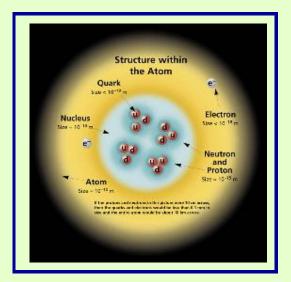
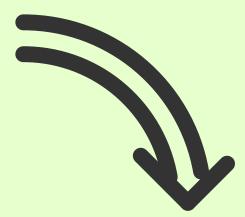
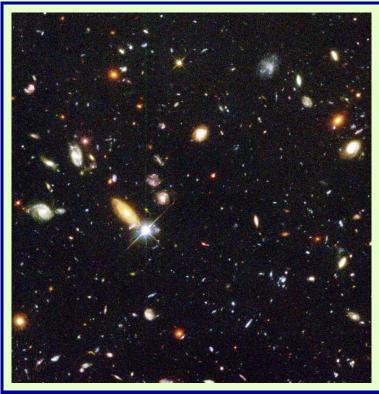
Dai Quarks al Cosmo

Enrico Nardi

Laboratori Nazionali di Frascati







COSMOGONIE

Cosmogonia Mande (Africa). Al principio c'era solo Mangala, una presenza poderosa, rotonda ed energetica. Mangala conteneva i 4 giorni (il tempo), i 4 elementi (la materia), e le 4 direzioni (lo spazio). Mangala si stancó di tenere tutte queste cose dentro

Cosmogonia Yoruba (Africa). Olodumare invió Obatala dal cielo per creare un pó di terra fuori dal caos. Obatala scese una lunga catena portando con sé un gallo, del ferro ed una noce di cocco. Pose il gallo sopra il ferro, il gallo grattó il metallo e lo sparse in giro, e fu creata la Terra. Obatala piantó il cocco che generó la vegetazione...

La Genesi. In principio Dio creó il Cielo e la Terra. Ora la terra era informe e deserta e le tenebre ricoprivano l'abisso e lo spirito di Dio aleggiava sulle acque. Dio disse: "Sia la luce!". E la luce fu. Dio vide che la luce era cosa buona e separó la luce dalle tenebre e chiamó la luce giorno e le tenebre notte. E fu sera e fu mattina: primo giorno.

La Kaballah Giudaica. Il primo giorno l' Onnipotente creó il Cielo e la Terre, la luce ed il buio, la durata del giorno e della notte. Poi prese una pietra e la scaglió sul Caos. La pietra creó la Terra, e tutto quello che fu creato fu creato intorno ad essa.

Miti Orfici (Grecia). All' inizio la Notte regnava nell' oscuritá. L'uovo argentato del Cosmo venne formato dal tempo.... Dalla parte superiore dell' uovo si formó Urano (il Cielo) dalla parte inferiore Gaia (la Terra).

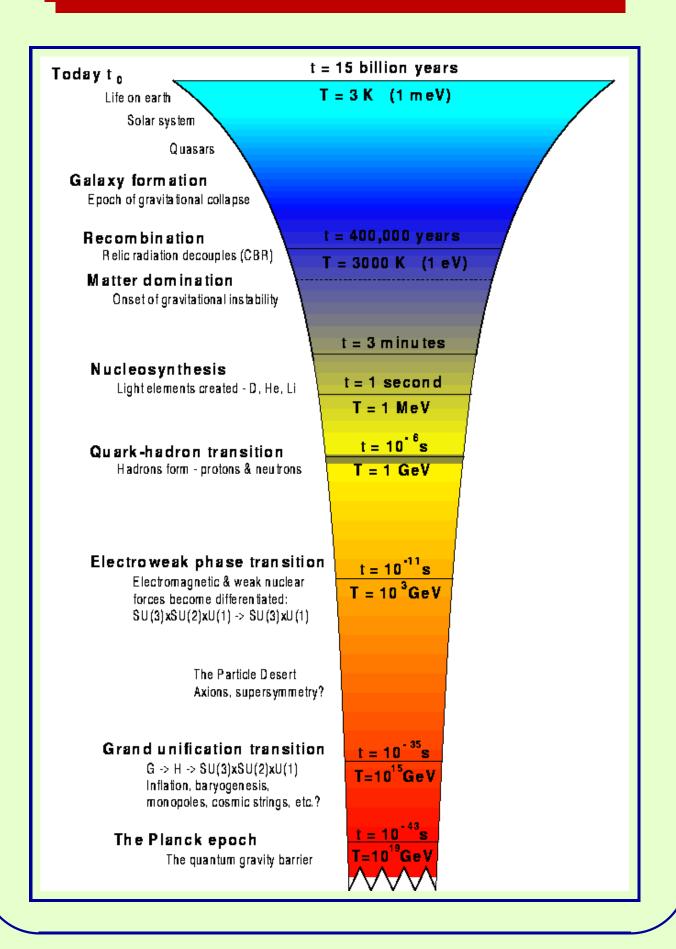
Mito Voluspa (Islanda). All' inizio c'era Yawning Gap, l'Abisso, e da una parte Niflheim, il luogo della Nebbia e dall' altra Muspellsheim, il luogo del Fuoco. Yawning Gap si riempí di freddi torrenti provenienti dal Luogo della Nebbia, ed il caldo del Fuoco mutó i torrenti in vapore. Dal vapore si generarono Ymir, l'antico gigante, e la vacca Audhumla...

Cosmogonia Quinche Maya. Tepeu e Gucumatz erano soli, avvolti nel verde e nell' azzurro. Tutto era immobile, solo c'era l'illimitatezza del cielo e la calma delle acque. Nulla era unito a null' altro, tutto era quiete ed immensitá. Tepeu e Gucumatz si consultarono, e venne la loro parola: "Che sia questo e quello, che le acque si ritirino e la terra possa esistere.."

Cosmogonia Doigon (Mali, Africa). All' inizio c' era l' Uovo del mondo: Aduno Tal. L' Uovo del mondo era di dimensioni infinitesime e conteneva aria, fuoco, acqua ed un metallo chiamato Sagala. L' Uovo era infinitamenente piccolo ed infinitamente pesante (480 carichi di un asino)...

Cosmologi del Sec. XX. All' inizio, tutto era in un punto, infinitamente piccolo, denso e caldo. Ci fu un' esplosione immensa, che creó lo spazio ed il tempo, e sparse luce e materia tutto intorno. Poi la materia si raffreddó, si formarono le Stelle e poi la Terra...

Evoluzione dell' Universo nella Teoria del Big Bang



PRINCIPI COSMOLOGICI

Le nostre osservazioni sono fatte da una posizione specifica nell' Universo (ed ad un tempo specifico). Una teoria Cosmologica richiede una conoscenza generale della distribuzione e proprietá della materia in tutto l' Universo (e durante tutta la sua evoluzione).

Da qui la necessitá di postulare Principi Universali

I Primi Tentativi: Cosmologie Geocentriche ed Eliocentriche

- La disposizione dei pianeti, del Sole e della Luna su sfere concentriche attorno ad un 'fuoco centrale', corrisponde all' armonia delle scale musicali, espresse da numeri razionali (il rapporto fra le lunghezze delle corde di una lira) (Pitagora 580-500 A.C.).
- La circonferenza, senza inizio né fine, é la forma perfetta. Le sfere celesti ruotano intorno alla Terra, sferica ed immobile. (Platone 427-367 A.C.)
- Per risolvere conflitti con le osservazioni (moti retrogradi) si postularono ulteriori sfere rotanti (non-planetarie) concentriche e sorreggenti le sfere planetarie. (Eudosso 408-355 A.C. - 33 sfere, Aristotele 384-322 A.C. - 55 sfere).
- La Cosmologia Eliocentrica é estremamente piú semplice per descrivere il moto dei corpi celesti: Terra e pianeti in rivoluzione attorno al Sole. (Aristarco ca. 280 A.C.).
- Cosmologia Geocentrica. Tolomeo (ca. 140 D.C.). Tutti i fenomeni celesti sono riprodotti da moti circolari uniformi. Il Sole ruota attorno alla Terra, i pianeti ruotano attorno al Sole su ruote piú piccole, ma piú velocemente. Teoria degli Epicicli.

L' abbandono degli Antichi Principi Cosmologici

- Copernico (1473-1543). (Re)introduce il sistema Geocentrico, con la Terra in moto intorno al Sole e la Luna intorno alla Terra. Mantiene la perfetta circolaritá delle orbite, e gli epicicli.
- Keplero (1571-1630). I pianeti percorrono orbite ellittiche, con il Sole in un fuoco dell' ellisse. Accellerano avvicinandosi al Sole e decelerano allontanandosene. Formuló le tre leggi del moto dei pianeti (ma nondimeno indulse in molte speculazioni mistiche).
- Galileo (1564-1642). Scopre i quattro grandi satelliti di Giove, le fasi di Venere, le macchie solari. Creó le premesse per demolire il Principio della Immutabilitá dei Cieli.
- Newton (1643-1726). introduce la dinamica nello studio del moto dei pianeti: la Legge di Gravitazione Universale che spiega la ragione profonda del moto dei corpi celesti, come pure la interazione fra qualsiasi coppia di particelle nell' Universo. Dá il vero inizio alla Cosmologia moderna.
- Herschel (1738-1822). Dimostra la validitá della legge di gravitazione universale scoprendo stelle in sistemi binari e studiandone le orbite. Diventa famoso per la scoperta di Urano. Da' inizio all' astronomia extragalattica, osservando nebulose luminose al telescopio, ed ipotizzando che fossero sistemi stellari. Congetturó che la Via Lattea fosse semplicemente un ammasso di stelle separato, a forma di disco (ma di nuovo con il Sole posizionato al centro!). Segnó comunque un passo importante nel mettere la posizione della Terra nella giusta prospettiva rispetto al resto dell' Universo.
- Solo nel 1850 la struttura a spirale delle galassie vicine venne osservata, e solo nel 1923 la galassia di Andromeda (M31) venne risolta nelle singole stelle.

Spiral Galaxy M31: Andromeda Nebula

La galassia a spirale piú vicina a noi: 0.9 Mpc



- La velocitá radiale della nebulosa di Andromeda fu misurata da V.M. Slipher nel 1912 (effetto Doppler - spostamento al blu). Risultó essere la piú alta velocitá misurata di un oggetto celeste: 300 km/sec. in avvicinamento.
- Nel 1923 E. Hubble osservó una stella variabile Cefeide nella nebulosa, e grazie alla relazione periodo-luminositá valida per queste stelle poté stabilirne la distanza (0.3 Mpc, stima errata per difetto. Le correzioni alla relazione periodo-luminositá delle Cefeidi apportate da W. Baade nel 1953 implicano un valore 10 volte piú grande).

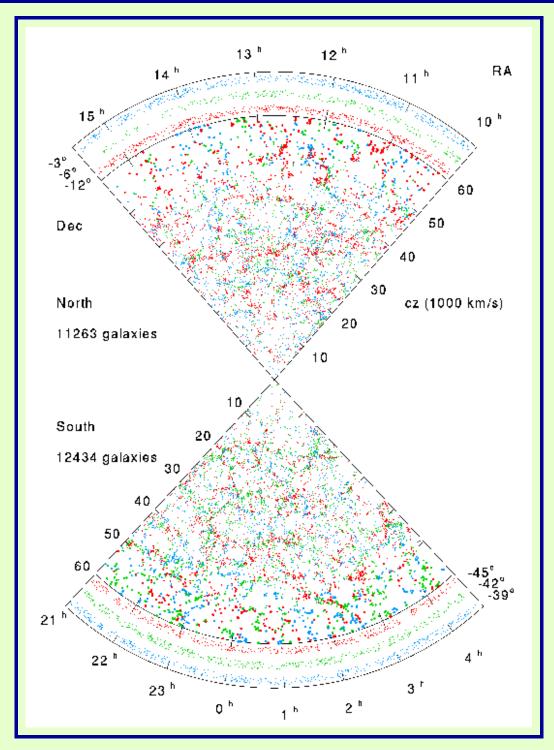
Principi Cosmologici Moderni

Solo nel XX secolo si accettó l' idea che il Sole é una stella per nulla eccezionale, situata al margine di una galassia di tipo molto comune, che a sua volte é parte di un raggruppamento piuttosto diradato di galassie situato alla periferia esterna di un denso ammasso di galassie (Il Virgo cluster). E persino questo ammasso é solo una povera copia dei reali grandi ammassi di galassie che osserviamo nell' Universo. La nostra posizione nell' Universo é del tutto insignificante!

Principio Cosmologico Copernicano

- Il nostro campione locale (osservabile) dell' Universo non differisce da altre regioni piú remote ed inaccessibili.
- La nostra prospettiva dell' Universo non corrisponde a nessun punto di osservazione preferenziale.
- Giustificazione (fra le varie): Le leggi della fisica dovrebbero essere le stesse in tutto l' Universo.
- **Isotropia.** L' isotropia *locale* é un fatto osservazionale: la frequenza ed il tipo di galassie é lo stesso indipendentemente della direzione di osservazione (ad esempio come per una sfera vista dal suo centro, e *non* come per un elissoide).
- (Omogeneitá). Dal Principio Copernicano segue che l' isotropia é una proprietá di ogni punto dello spazio. Questo implica che l' Universo é pure spazialmente omogeneo.
- Principio Cosmologico Perfetto. Assume che l' Universo presenta lo stesso aspetto visto da qualsiasi punto dello spazio e del tempo. E' il principio fondamentale alla base delle Teorie dello Stato Stazionario.
- "Principio" Antropico. Osserviamo l' Universo in un momento privilegiato del tempo, ed osserviamo un Universo particolare, che ha permesso l' evoluzione della vita (e quindi di osservatori). (Cfr. il Principio Antropico applicato ai corpi celesti).

Omogeneitá: Las Campanas Redshift Survey



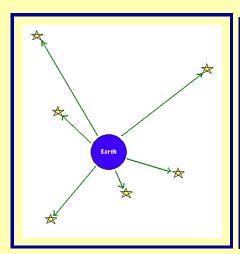
The Las Campanas Redshift Survey observed redshifts for more than 20,000 galaxies in the South and North galactic polar caps. Plotted above is a dot for each galaxy showing its right ascension (RA) and recession velocity (cz). The color of the dot shows which declination stripe (Dec) the galaxy is in. The dots for more distant galaxies are bigger to allow for the fact that only a small fraction of all galaxies are luminous enough to be seen at great distances. Note that while there are many voids and great walls with sizes of 100 Mpc (6500 km/sec) the large scale pattern is more uniform. The LCRS did not see "super Great Walls" or "super voids".

Cosmologia ed Osservazioni

Il Paradosso di Olbers: perche' il cielo di notte é scuro ?

Le Assunzioni di Olbers

- L' Universo é statico ed infinito.
- É formato da stelle di luminositá media simile.
- La distribuzione di stelle é uniforme in volumi sufficientemente grandi.



Se l' Universo fosse infinito ed omogeneo, guardando in una qualsiasi direzione prima o poi incontreremmo una stella.

Per ogni shell sferica di raggio R centrata sulla Terra, la luminositá apparente di una stella diminuisce come $1/R^2$, ma il numero di stelle aumenta come R^2 .

Per unitá di superficie, la volta celeste dovrebbe risplendere approssimativamente come la superficie del Sole!

Soluzioni Proposte

- ∠ La polvere cosmica oscura le stelle lontane (Olbers).
- La distribuzione di stelle non e' uniforme. Esistono larghi vuoti interstellari.
- √ L' Universo ha solo un numero finito di stelle.
- √ L' Universo é in espansione. La luce di stelle lontane é spostata verso il rosso (perdita di energia nel visibile).
- ⇒ L' Universo é giovane. La luce delle stelle piú distanti ancora non ci ha raggiunto. L' Universo osservabile ha un raggio finito di circa 15 miliardi di anni luce, ed inoltre le stelle hanno una vita finita.

Distanze Extragalattiche e Velocitá di Recessione

Metodi di misurazione delle distanze

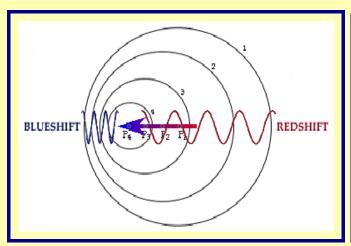
Distanze Galattiche

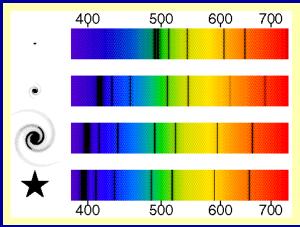
- Parallasse con base l'orbita terrestre (fino a 30 pc).
- Dispersione di frequenze elettromagnetiche (richiede un modello della densitá galattica di elettroni liberi).

Distanze Extragalattiche: richiede Candele Standard.

- Variabili Cefeidi. Richiede una precisa conoscenza della relazione periodo-luminositá intrinseca (Hubble).
- 'Stelle' estremamente luminose (regioni HII) (Hubble).
- Classi di galassie di luminositá costante.
- Recentemente: Supernovae di tipo IA (consentono misure a grande red-shift z>1.

Velocitá di Recessione delle Galassie: Effetto Doppler





II redshift:

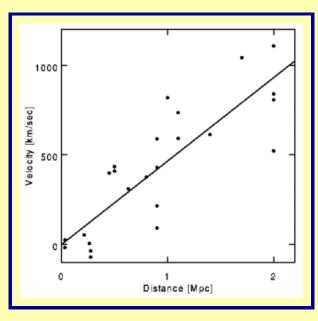
$$1+z\equiv rac{\lambda_{obs}}{\lambda_{em}}=\sqrt{rac{1+v/c}{1-v/c}} \, \Rightarrow \, oldsymbol{v} \simeq c oldsymbol{z} \, + \mathcal{O}ig(rac{v^2}{c^2}ig)$$

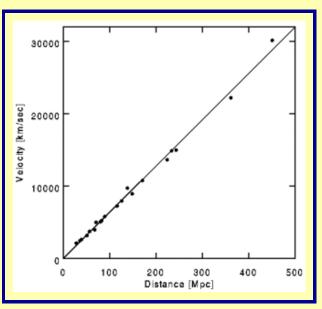
La Legge di Hubble

Nel 1929 Hubble stimó la distanza di 18 galassie sulla base della luminositá apparente delle stelle piú brillanti, e le confrontó con le rispettive velocitá di recessione. Concluse che esiste una relazione pressoché lineare fra velocitá e distanze. La pendenza della retta che interpola le misure é detta Costante di Hubble (H_0) ed il suo valore si misura in (km/sec)/Mpc.

Dati di Hubble del 1929

Dati da SN di tipo IA del 1996





- La relazione lineare é l'unica che rispetta il Principio Cosmologico Copernicano $(A(0,0) \rightarrow B(d,v) \rightarrow C(2d,2v)....)$
- I dati di Hubble arrivano solo a velocitá di 1,200 km/sec, e le velocitá peculiari delle galassie sono di alcuni 100 km/sec.
- Hubble derivó $H_0=464$ km/sec/Mpc. Questo implicava una etá dell' Universo ≈ 2 miliardi di anni quando l'etá della Terra é di circa 4 miliardi di anni ! (usó distanze errate per un fattore 10.)
- Oggi le misure si estendono oltre i 30,000 km/sec ed indicano $H_0 \approx 65$ km/sec/Mpc. Quanto tempo é passato da quando due galassie qualsiasi oggi distanti D erano in contatto (cioé, qual'é l' etá dell' Universo) ? $\frac{D}{V_{rel}} = \frac{D}{H_0 R} = \frac{1}{H_0} \approx 15 \times 10^9$ anni.

Universo aperto, chiuso o critico?





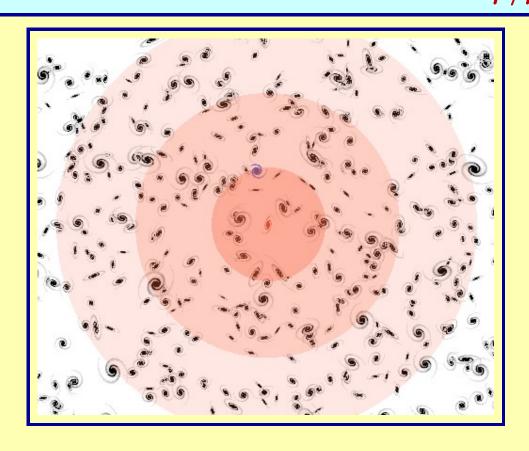


Calcolo (Newtoniano) della Densitá Critica:

$$\frac{1}{2}v_{f}^{2} = \frac{GM_{R}}{R}; \left(M_{R} = \frac{4\pi R^{3}}{3}\rho\right) \Rightarrow v_{f} = \sqrt{\frac{8\pi GR^{2}}{3}\rho}$$

$$v_f = H_0 R \, \Rightarrow \, igg|
ho_0 = rac{3H_0^2}{8\pi G} \, igg| pprox 8 imes 10^{-30} rac{g}{cm^3} pprox rac{5 \, \mathrm{prot.}}{m^3}$$

É di uso comune esprimere la densitá totale di energia dell' Universo in unitá della densitá critica: $\Omega \equiv \rho/\rho_c$.

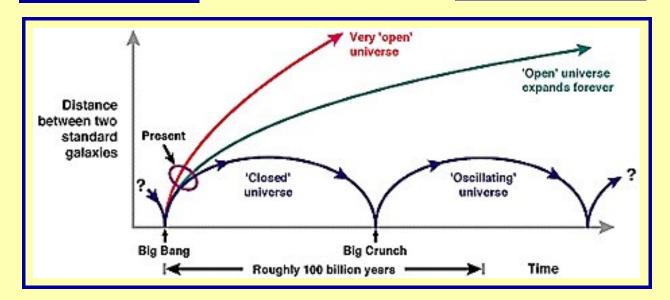


Quale sará il futuro dell' Universo?

$$\Omega < 1$$
 Open

$$\Omega=1$$
 Critical

 $\Omega > 1$ Closed



Le misure più recenti della densità indicano 0.3 $<\Omega<$ 1. 10^{10} anni dopo il Big Bang, un valore $\Omega\approx$ 1, é altamente innaturale, e richiede una spiegazione (flatness problem).

La densitá totale di energia dell' Universo consiste di vari contributi ($\Omega = \sum_i \Omega_i$) che evolvono in maniera differente durante l'espansione, con il variare della temperatura:

- ullet Radiazione (particelle relativistiche) $_{(p=
 ho/3)}$: $\Omega_{rad} \sim T^{-4}$
- ullet Materia (particelle non-relativistiche) ($_{p=0}$): $\Omega_{M} \sim T^{-3}$
- Energia del vuoto (costante cosmologica) (p=ho): $\Omega_{\Lambda} \sim$ cost.

Al principio, (redshift $z\gtrsim 2000$) la densitá di energia era dominata dalla radiazione (Era della radiazione). La materia cominció a dominare l' Universo a temperature $T\lesssim 4,000^o K$ (permettendo la formazione di strutture). Al raffreddarsi dell' Universo, una componente anche piccola di energia del vuoto finirebbe comunque per dominare la densitá di energia.

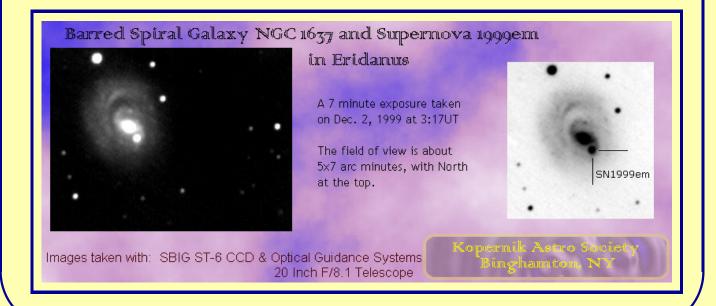
Supernova: La fine gloriosa di una stella

La luminositá tipica di una Supernova raggiunge $10^{10} L_{\odot}$ Puó risplendere piú intensamente della Galassia ospite.

SN-1997br (Type-IA)

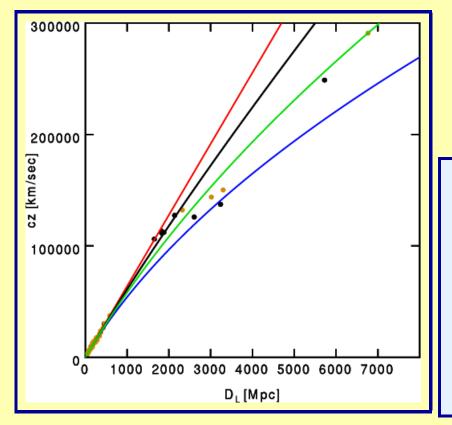


SN-1999em (Type-IIP)



Ultima ora: L' Universo sta accelerando?

Nel 1998 i primi dati di Supernove a grande redshift $(z\sim 0.5)$ rivelarono luminosità inferiori a quanto estrapolabile dalle misure di H_0 a basso redshift. Questo fatto puó essere interpretato come una indicazione che l' Universo oggi é in una fase di accellerazione dell' espansione.

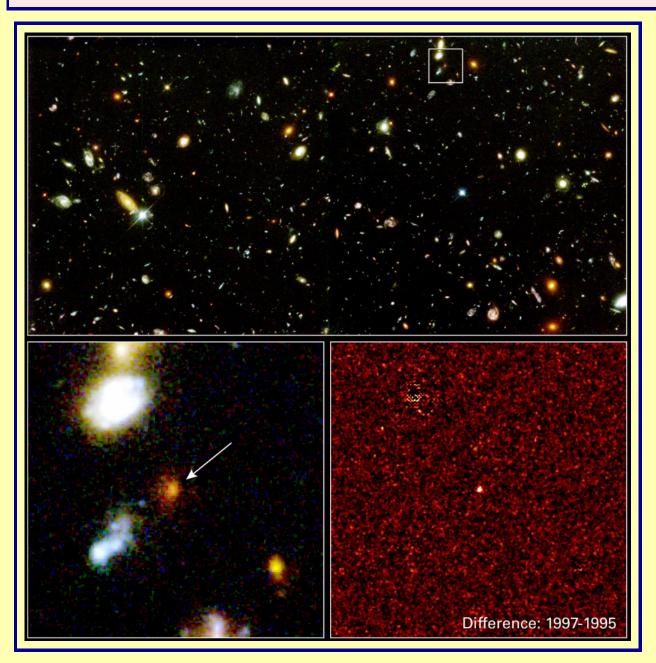


Velocitá (cz) verso distanza (D_L)

- **♠** Perlmutter
- ♠ Garnavich
- closed $\Omega=2$
- critical $\Omega=1$
- empty $\Omega = 0$
- steady states

Un' espansione piú lenta nel passato implica che una galassia raggiunge una data velocitá (redshift) in un tempo maggiore, e quindi a distanze maggiori rispetto a quanto predicibile basandosi sulla attuale velocitá di espansione. Ovviamente questo effetto poteva essere dovuto anche ad una attenuazione della luminositá causata da un eccesso di 'polvere cosmica'.

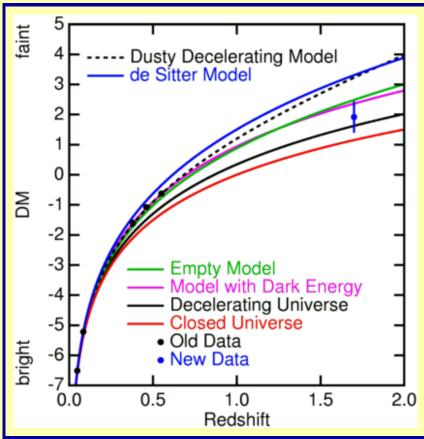
Nell' Aprile del 2001 fu annunciato che l' analisi di una Supernova scoperta dall' Hubble Space Telescope nel 1997, la SN piú remota mai osservata, forniva una evidenza diretta di una passata fase di decelerazione dell' Universo. Alla base di questa deduzione stá il fatto che la SN1997ff, ad un redshift $z\approx 1.7$, risulta piú luminosa di quanto implicato da una accelerazione. Questo esclude che l' attenuazione della luminositá delle SN a $z\approx 0.5$ sia dovuta a polveri cosmiche, ed indica come il fenomeno dell' accelerazione sia relativamente recente. Si puó dedurre che l' energia del vuoto (l' energia oscura) abbia cominciato a dominare sulla materia a $z\approx 0.5$, e che oggi $\Omega_{\Lambda}\approx 0.7$ e $\Omega_{M}\approx 0.3$.



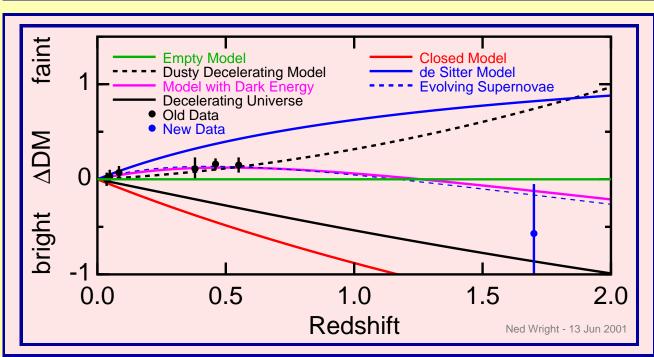
http://oposite.stsci.edu/pubinfo/pr/2001/09/

SN a grande redshift e modelli cosmologici

Impatto della SN1997ff nel discriminare fra diversi modelli.



La SN1997ff é fra 0 ed 1 magnitudine piú luminosa di quanto sarebbe in un Universo vuoto ($\Omega=0$) mentre le SN precedenti a $z\sim0.5$ sono meno luminose che in un Universo con $\Omega=0$. Questo é consistente con modelli cosmologici che includono una componente di energia oscura (costante cosmologica), ed inconsistente con alcuni altri modelli.



Evidenze del Big Bang: la radiazione Cosmica di Fondo.

La relazione trovata da Hubble fra velocitá (redshift) e distanza di luminositá suggerisce l' idea che l' Universo abbia cominciato ad espandersi (esplosivamente) a partire da una configurazione di dimensioni molto piccole, ed altissime densitá e temperature. Esistono evidenze sperimentali di questa congettura?

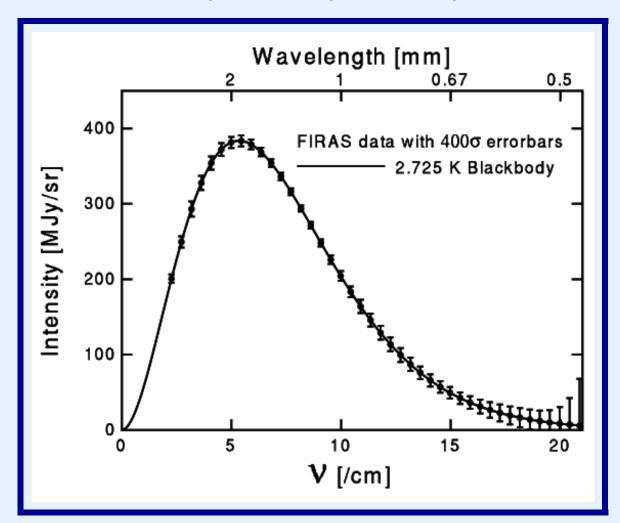
Il disaccopiamento materia-energia e la ricombinazione

- A temperature $T>3,000^{\circ}K$ ($\lambda\sim1\mu$ m, $E_{\gamma}\sim1$ eV) l' urto continuo di fotoni con elettroni mantiene la materia (elettroni e nuclei carichi) ionizzata (plasma). A causa delle continue diffusioni, nel background di particelle cariche la radiazione non si propaga liberamente.
- A temperature un po' inferiori, l' energia dei fotoni diventa insufficiente per ionizzare, si formano atomi neutri e l' Universo improvvisamente diventa trasparente alla luce. I fotoni reduci dall' ultimo processo di diffusione danno luogo a una radiazione fossile.

Storia della scoperta della Radiazione Cosmica di Fondo

- Nel 1964 i due radioastronomi A. Penzias e R. Wilson utilizzarono una antenna, originalmente costruita per comunicazioni col satellite Echo, per rivelare radio-onde ad elevate latitudini galattiche.
- L'antenna risultó affetta da piú rumore di quanto non si riuscisse a spiegare. Il rumore, captato alla lunghezza d'onda di 7,35 centimetri, era indipendente dalla direzione e dall'ora del giorno.
- Penzias e Wilson descrissero il rumore in termini della temperatura equivalente di corpo nero. Era compresa fra 2,5 e 3,5 gradi Kelvin.
- ullet Casualmente vennero a conoscenza dei calcoli di P. Peebles, un teorico di Princeton, che suggerivano l' esistenza di un fondo di rumore radio a $T\approx 10^o K$ residuo fossile del Big Bang. Predizioni analoghe erano giá state formulate nel 1948 da Alpher ed Herman (collaboratori di G. Gamow), e nel 1964 in Russia da Ja. B. Zel'dovich, e da F. Hoyle e R.J. Taylor in Inghilterra.
- Contemporaneamente, Dicke, Roll e Wilson, stimolati dai calcoli di Peebles, stavano installando a Princeton una piccola antenna per cercare rivelare la radiazione di fondo.

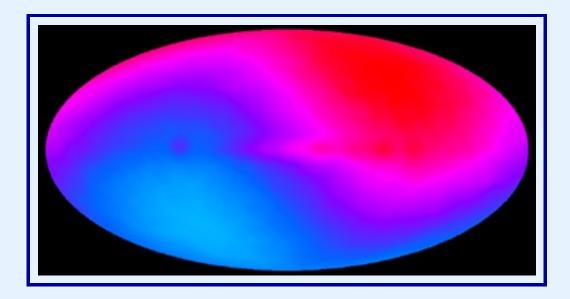
- Messisi in contatto, i due gruppi decisero di pubblicare due comunicazioni abbinate sui risultati di Penzias e Wilson: una sulle osservazioni (Penzias e Wilson) ed una sull' interpretazione cosmologica (Dicke, Peebles, Roll e Wilkinson).
- Una misura di un eccesso di temperatura di antenna a 4,080 Mc/s fu pubblicato sull' Astrophysical Journal nel Giugno del 1965. Penzias e Wilson ricevettero il premio Nobel per la loro scoperta nel 1962.



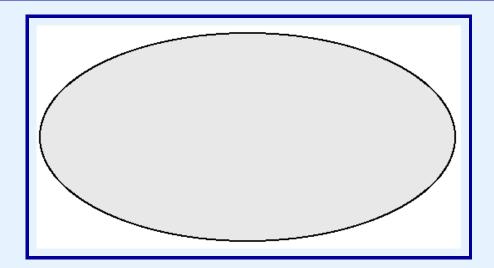
L' informazione più accurata sullo spettro della Radiazione Cosmica di Fondo ci é fornita dal Far Infrared Absolute Spectrophotometer (FIRAS) a bordo del satellite Cosmic Background Explorer (COBE). Lo spettro della radiazione di fondo é praticamente un perfetto spettro di corpo nero con una temperatura di $2.725\pm0.0002^{\circ}K$. Questi dati rappresentano una conferma della teoria del Big Bang di precisione straordinaria. La figura mostra uno spettro teorico di radiazione di corpo nero a $2.725^{\circ}K$, con gli errori sperimentali di FIRAS ingranditi di 400 volte. Asse x: numero d' onda. Asse y: potenza della radiazione per unitá d'area, unitá di frequenza e unitá di angolo solido.

Anisotropia della Radiazione Cosmica di Fondo

L' anisotropia di dipolo della CMBR (osservata per la prima volta da Conklin nel 1969) é dovuta al moto della Terra rispetto al fondo cosmico, ed indica una velocitá di 370 km/sec. La parte rossa (blu) é piú calda (fredda) di un fattore $v/c \cdot T_o$ (effetto Doppler).

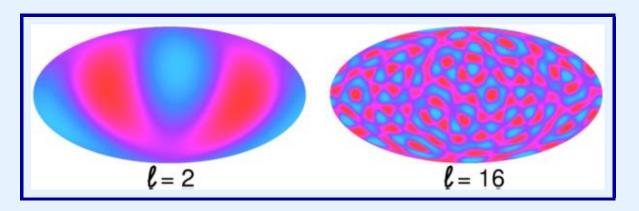


Sottratta la componente di dipolo, la CMBR é altamente isotropa, a livello di una parte in 10⁵. Ció conferma la validitá del Principio Cosmologico di un Universo Omogeneo ed Isotropo.

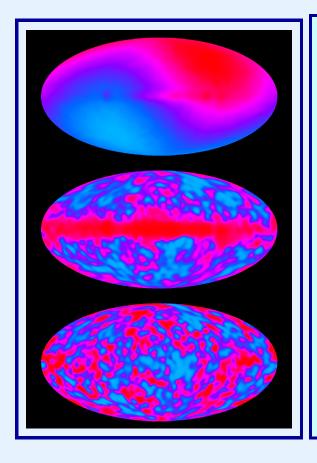


La figura mostra una mappa della temperatura (sottratta la componente di dipolo) in una scala dove 0 oK corrisponde al nero e 3 oK al bianco.

Nell' aprile del 1992 COBE misuró per la prima volta l'anisotropia autentica della CMBR. Il power spectrum angolare dell'anisotropia contiene fondamentali informazioni sulle fluttuazioni di densitá primordiali dell' Universo $(\frac{\delta T}{T} \sim \frac{\delta \rho}{\rho})$, sulla densitá totale di energia Ω , sul contributo della materia Ω_M e della sola materia barionica Ω_B e della dark energy Ω_Λ . Questo é un campo di ricerca estremamente attivo e fornisce continuamente nuove informazioni.



Il power spectrum angolare é una mappa di quanto la temperatura varia da punto a punto nel cielo, rispetto alla separazione angolare fra i punti. Per esempio $\ell=2(16)$ indica 2 (16) cicli della fluttuazione δT nel cielo.



La figura mostra dati del satellite COBE:

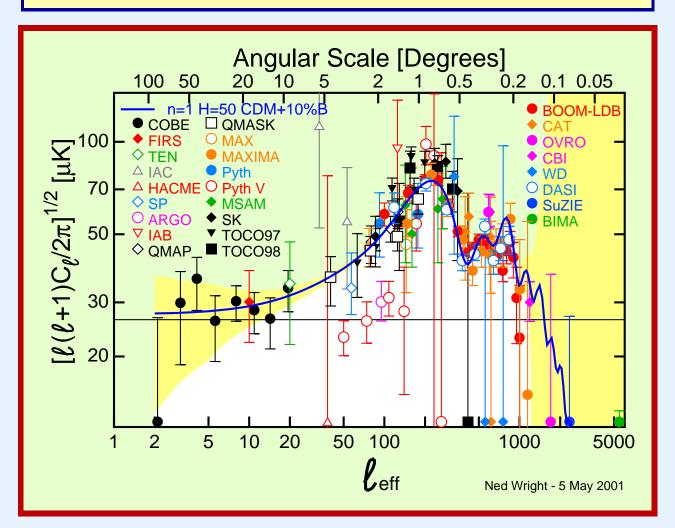
Fig. 1: l'anisotropia dominante dalla componente di dipolo dovuta al moto della Terra.

Fig. 2: l'anisotropia con la componente di dipolo sottratta. La fascia equatoriale estremamente intensa nella seconda figura corrisponde alla emissione locale dal piano galattico.

Fig. 3: Le fluttuazioni della CMBR dopo la sottrazione della componente galattica della radiazione.

Misure dei picchi acustici del power spectrum

La seguente figura dá una idea della quantitá di attivitá sperimentale relativa alla misura dei "picchi acustici" del power spectrum della radiazione cosmica di fondo. Sono graficati 95 punti sperimentali (a differenti valori di ℓ) di 25 esperimenti diversi (satelliti, palloni stratosferici, ed esperimenti al suolo).



Due satelliti, il Microwave Anisotropy Probe (MAP) della NASA, ed il PLANCK Surveyor dell' ESA, saranno messi in orbita nei prossimi anni specificatamente per tracciare una mappa ad alta risoluzione dell' anisotropia della CMBR.

Di cosa é fatto l'Universo ?

I dati relativi ai picchi acustici della radiazione cosmica di fondo, insieme ai dati delle SN a grande redshift (e corroborati anche da misure di altro tipo) conducono ai seguenti risultati relativi alla densitá di energia dell' Universo:

$$\Omega \approx 1$$

$$\Omega_{\Lambda}pprox 0.7$$

$$\Omega_Mpprox 0.3$$

$$\Omega pprox 1$$
 $\Omega_{\Lambda} pprox 0.7$ $\Omega_{M} pprox 0.3$ $\Omega_{B} pprox 0.05$

La materia a noi nota, cioé la materia barionica, costituisce solo il 5% dell' Universo!

La componente dominante é rappresentata da Ω_{Λ} : una (misteriosa) ENERGIA OSCURA

La materia non relativistica é solo in piccola parte barionica

$$\Omega_M - \Omega_B = \Omega_{??}$$

La maggior parte della materia nell' Universo é una forma di MATERIA OSCURA (Ω_{DM})!

Alcuni Problemi del Modello del BigBang

II valore della Costante Cosmologica Λ

Le osservazioni più recenti indicano che lo spazio é riempito uniformemente da una forma di **energia oscura**. Pur essendo la componente dominante, questa densitá é estremamente piccola: $\rho_{\Lambda} \sim 10^{-30} \, \text{g/cm}^3$. Anche limitandosi alla fisica del Modello Standard (che pensiamo di comprendere bene e di cui abbiamo eccellenti verifiche sperimentali) i contributi all' energia del vuoto predetti sono 55 ordini di grandezza (10^{55} !!) più grandi. Come e da che cosa questi contributi siano 'cancellati' rappresenta senza dubbio uno dei più grandi probelmi insoluti di oggi.

L'Orizzonte degli Eventi e l' Isotropia della CMBR

La quasi perfetta isotropia della CMBR pone un problema alla teoria del Big Bang. Il fattore di scala dell' Universo R(t) cioé la distanza tipica fra due galassie, aumenta come $R(t) \propto t^{1/2}$ in un Universo dominato dalla radiazione, e come $R(t) \propto t^{2/3}$ se domina la materia. Invece l' Orizzonte degli Eventi, cioé la parte dell' Universo in contatto causale con noi, aumenta proporzionalmente al tempo (moltiplicato per la velocitá della luce): $R_O(t) \propto t$ e quindi piú rapidamente dell' espansione. Quindi ad ogni istante entrano nel nostro orizzonte nuove regioni dell' Universo tutt'ora causalmente disconnesse fra loro. Perché la CMBR ha esattamente la stessa temperatura e ampiezze di fluttuazioni, in regioni causalmente disconnesse? (La teoria nota come Inflazione fornisce una spiegazione convincente.)

Il valore nullo della curvatura dell' Universo

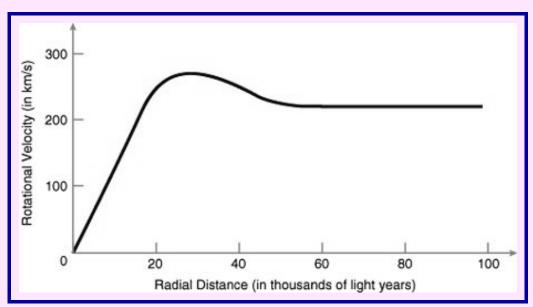
Un valore iniziale della densitá d'energia dell' Universo differente anche infinitesimalmente dal valore critico ρ_c risulterebbe oggi in un valore di Ω completamente differente da 1. Perché $\Omega \approx 1$? (La teoria cosmologica dell' Inflazione puó spiegare pure questo fatto.)

MATERIA OSCURA

La presenza di materia oscura nell' Universo fú dedotta indirettamente giá parecchi anni fa dallo studio del moto di stelle, galassie, ammassi e superammassi di galassie.

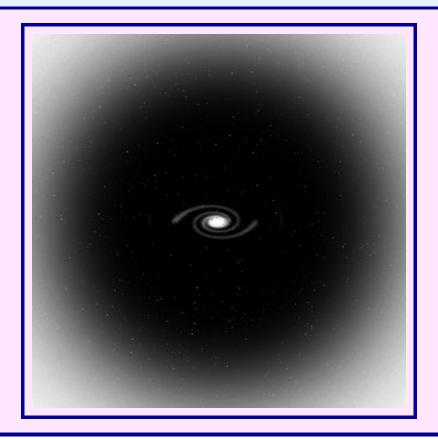


La velocitá delle stelle in rotazione attorno ad un centro galattico dovrebbe diminuire in un modo ben definito con l'aumentare della distanza. Sorprendentemente, lo studio del moto di ammassi di stelle in rotazione attorno alla galassia di Andromeda mostró una chiara anomalia.



La velocitá di rotazione delle stelle in Andromeda non decresce costantemente verso le regioni più esterne della galassia. Invece, dopo una leggera decrescita, la curva di velocitá resta costante fino alle più grandi distanze. Risultati simili si ottengono dallo studio delle curve di rotazione della Via Lattea e di altre galassie a spirale.

Se la legge di Newton é corretta pure a distanze galattiche, necessariamente deve esistere una grande quantitá di materia invisibile negli aloni delle galassie a spirale. Un' altra indicazione proviene dal fatto che i sottili dischi rotanti delle galassie a spirale non sembrano essere abbastanza stabili rispetto alle forze gravitazionali, e dovrebbero disgregarsi in frammenti. I grandi aloni di materia oscura, in cui sono molto probabilmente immersi li possono rendere stabili.



Una nuova particella elementare?

Le teorie piú svariate sono state proposte per cercare di identificare la natura della materia oscura, e gli sforzi sperimentali per cercare di rivelarla direttamente continuano da molti anni. Una delle teorie piú studiate oggi in Fisica delle Particelle Elementari (ma ancora in attesa di conferma sperimentale) la Supersimmetria, predice in modo abbastanza naturale l' esistenza di una particella stabile, neutra, con interazioni estremamente deboli, ed una massa pari ad alcune decine di masse del protone: il neutralino. Molti fisici concordano nel ritenere il neutralino come il perfetto candidato per la Materia Oscura.

La Nucleosintesi Primordiale

Un grande successo del Modello del BigBang

Col raffreddarsi dell' Universo, a temperature inferiori a 300 MeV, i quarks cessano di esistere liberi, ed adronizzano formando protoni p, neutroni n e le loro antiparticelle \bar{p} , \bar{n} .



Quasi istantaneamente \bar{p} ed \bar{n} scompaiono annichilandosi con p ed n. La presenza di una asimmetria fra materia ed antimateria permette la sopravvivenza di circa un nucleone ogni 10^{10} fotoni. (La generazione di questa asimmetria é detta Bariogenesi, e rappresenta un altro fenomeno con profonde connessioni con la fisica delle particelle elementari, non ancora completamente compreso.)



Le reazioni elettrodeboli $e^-+p\leftrightarrow \nu_e+n$ (analoghe al decadimento β) mantengono in equilibrio le abbondanze di p ed n (soppresse esponenziale proporzionalmente alle rispettive masse): $N_p{\sim}e^{-m_p/T}$, $N_n{\sim}e^{-m_n/T}$.



A causa della differenza di massa $m_n - m_p \sim 1.3$ MeV a $T \sim 1$ MeV, $N_p/N_n \sim 6$. Questo rapporto aumenterebbe fino alla scomparsa di tutti i neutroni, ma a questo punto le interazioni elettrodeboli si congelano (freeze-out) cioé la velocitá delle reazioni diventa inferiore alla velocitá di espansione dell' Universo (i 'reagenti' non si incontrano piú).



L'espansione é controllata dal prodotto della temperatura per il numero di tipi di particelle relativistiche presenti (a $T\sim 1$ MeV ci sono solo i fotoni ed i 3 tipi di neutrini).



La sintesi dei nuclei leggeri comincia. Ogni n finisce in un atomo di He con un altro n e due p. Si sintetizza cosi un nucleo di He ogni 10 nuclei di H. La predizione (confermata da misure dirette) i che circa il 25% in massa della materia barionica dell' Universo i costituita da Elio.



Predizioni chiare del BigBang sono pure le abbondanze primordiali di Deuterio, Elio-3 e Litio. Tutte le abbondanze calcolate risultano in buon accordo con le misure.



Il successo delle predizioni della nucleosintesi primordiale vincola la struttura dei modelli di Particelle Elementari.

Ad esempio un quarto tipo di neutrino (o un'altra particella tanto leggera da essere relativistica al tempo della nucleosintesi) aumenterebbe la velocitá dell' espansione dell' Universo risultando in un freeze-out anticipato, piú neutroni, e predizioni differenti per le abbondanze degli elementi leggeri (ad esempio una maggiore quantitá di Elio).



BIBLIOGRAFIA MINIMA

Libri

- Steven Weinberg, I primi tre minuti;
 Oscar Saggi Mondadori.
- Joseph Silk, The Big Bang;
 W.H. Freeman and Co. New York.

Siti Internet

- http://www.astro.ucla.edu/%7Ewright/cosmolog.htm
 (Esiste in versione in Italiano)
- http://archive.ncsa.uiuc.edu/Cyberia/Expo/cosmos_nav.html (Cosmologia)
- http://archive.ncsa.uiuc.edu/Cyberia/Expo/numrel_nav.html
 (Cosmologia Relativistica ed Astrofisica Relativistica)
- http://users.erols.com/bcccsbs/hum207.htm
 (Cosmogonie e Miti Cosmogonici.)