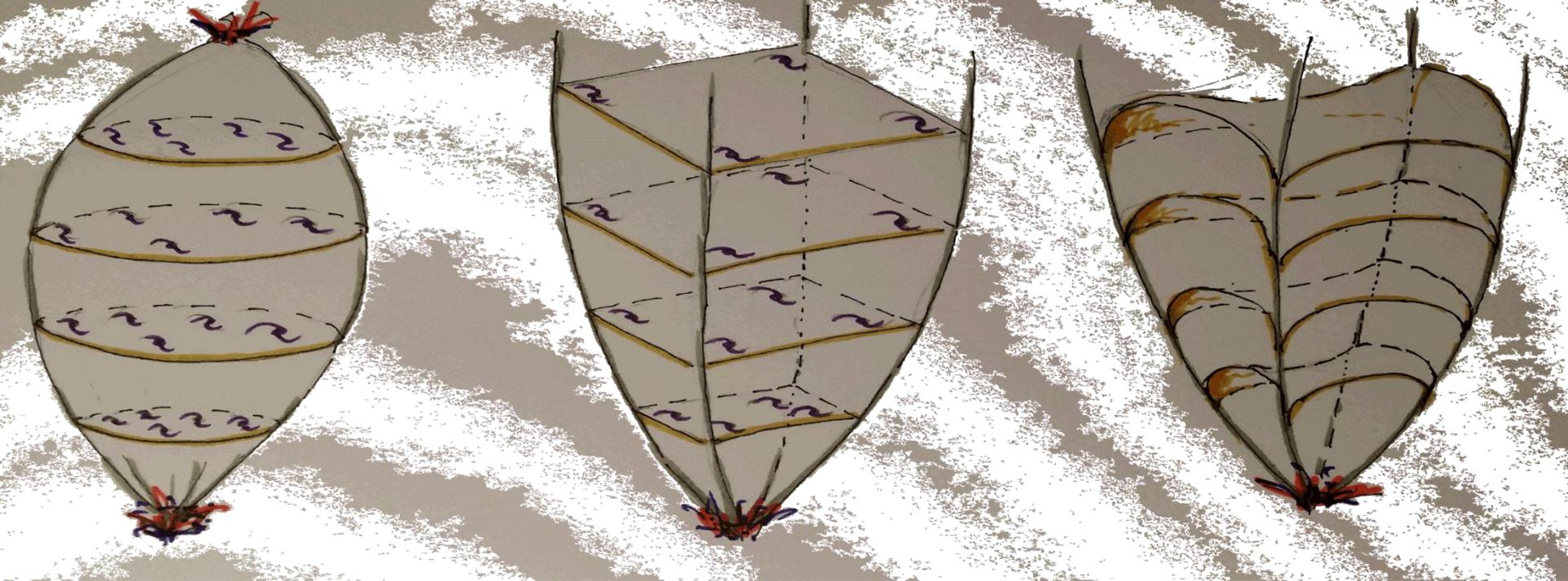
- Il fatto che le proprietà strutturali dell'Universo siano suscettibili di variare nel tempo è stato accettato solo nei primi decenni del secolo scorso
- Inizialmente (1917) Einstein stesso non mise in dubbio l' esistenza di un Universo statico, ma non perché la visione Aristotelica di un cosmo immutabile fosse ancora dominante e pervasiva, bensì per mancanza di chiare evidenze osservative sulle strutture extragalattiche e la loro dinamica
- Quindi, modificò la sua teoria introducendo un termine, la costante cosmologica Λ , col solo scopo di rendere possibile un Universo statico.
- Quando, più tardi, dovette accettare l'evidenza dell'espansione dell'Universo, eliminò dalla teoria questo termine aggiuntivo definendolo il più grande errore della sua vita
- In realtà Λ ha un ruolo importante e il vero errore di Einstein è stato quello di aver insistito su un Universo statico invece di accettare quello che la nuova interpretazione della gravitazione fornita dalla Relatività Generale gli indicava:
- **L' Universo è caratterizzato da una geometria spaziotemporale dinamica**



- Nell'ambito della Relatività Generale, il modello teorico di un Universo dinamico, isotropo e spazialmente omogeneo, si deve a Aleksandr Friedmann (1922) e Georges Lemaitre (1927), e trova la sua caratterizzazione completa nella geometria spazio-temporale di FLRW (Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker) (1935-37)



- Le ipotesi di simmetria associate con i modelli FLRW sono certamente non vere localmente, ma valgono su grande scala, quando *mediamo* la dinamica cosmologica su volumi spaziali dell'ordine dei 600 milioni di anni luce (cioè su regioni più grandi del superammasso locale di galassie).



- Il *divario spaziotemporale* fra due eventi $E_1 := (r, \theta, \phi, t)$ e $E_2 := (r + dr, \theta + d\theta, \phi + d\phi, t + dt)$ negli spazitempo di FLRW è dato da

$$\Delta(E_1, E_2) = -dt^2 + R^2(t) [dr^2 + f^2(r)(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)]$$

dove la funzione $f(r)$ è data da $\sin r$, r , $\sinh r$ corrispondentemente alla curvatura delle sezioni spaziali $(+1, 0, -1)$, rispettivamente.

- Le linee d'universo $\{r, \theta, \phi \text{ costanti}\}$ descrivono gli osservatori fondamentali del modello, osservatori che si muovono all'velocità media della materia (*e.g.*, galassie) e che sperimentano l'omogeneità e l'isotropia della distribuzione media della materia nell'universo.

L'Espansione di Hubble

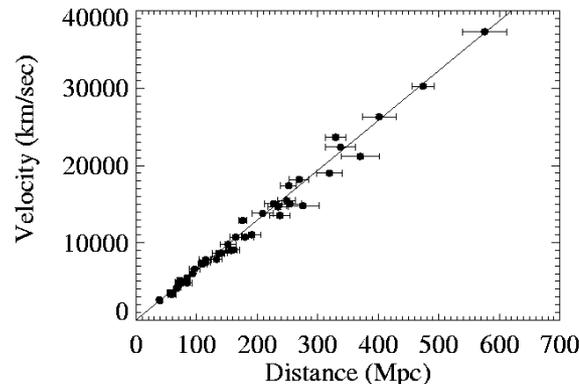
- L'evidenza osservativa di un Universo dinamico si è avuta (1929) con la scoperta, da parte di Edwin Hubble, che le galassie si allontanano le une dalle altre con una velocità proporzionale alla loro distanza: un'espansione di circa l'1% in 100 milioni di anni. Il rateo di espansione è il *parametro di Hubble* H . Il suo valore presente H_0 , la *costante di Hubble*, è di circa $65 - 70 (km/s)/Mpc$. Il megaparsec, Mpc , è l'unità di distanza favorita dagli astronomi e $1 Mpc := 3.26$ anni luce.
- Lo spostamento verso il rosso delle righe spettrali emesse dalle sorgenti astronomiche remote permette di caratterizzarne la velocità di recessione. In questo modo Hubble fu in grado di dimostrare che questi oggetti si allontanano da noi con una velocità proporzionale alla loro distanza. Questo spostamento verso il rosso è un effetto dovuto all'espansione dell'universo e non un effetto Doppler (velocità).



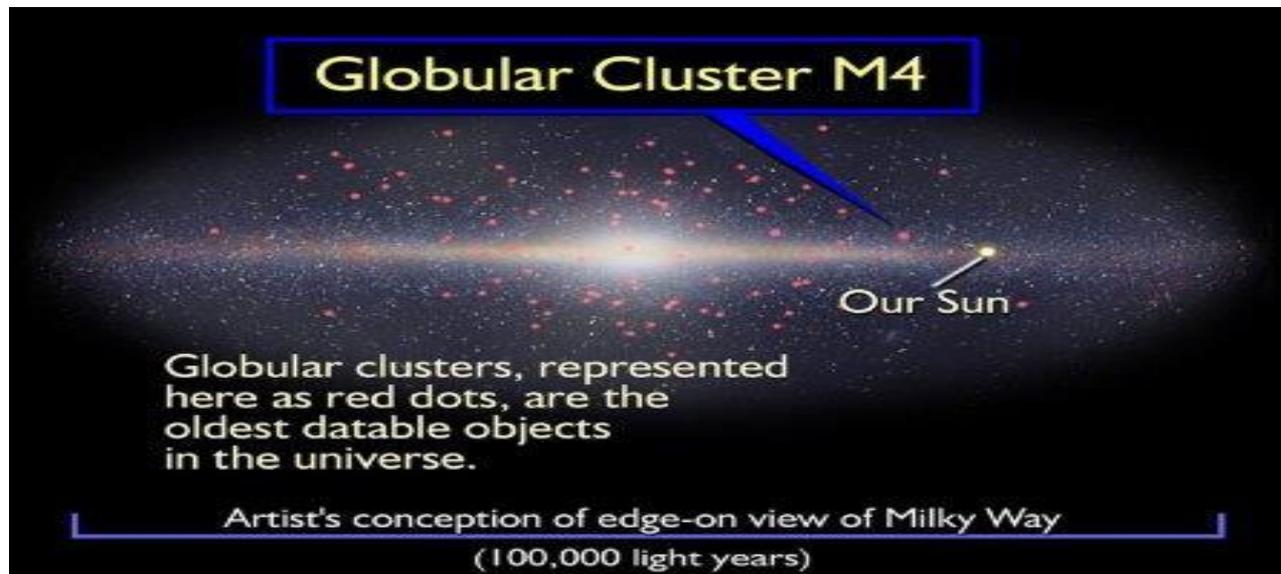
- Quindi l'espansione di Hubble è di fatto un *riscaldamento* dell'Universo. La distanza propria fra due punti (nel riferimento definito dal moto della materia cosmologica) scala come il fattore $R(t)$ presente nel divario spaziotemporale (la metrica spaziotemporale) di FLRW. Il rateo di espansione è dato da

$$H(t) := \frac{1}{R(t)} \frac{d}{dt} R(t) .$$

- $H(t)$ è quindi, come la notazione suggerisce, una funzione del tempo (proprio) cosmologico. La *Costante di Hubble* (o, come recentemente stabilito, la Costante di Hubble–Lemaître) H_0 è il valore di $H(t)$ valutato "ora", in corrispondenza all'età attuale dell'universo osservato. Lo si ottiene dal rapporto fra la velocità di recessione di galassie lontane e la loro distanza (misura difficile), e lo si esprime quindi come $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, dove h è una costante adimensionale che viene via via "aggiustata" mano mano che la misura di H_0 viene migliorata. Le misure attuali forniscono $h = 0.65 \pm 0.05$ che corrisponde a $H_0 = 65 \pm 5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.



- La costante di Hubble H_0 caratterizza anche la scala temporale e quella spaziale dell'Universo. Il dettaglio di queste scale dipende molto anche dalla storia "espansiva" dell'universo (i modelli FLRW sono, in un certo senso, una "sovra-semplificazione"), tuttavia il dato fornito da H_0 è molto significativo.
- La scala temporale viene misurata in unità del "tempo di Hubble", $H_0^{-1} = 9.778 h^{-1} Gyr$ a partire dal valore 0 per il fattore di scala $R(t)$.
- La vera relazione fra l'età espansiva e questa età di Hubble H_0^{-1} dipende molto dal fatto che il rateo di espansione non è necessariamente temporalmente costante: l'espansione può rallentare o accelerare. In particolare le misure più recenti indicano che l'Universo sta accelerando. Inoltre abbiamo vincoli che vengono dall'astrofisica (globular cluster). Indicativamente si stima che l'età dell'universo sia $T_0 = 14 \pm 2 Gyr$.



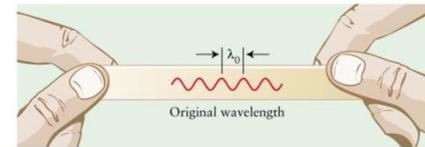
Il Redshift

- La scala spaziale, che fornisce una stima della "grandezza" attuale dell' Universo osservato, è caratterizzata dalla distanza di Hubble $cH_0^{-1} = 2998 h^{-1} Mpc = 9.251 h^{-1} \times 10^{27} cm$
- In tal senso, osserviamo che l'espansione dell'Universo causa la dilatazione di tutte le distanze e di tutte le lunghezze fisicamente significative (fanno ovviamente eccezione le lunghezze e le distanze relative ai sistemi locali gravitazionalmente legati, dove l'attrazione gravitazionale e i processi fisici locali dominano sull'espansione cosmica). In particolare l'espansione cosmologica causa una corrispondente dilatazione della lunghezza d'onda dei fotoni (radiazione elettromagnetica) che viaggiano su distanze cosmologicamente significative. Fotoni emessi da sorgenti astrofisiche nel "passato remoto" giungono a noi con lunghezze d'onda spostate verso il "rosso" (redshift) in ragione di

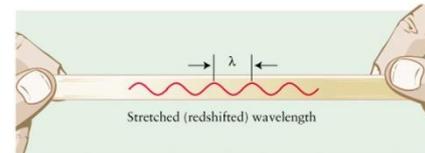
$$\frac{\lambda_{ricevuto}}{\lambda_{emesso}} = \frac{R(t_0)}{R(t_{emissione})} =: 1 + z ,$$

dove z definisce il *redshift* della sorgente considerata.

- Spesso z viene utilizzato come il parametro che indica direttamente la grandezza lineare relativa dell'Universo nel "momento" di emissione dei fotoni generati dal fenomeno astrofisico che stiamo osservando. Infatti abbiamo $R(t_{emissione}) = (1 + z)^{-1} R(t_0)$. Per esempio se prendiamo $z = 5.82$ (il redshift di un quasar "lontanissimo"), otteniamo che l'Universo, quando i fotoni venivano emessi dal quasar in questione, era circa 7 volte più piccolo di quanto non lo sia adesso.



(a) A wave drawn on a rubber band ...



(b) ... increases in wavelength as the rubber band is stretched.

Credit for
the Image:
Pogosyan
Univ. Alberta

La Densità Critica

- La costante di Hubble H_0 e la costante di Newton G caratterizzano anche la *Densità Critica* di materia (massa-energia), ρ_{crit} ,

$$\rho_{crit} := \frac{3 H_0^2}{8\pi G} = 1.879 h^2 \times 10^{-29} \text{ g cm}^{-3} = 1.054 h^2 \times 10^4 \text{ eV cm}^{-3}.$$

In un Universo la cui dinamica è dominata dalla materia (e dalla radiazione), ρ_{crit} ne caratterizza il fato: se la densità di massa-energia ρ è tale che $\rho < \rho_{crit}$ (sotto-criticalità) l'universo si espanderà per sempre; viceversa se $\rho > \rho_{crit}$ (super-criticalità) l'universo ricollasserà.

- La densità critica è anche legata al parametro di decelerazione, q_0 , che misura il rateo di cambiamento dell'espansione:

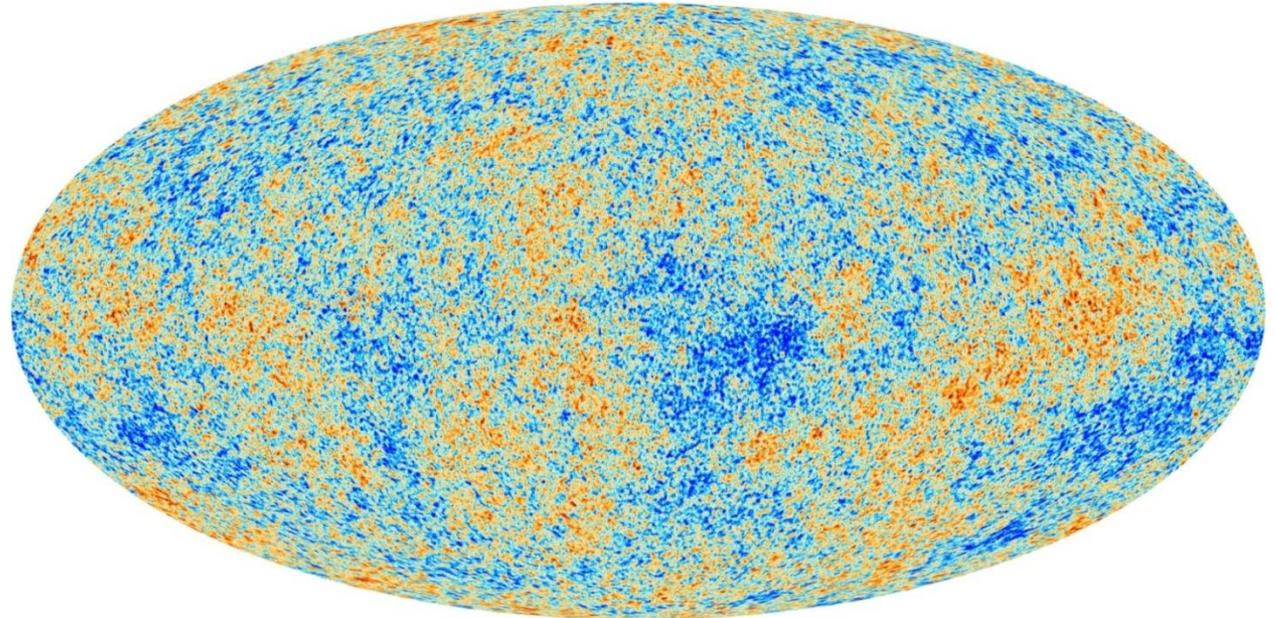
$$\frac{1}{R(t)} \frac{d^2}{dt^2} R(t) \Big|_{t_0} = -H_0^2 q_0.$$

Se l'Universo è dominato dalla materia otteniamo infatti $q_0 = \frac{1}{2} \rho_{crit}(mat)$.

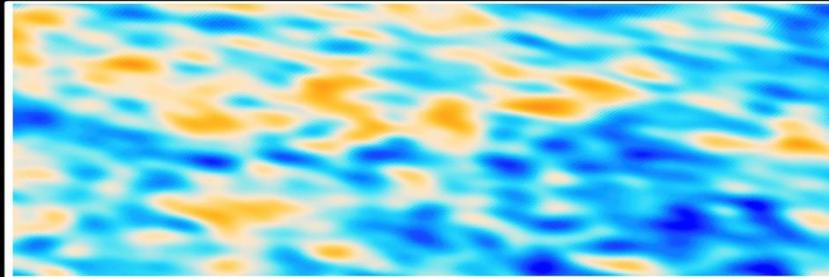
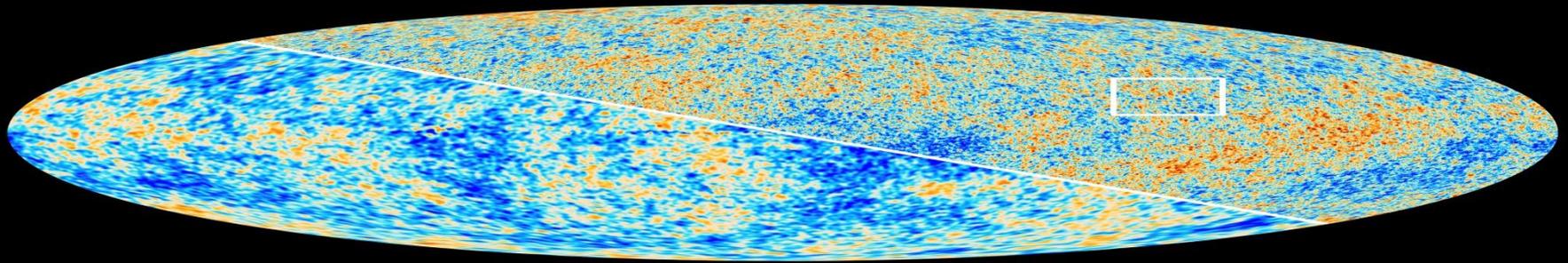
- Misure della distanze delle supernovae di tipo Ia indicano che $q_0 < 0$: l'Universo sta accelerando!!! *LA DARK ENERGY* sembra dominare questa fase della evoluzione del cosmo!!!

La Radiazione Cosmica di Fondo

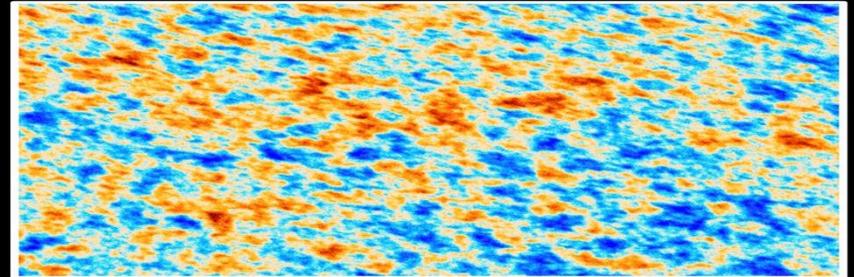
- La migliore conferma del Big Bang fu la scoperta (per pura serendipità), da parte di Arno Penzias e Robert Wilson (1965) di una radiazione *fossile* che permea l' Universo: la radiazione cosmica di fondo (**CMB: Cosmic Microwave Background**)
- Si ritiene che il CMB sia ciò che rimane di un flash elettromagnetico di enorme energia associato al Big Bang, oramai attenuato (redshift) dall'espansione dell'Universo. La sua esistenza era stata teoricamente prevista nel 1948 da G. Gamow, R. Alpher, e R. Herman
- E' una radiazione termica di corpo nero alla temperatura di 2.7 K , distribuita in maniera estremamente isotropa, una proprietà che indica quanto l'universo fosse uniforme subito dopo il Big Bang



CMB, Missione
Planck (marzo 2013)



WMAP



Planck

- L'informazione più significativa in tale senso è quella fornita dalle missioni COBE, BOOMERANG, WMAP, PLANCK, ci dicono che questa radiazione fossile è quasi perfettamente una radiazione di corpo nero alla temperatura $T = 2.7 K$, estremamente isotropa con deviazioni percentuali di T molto piccole (ma di importanza fondamentale) di poche parti in 10^5
- Quindi, quando l'Universo aveva circa 300.000 anni, al tempo di disaccoppiamento fra materia e radiazione elettromagnetica, (ben prima che si formassero le galassie), era estremamente isotropo (\implies spazialmente omogeneo). Questo indica che presumibilmente lo era già prima, e non sorprende che lo sia rimasto anche dopo, almeno su scale sufficientemente grandi.

... e per finire un *riassunto* dei ≈ 14 miliardi di anni di storia del nostro Universo, con particolare enfasi sulla successioni di eventi che hanno generato il fondo cosmico.



→ COSMIC HISTORY



10^{-32} seconds

1 second

100 seconds

380 000 years

300–500 million years

Billions of years

13.8 billion years

Beginning of the Universe



Inflation

Accelerated expansion of the Universe

Formation of light and matter

Light and matter are coupled

Dark matter evolves independently; it starts clumping and forming a web of structures

Light and matter separate

- Protons and electrons form atoms
- Light starts travelling freely: it will become the Cosmic Microwave Background (CMB)

Dark ages

Atoms start feeling the gravity of the cosmic web of dark matter

First stars

The first stars and galaxies form in the densest knots of the cosmic web

Galaxy evolution

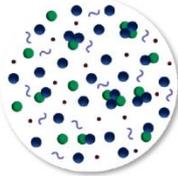
The present Universe



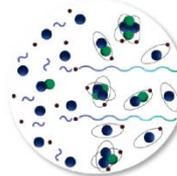
- Tiny fluctuations: the seeds of future structures
- Gravitational waves?



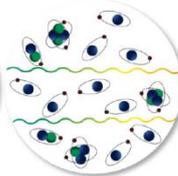
Frequent collisions between normal matter and light



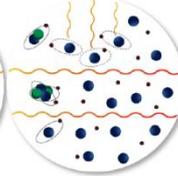
As the Universe expands, particles collide less frequently



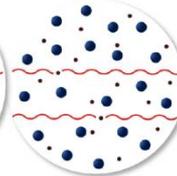
Last scattering of light off electrons
→ **Polarisation**



The Universe is dark as stars and galaxies are yet to form

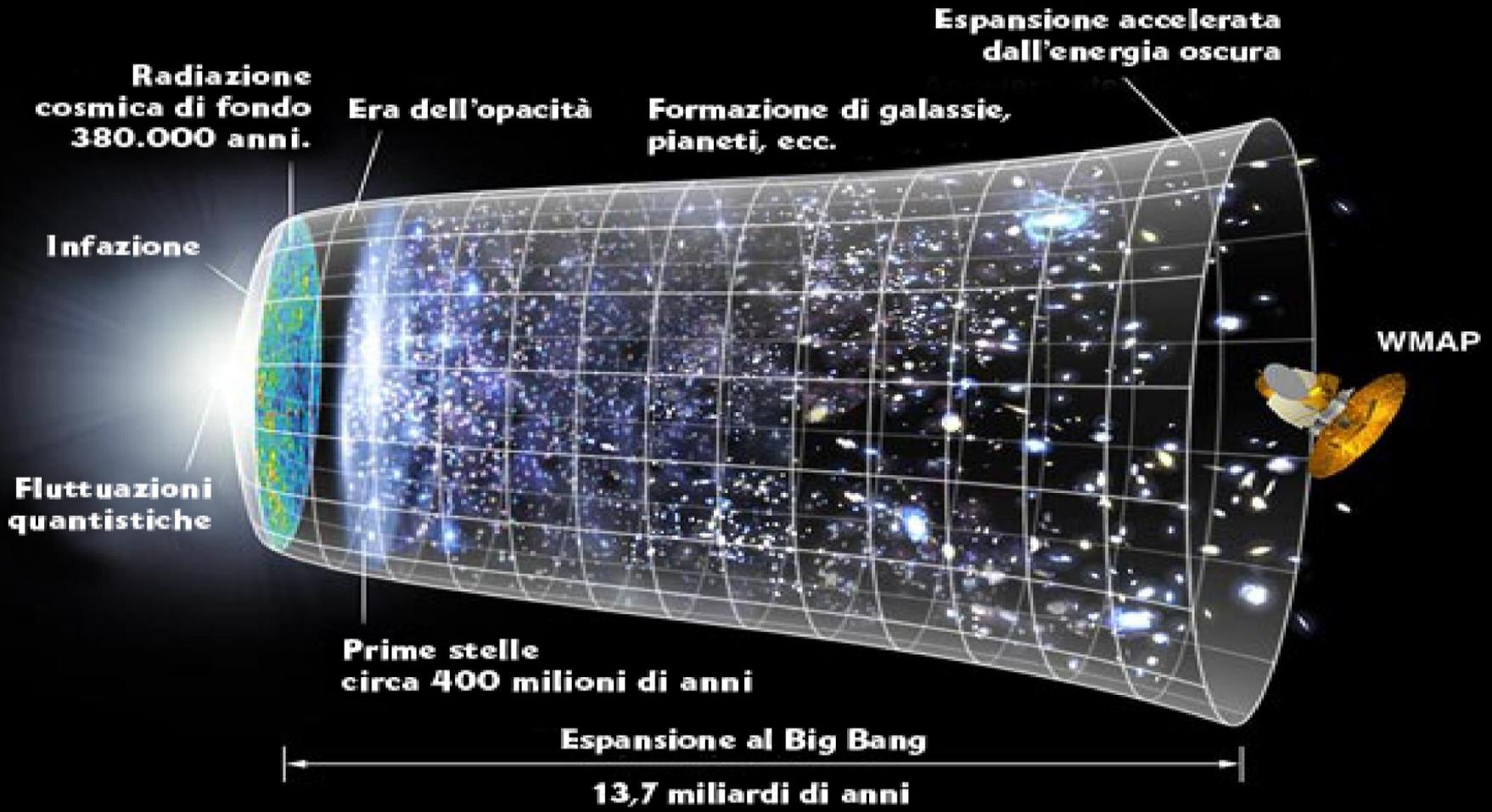


Light from first stars and galaxies breaks atoms apart and "reionises" the Universe



Light can interact again with electrons
→ **Polarisation**

... e questa è la successioni di eventi fino alla rivincita dell' energia oscura



Alcune letture per approfondire

- W. Rindler, *Relativity, Special, General and Cosmological*, Oxford Univ. Press (2001)
- G.F.R. Ellis, R. Williams, M. Carfora, *Flat and Curved Space-Times*, Oxford Univ Press (1988)
- S. Perlmutter, *Supernovae, Dark Energy, and the Accelerating Universe*, *Physics Today* **56**, 4, 53 (2003)
- E. W. Kolb and M. S. Turner, *The Pocket Cosmology*, *Eur. Phys. J. C* (2000) 15: 125-132 <https://doi.org/10.1007/BF02683411>
- B. Greene, *La Trama del Cosmo*, Einaudi, saggi 864, (2004)

