

Le Frontiere della Cosmologia: Materia Oscura ed Energia Oscura

Nicola Menci

Istituto Nazionale di Astrofisica

Prima donna a dirigere un osservatorio astronomico in Italia

Professore Università Trieste dal 1964; Direzione Osservatorio Astronomico di Trieste fino al 1987

Socio nazionale dei Lincei dal 1987

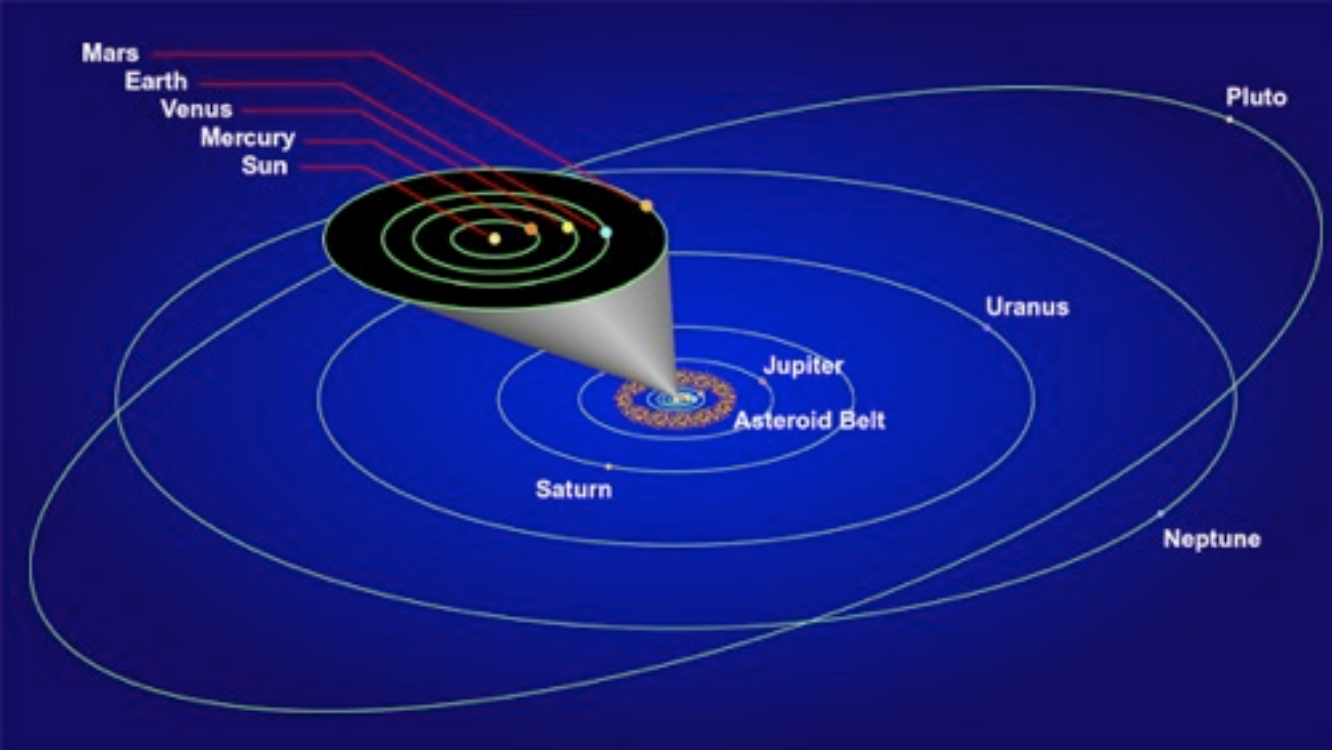
Ha contribuito alla ricerca per lo studio e la classificazione spettrale di molte categorie di stelle

A Margherita Hack va il merito di contribuire a portare l'astronomia italiana nel campo dello studio negli ultravioletti fin dagli anni settanta, con la partecipazione alla missione del satellite International Ultraviolet Explorer (Iue), lanciato il 26 gennaio 1978 da Nasa, Agenzia Spaziale Europea (Esa) e Gran Bretagna, attivo per 16 anni, fino al 30 settembre 1996.

Inizio' la sua carriera occupandosi delle Cepheidi:

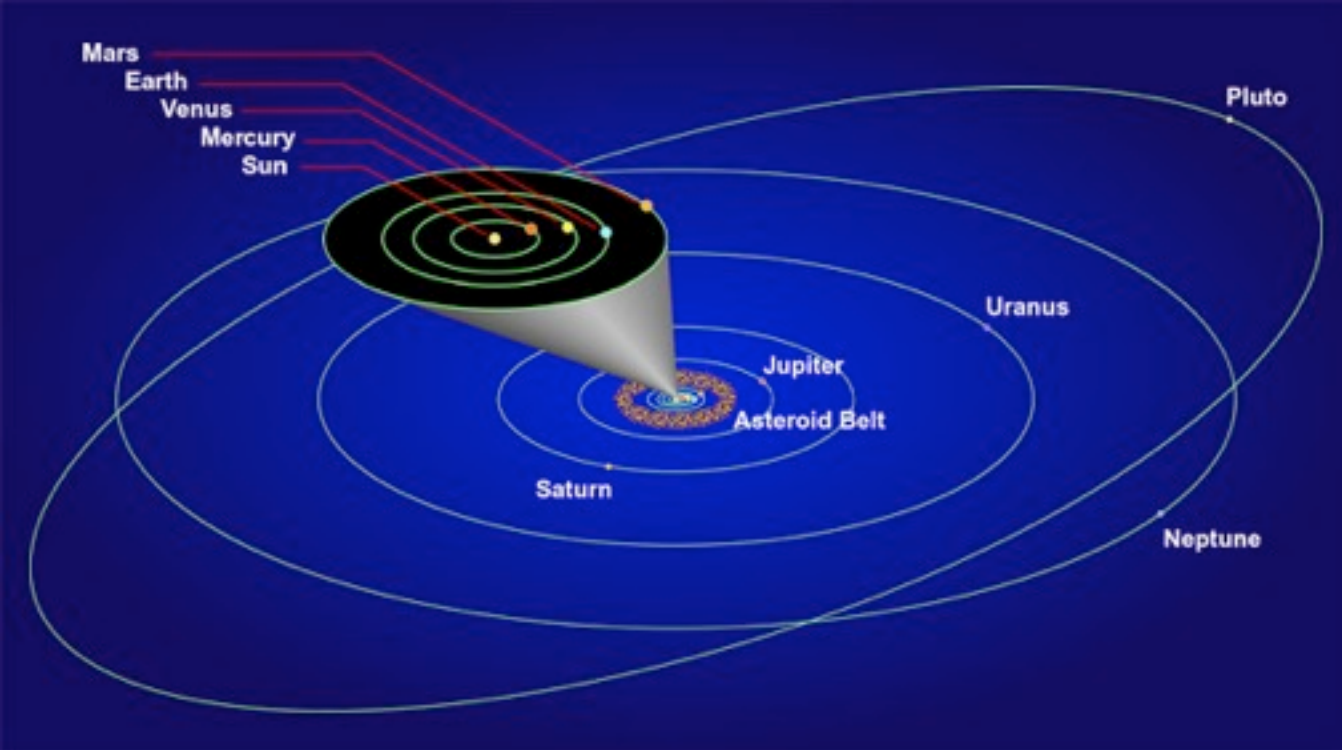
Henrietta Swan Leavitt 1912: periodo delle Cefeidi





Distanza Terra-Sole=150 mil. Km (1 ua)

Distanza Plutone-Sole $\approx$ 40 ua



Distanza Terra-Sole=150 mil. Km (1 ua)
Distanza Plutone-Sole $\approx$ 40 ua



La nostra galassia

Dimensione: 100 000 anni luce
(1 a.l.= 9500 Miliardi di km)
200 Mil. di volte il S. Solare

Contiene 100 Mld di stelle

Sistema solare

0.0006 a.l.

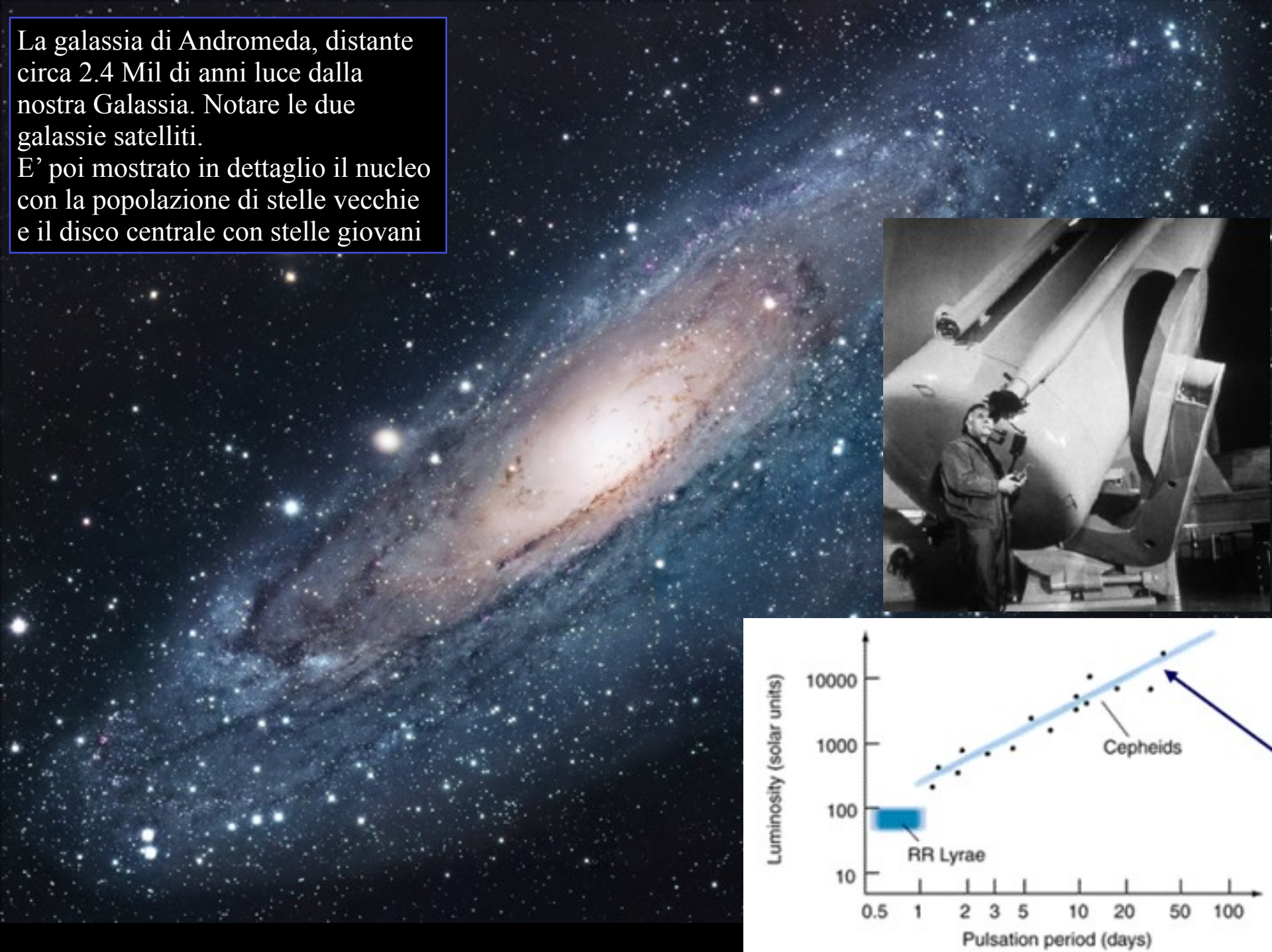


La via Lattea e le Nubi di Magellano

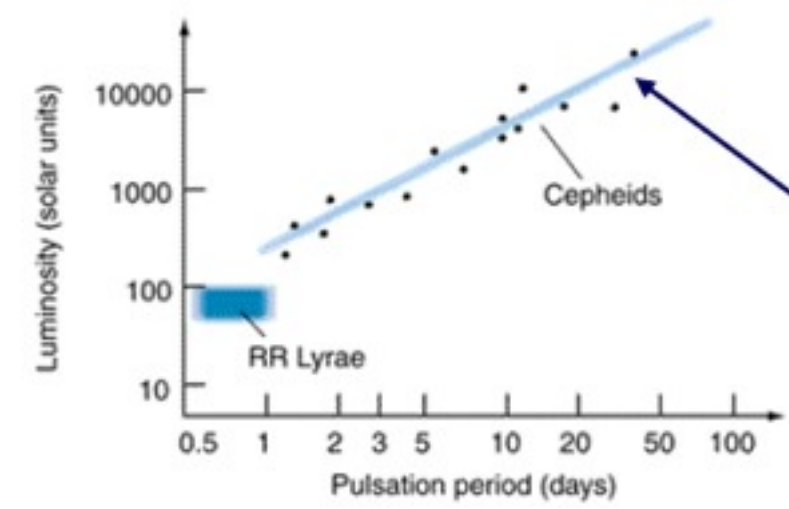


La galassia di Andromeda, distante circa 2.4 Mil di anni luce dalla nostra Galassia. Notare le due galassie satelliti. E' poi mostrato in dettaglio il nucleo con la popolazione di stelle vecchie e il disco centrale con stelle giovani





La galassia di Andromeda, distante circa 2.4 Mil di anni luce dalla nostra Galassia. Notare le due galassie satelliti. E' poi mostrato in dettaglio il nucleo con la popolazione di stelle vecchie e il disco centrale con stelle giovani

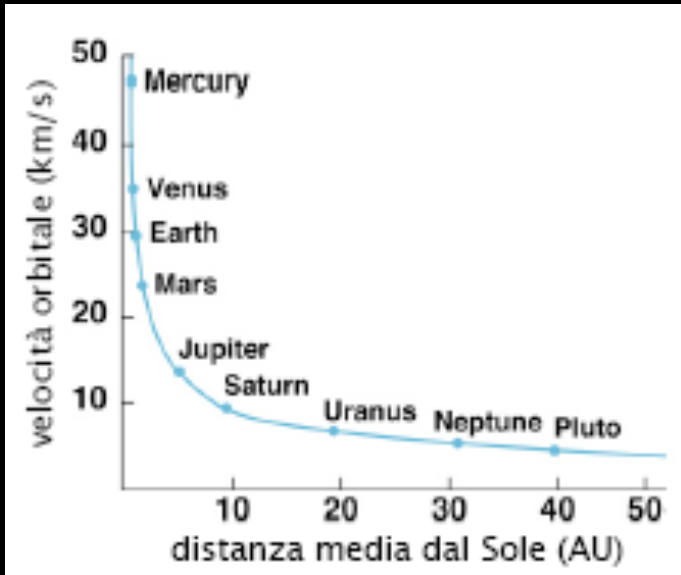




Curve di Rotazione e Materia Oscura

Orbite quasi circolari

$$v_c^2 = r |F| = \frac{GM(r)}{r}$$



M puntiforme al centro

$$v_c = \frac{\sqrt{GM}}{\sqrt{r}}$$

Kepleriana

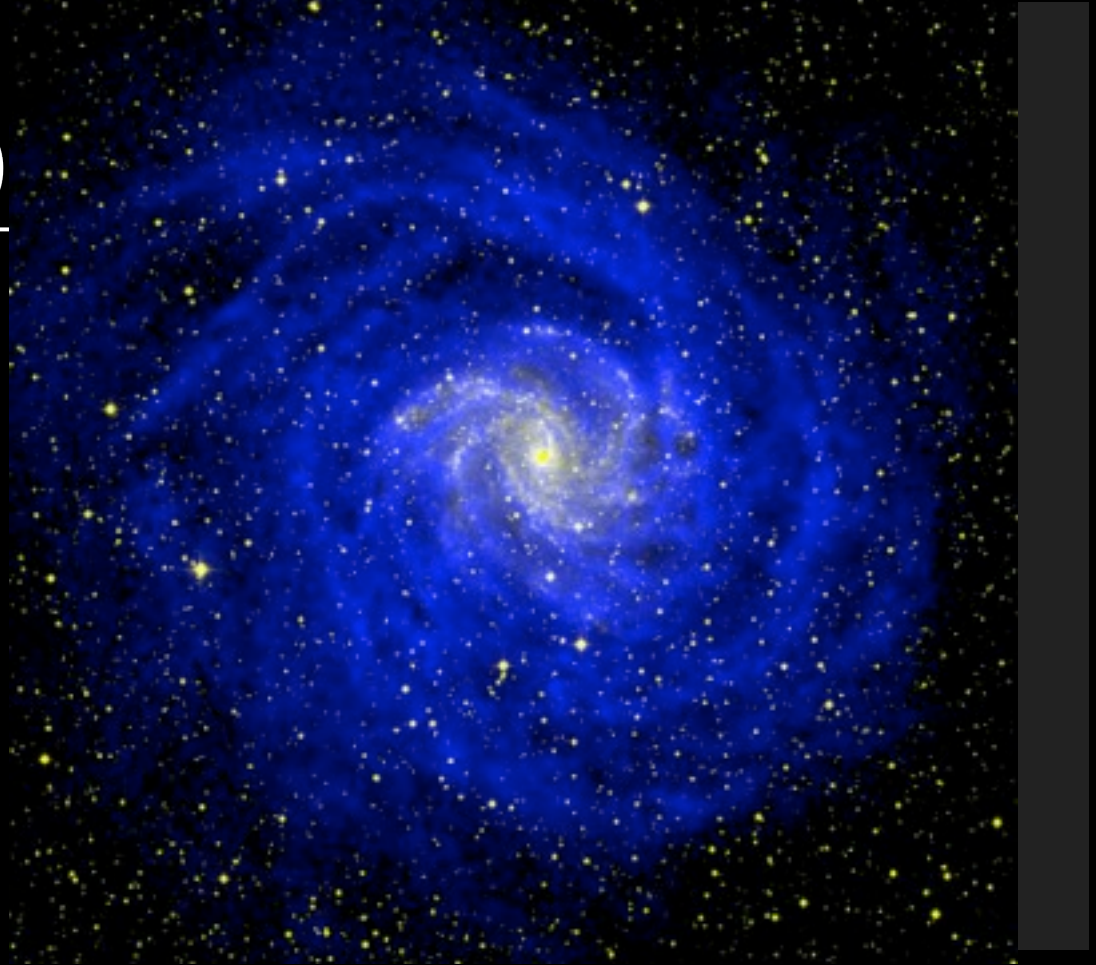
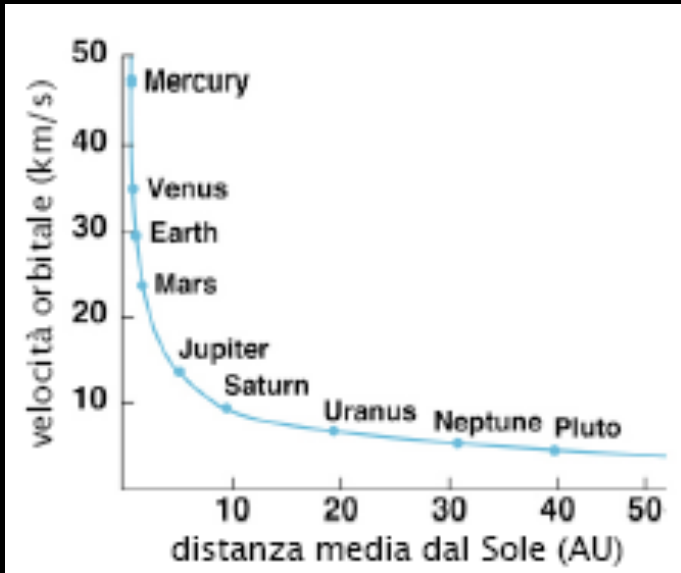


Sfera uniforme $M = (4/3) \pi r^3 \rho$

$$v_c = \sqrt{\frac{4 \pi G \rho}{3}} r$$

Orbite quasi circolari

$$v_c^2 = r |F| = \frac{GM(r)}{r}$$



M puntiforme al centro

$$v_c = \frac{\sqrt{GM}}{\sqrt{r}}$$

Kepleriana

Sfera uniforme $M = (4/3) \pi r^3 \rho$

$$v_c = \sqrt{\frac{4 \pi G \rho}{3}} r$$

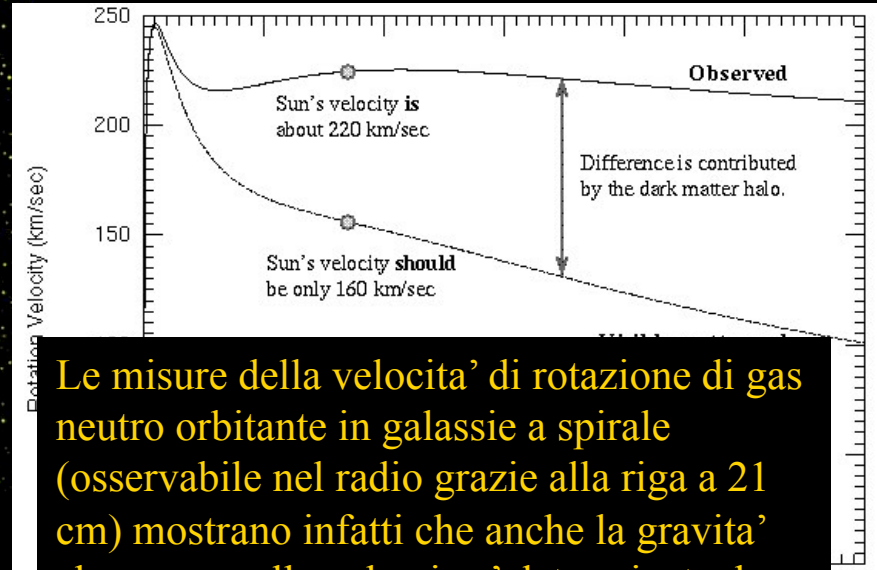
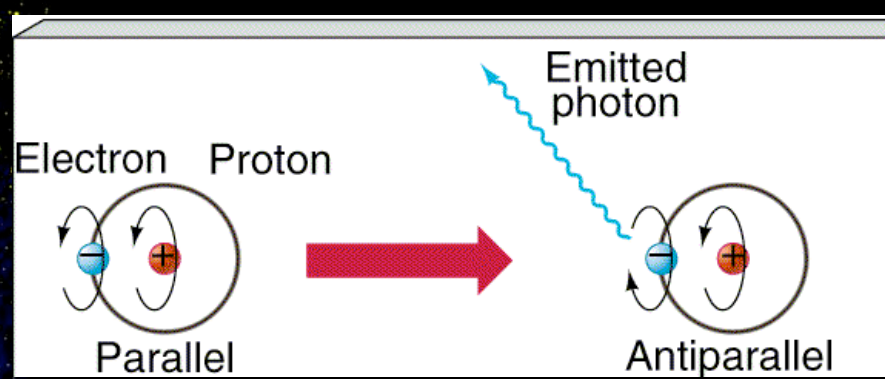


NGC 6946 from Digital Sky Survey

Blue=Westerbork Synthesis Radio Telescope 21 cm image of Neutral Hydrogen

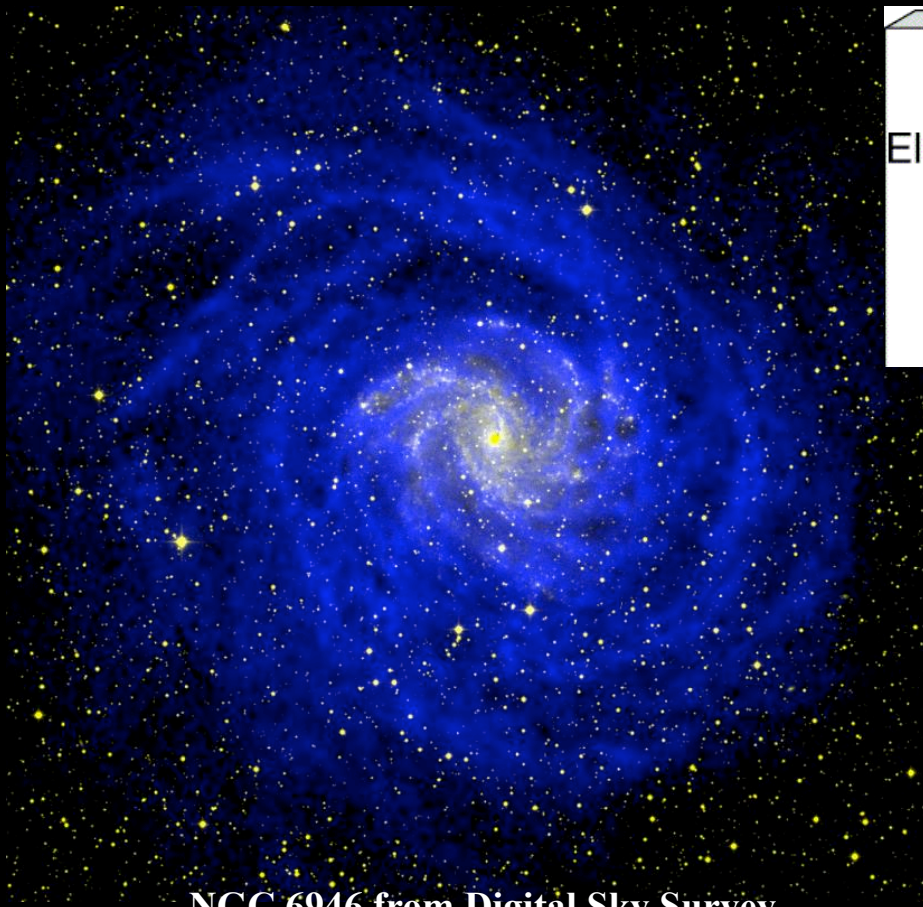
densita': $\sim 10 - 50$ atomi per cm^3

HI molto piu' esteso del disco stellare



Le misure della velocita' di rotazione di gas neutro orbitante in galassie a spirale (osservabile nel radio grazie alla riga a 21 cm) mostrano infatti che anche la gravita' che opera nelle galassie e' determinata da una massa maggiore (di decine di volte) di quella osservata in gas e stelle.

Non e' possibile osservare la transiz. a 21 cm in laboratorio perche' estremamente rara.

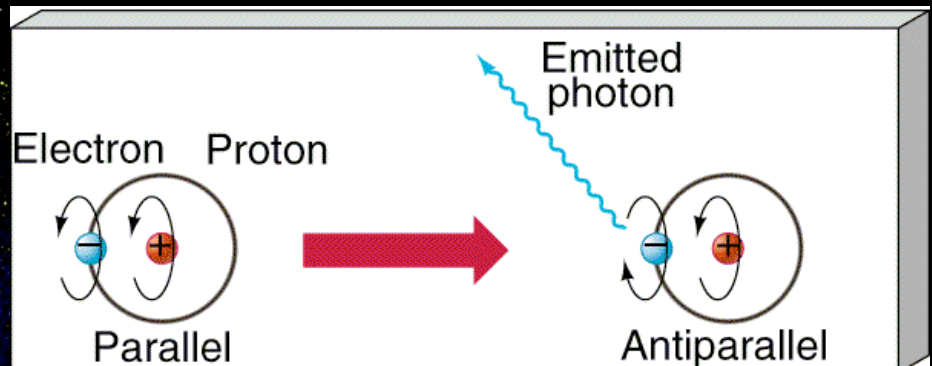


NGC 6946 from Digital Sky Survey

Blue=Westerbork Synthesis Radio Telescope 21 cm
image of Neutral Hydrogen

densita': $\sim 10 - 50$ atomi / cm^3

HI molto piu' esteso del disco stellare



Le misure della velocita' di rotazione di gas
neutro orbitante in galassie a spirale
(osservabile nel radio grazie alla riga a 21
cm) mostrano infatti che anche la gravita'
che opera nelle galassie e' determinata da
una massa maggiore (di decine di volte) di
quella osservata in gas e stelle.

Non e' possibile osservare la transiz. a 21
cm in laboratorio perche' estremamente
rara.

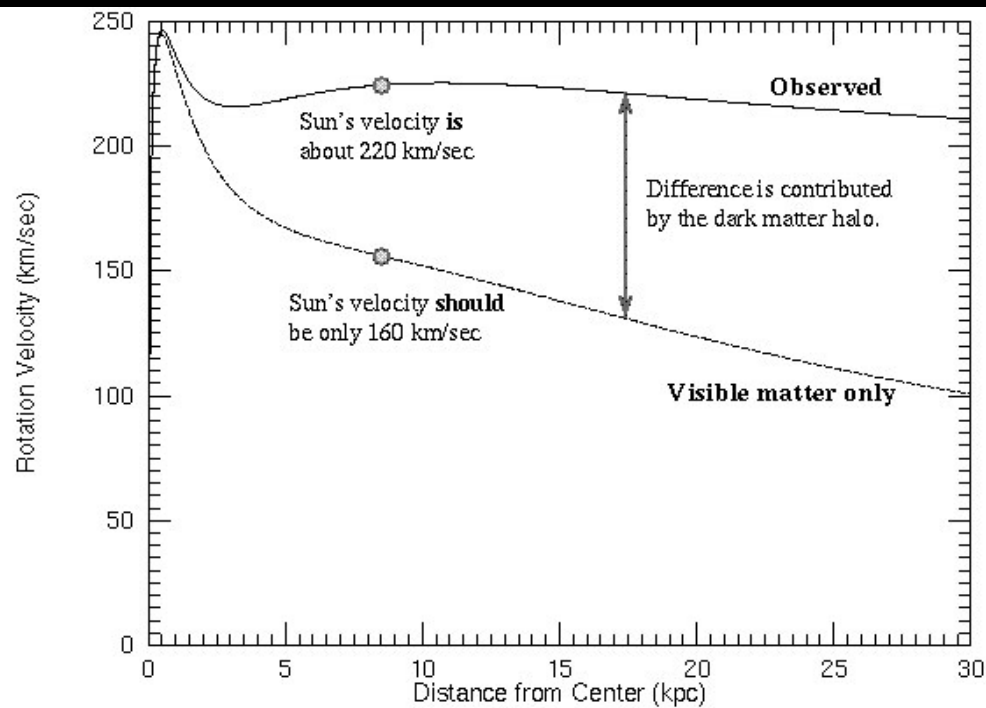


NGC 6946 from Digital Sky Survey

Blue=Westerbork Synthesis Radio Telescope 21 cm
image of Neutral Hydrogen

densita': $\sim 10 - 50$ atomi / cm^3

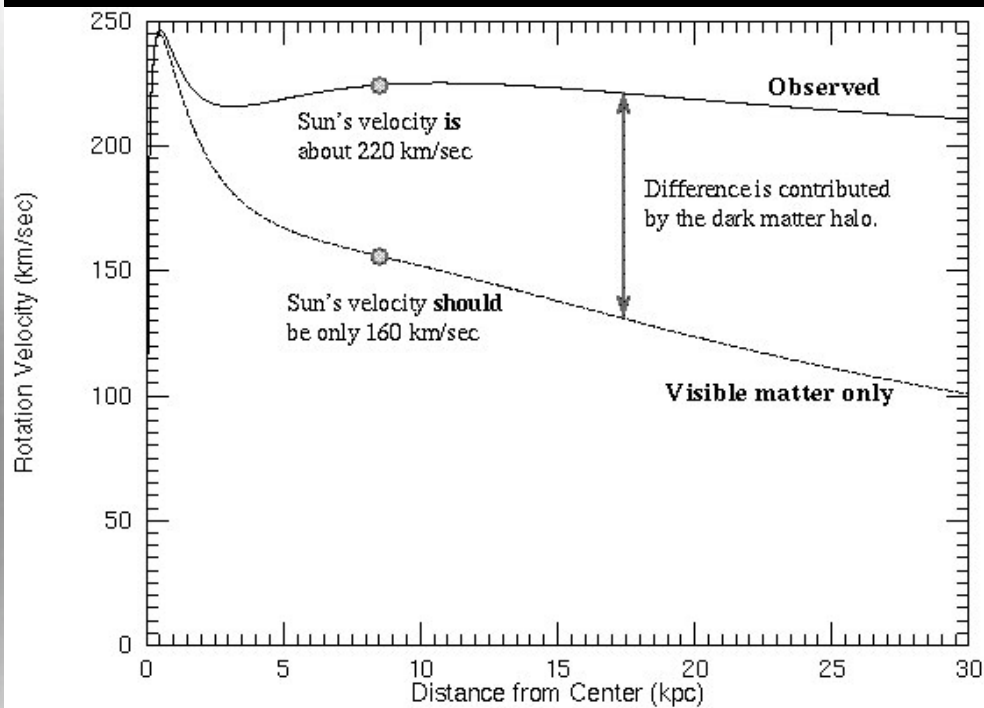
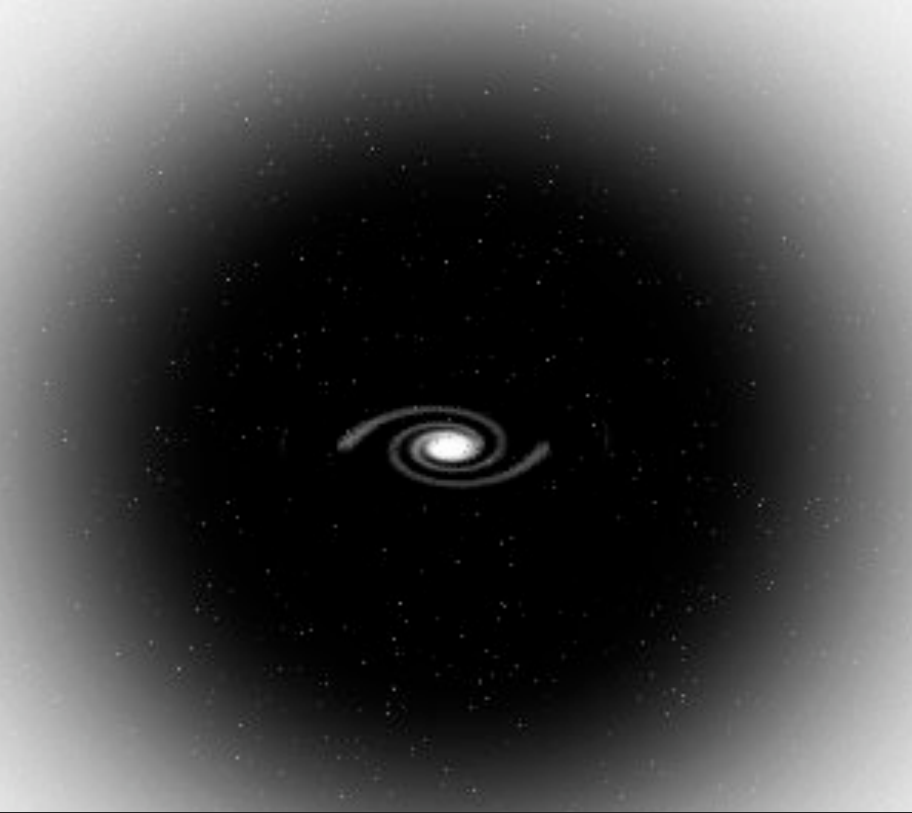
HI molto piu' esteso del disco stellare



The gravity of the visible matter in the Galaxy is not enough to explain the high orbital speeds of stars in the Galaxy. For example, the Sun is moving about 60 km/sec too fast. The part of the rotation curve contributed by the visible matter only is the bottom curve. The discrepancy between the two curves is evidence for a **dark matter halo**.

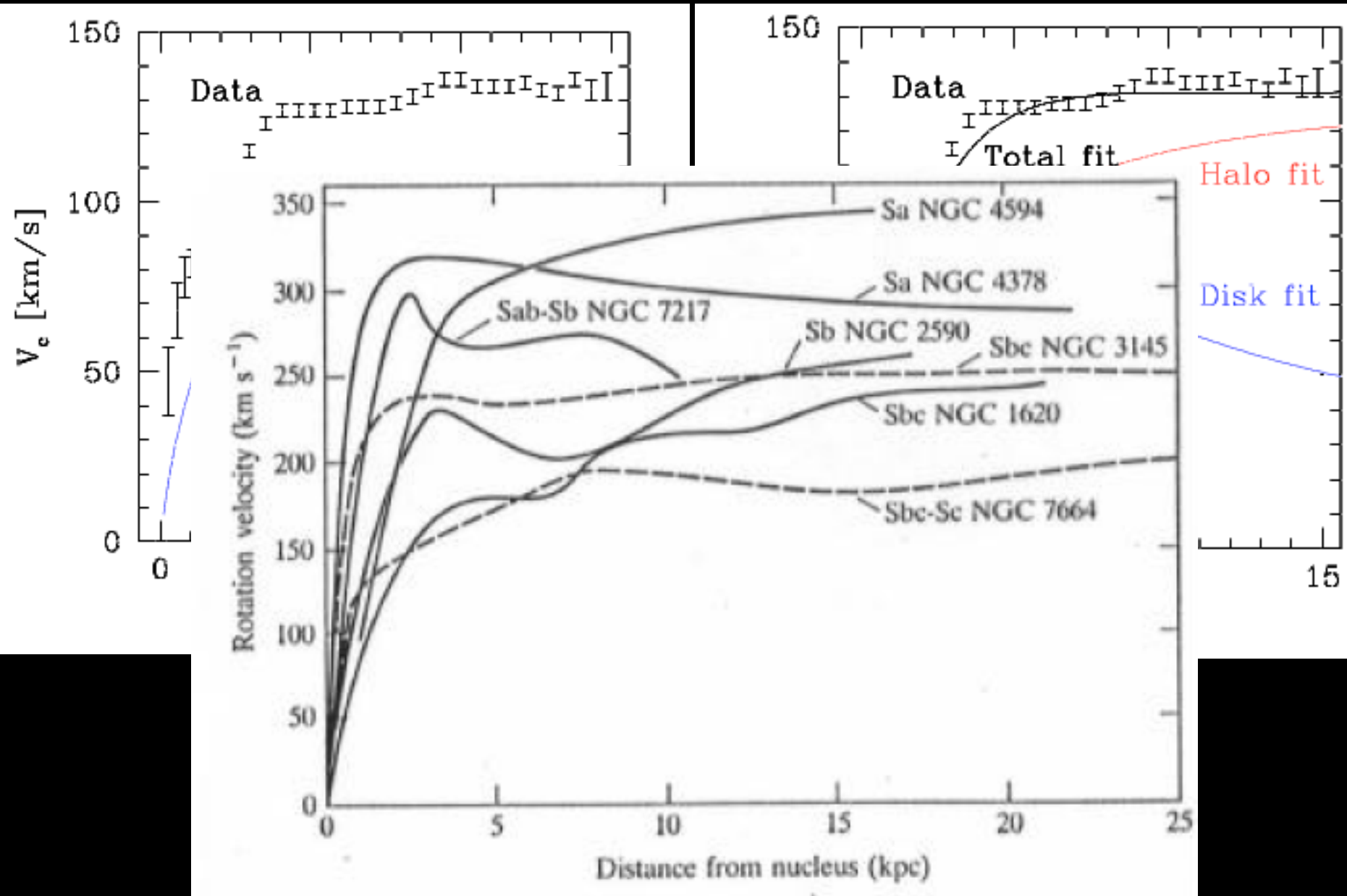
Le misure della velocita' di rotazione di gas
neutro orbitante in galassie a spirale
(osservabile nel radio grazie alla riga a 21
cm) mostrano infatti che anche la gravita'
che opera nelle galassie e' determinata da
una massa maggiore (di decine di volte) di
quella osservata in gas e stelle.

Non e' possibile osservare la transiz. a 21
cm in laboratorio perche' estremamente
rara.



The gravity of the visible matter in the Galaxy is not enough to explain the high orbital speeds of stars in the Galaxy. For example, the Sun is moving about 60 km/sec too fast. The part of the rotation curve contributed by the visible matter only is the bottom curve.

Massa Oscura $\approx$ 10 Massa Luminosa (stelle + gas)





Ammassi di galassie. Sono
composti di migliaia di galassie,
contenute in una regione di pochi
Mpc ($1 \text{ pc} \approx 3.1$ anni luce).
Velocita' medie delle galassie ≈ 1000
km/s



Ammassi di galassie. Sono
composti di migliaia di galassie,
contenute in una regione di pochi
Mpc ($1 \text{ pc} \approx 3.1$ anni luce).
Velocita' medie delle galassie ≈ 1000
km/s

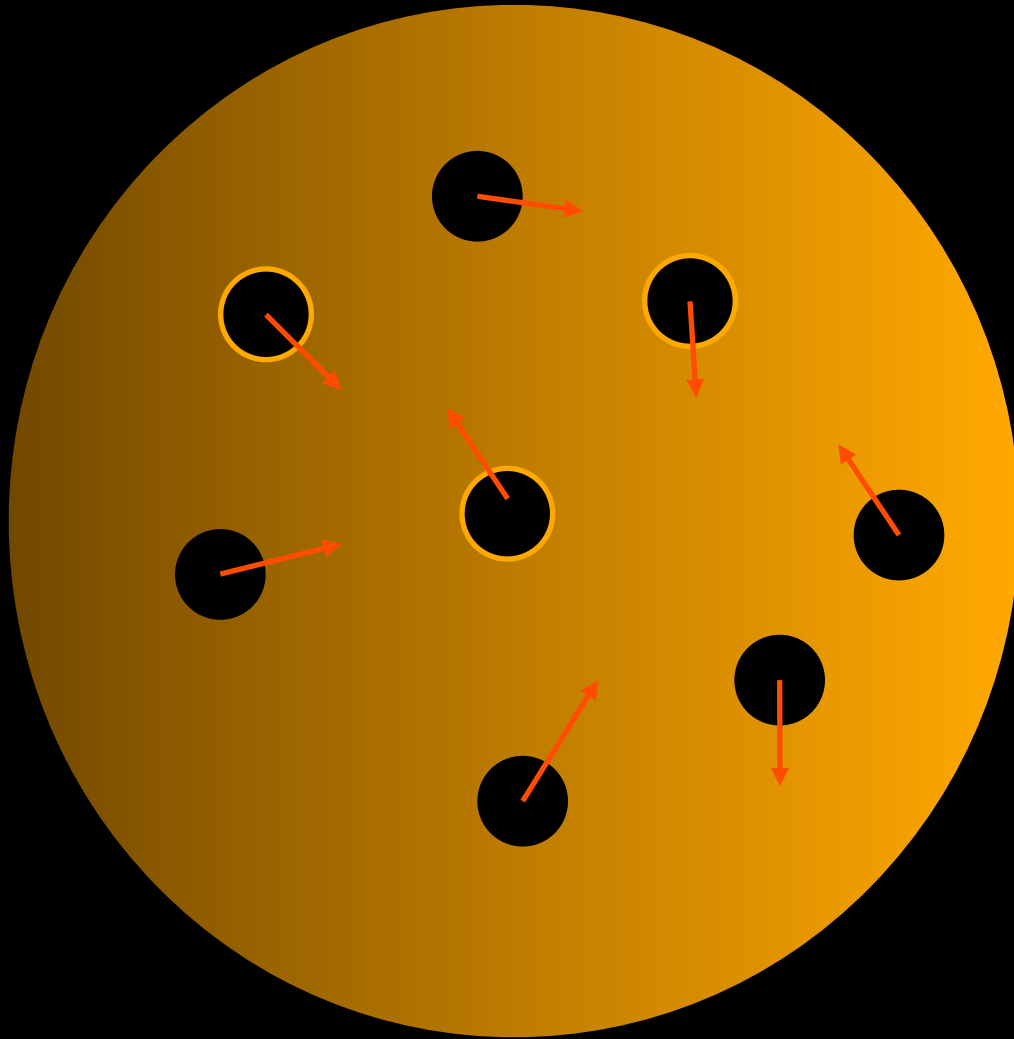


Ammassi di galassie. Sono composti di migliaia di galassie, contenute in una regione di pochi Mpc ($1 \text{ pc} \approx 3.1$ anni luce).
Velocita' medie delle galassie $\approx 1000 \text{ km/s}$

Sovente al centro degli ammassi si trova una galassia gigante ellittica

$$\langle v^2 \rangle = \frac{GM}{R}$$

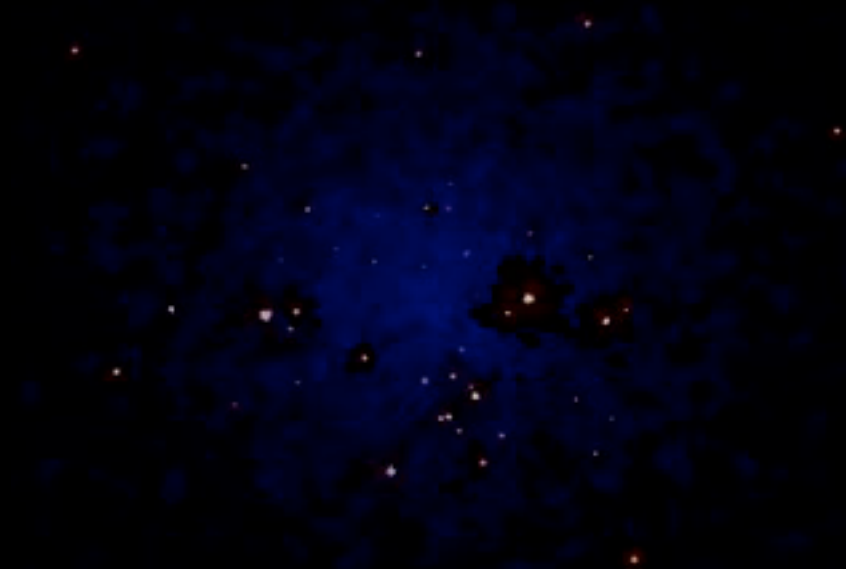
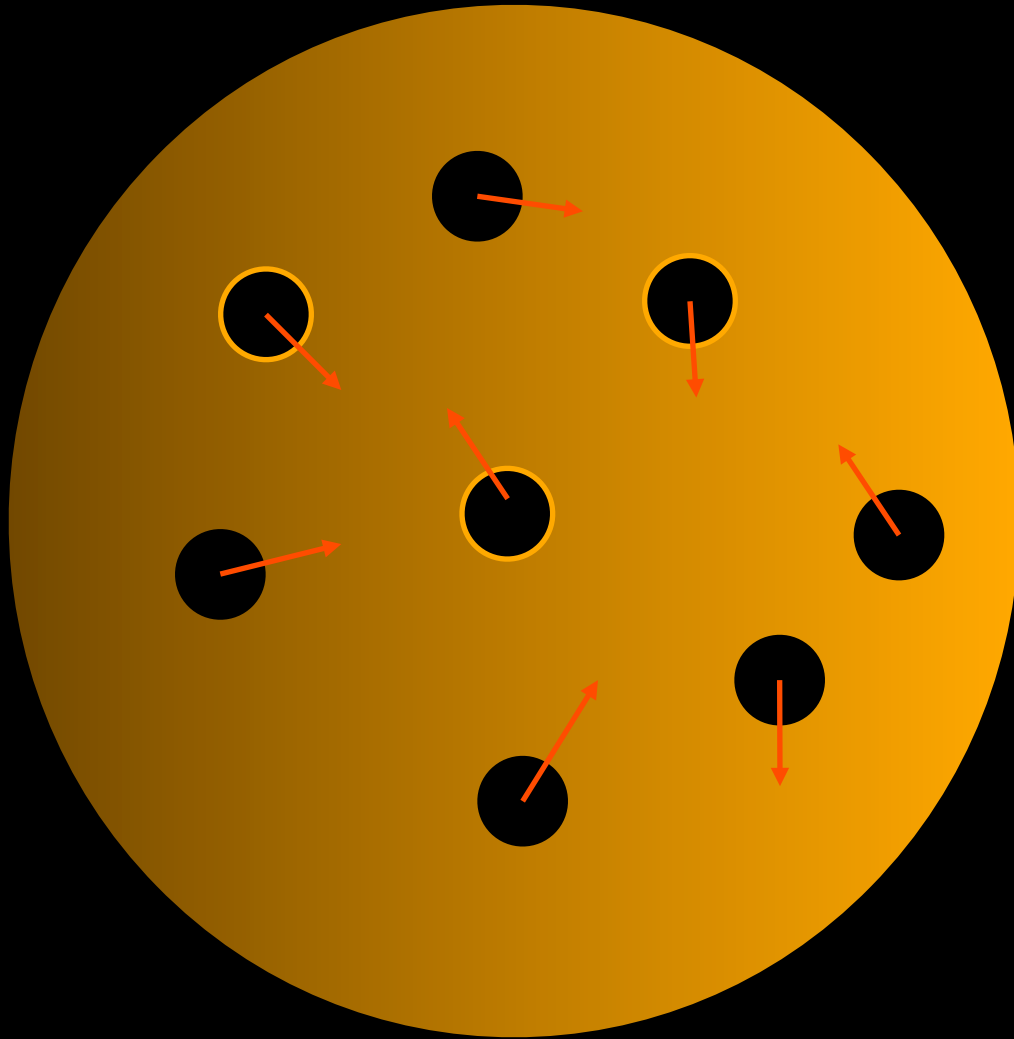
velocita' 1000 km/s $\rightarrow$ Masse $10^{15} M_{\odot}$
 (100–300 volte la massa in stelle e gas
 data dalla somma delle galassie)



La dispersione di velocita' delle galassie all'interno di un ammasso (cosi' come la temperatura del gas diffuso) sono determinati dalla massa totale dell'ammasso. Essa infatti determina l'intensita' del campo gravitazionale che imprime velocita' sia alle galassie che alle particelle di gas

$$\langle v^2 \rangle = \frac{GM}{R}$$

velocita' 1000 km/s $\rightarrow$ Masse $10^{15} M_{\odot}$
 (100–300 volte la massa in stelle e gas
 data dalla somma delle galassie)



La dispersione di velocita' delle galassie all'interno di un ammasso (cosi' come la temperatura del gas diffuso) sono determinati dalla massa totale dell'ammasso. Essa infatti determina l'intensita' del campo gravitazionale che imprime velocita' sia alle galassie che alle particelle di gas

$$\langle v^2 \rangle = \frac{GM}{R}$$

velocita' 1000 km/s $\rightarrow$ Masse $10^{15} M_{\odot}$
(100–300 volte la massa in stelle e gas
data dalla somma delle galassie)

F. Zwicky fu il primo a notare
la necessita' di Materia Oscura
per spiegare la velocita' delle
galassie negli ammassi (1933)

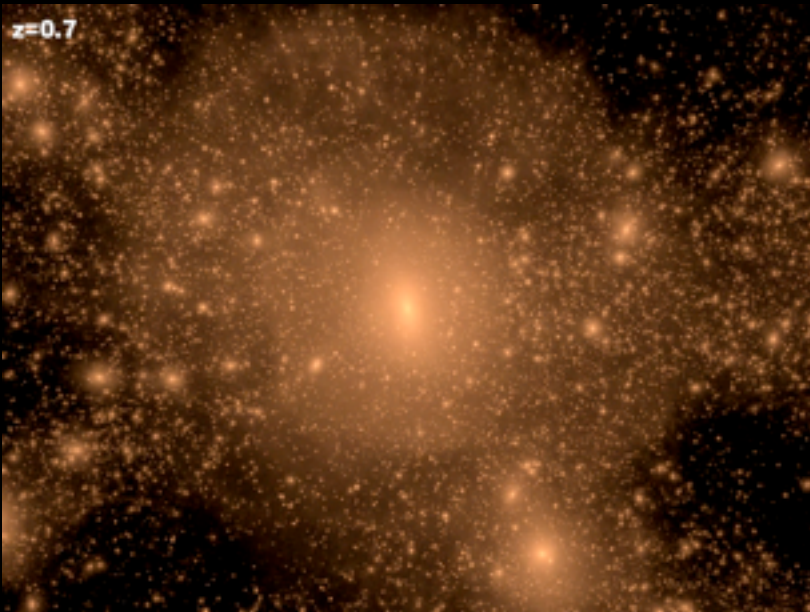
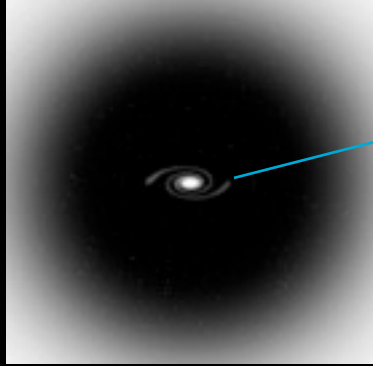
propose anche l'utilizzo delle lenti
gravitazionali
ipotizzo' che le supernovae potessero
creare stelle di neutroni e raggi
cosmici



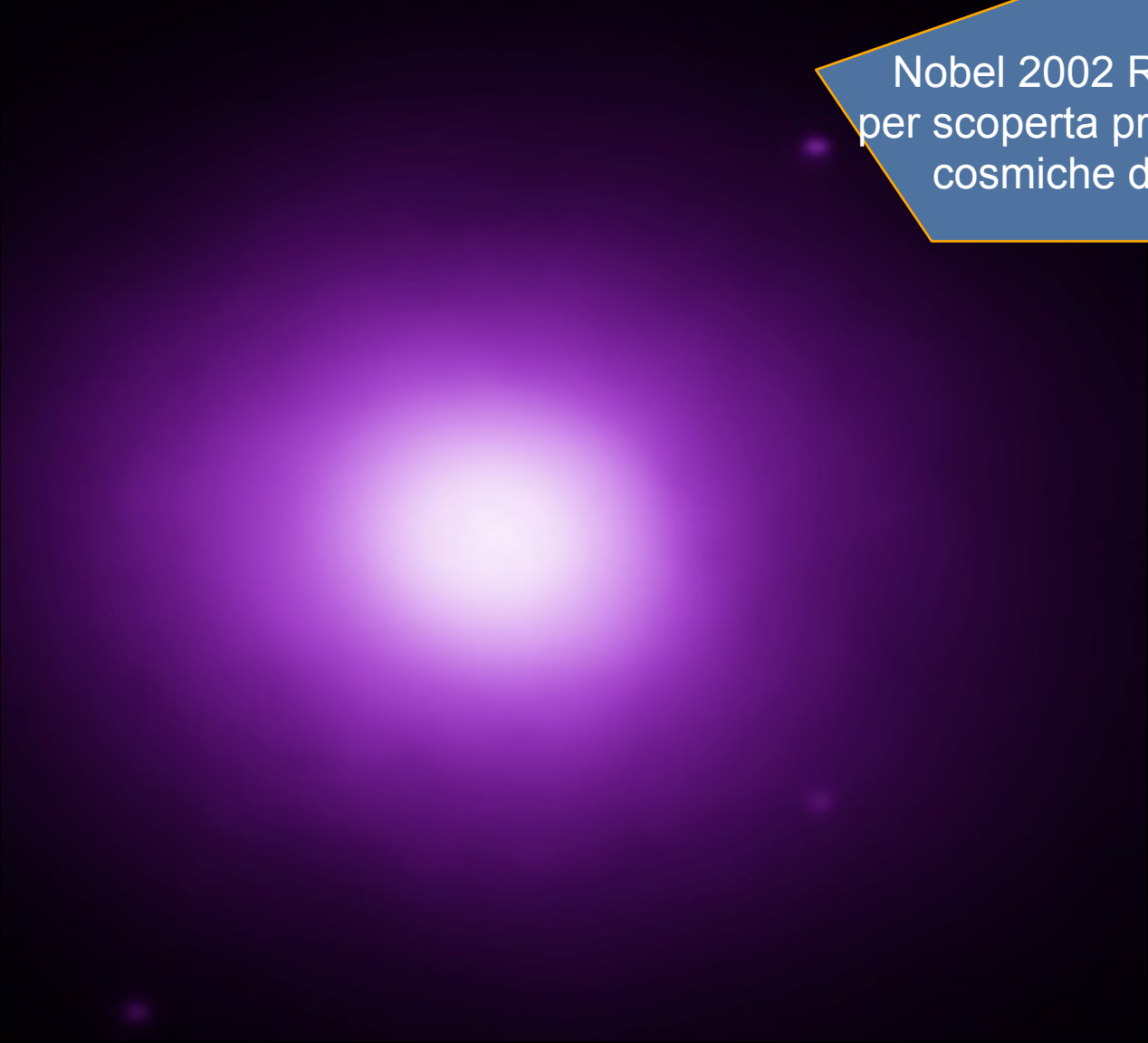
La dispersione di velocita' delle
galassie all'interno di un ammasso
(cosi' come la temperatura del gas
diffuso) sono determinati dalla
massa totale dell'ammasso.
Essa infatti determina l'intensita' del
campo gravitazionale che imprime
velocita' sia alle galassie che alle
particelle di gas

Materia Oscura

90 % della massa
degli ammassi
e' in materia oscura



*simulazione da
Diemand, Kuhlen, Madau 2006*



Nobel 2002 R. Giacconi
per scoperta prime sorgenti
cosmiche di raggi X

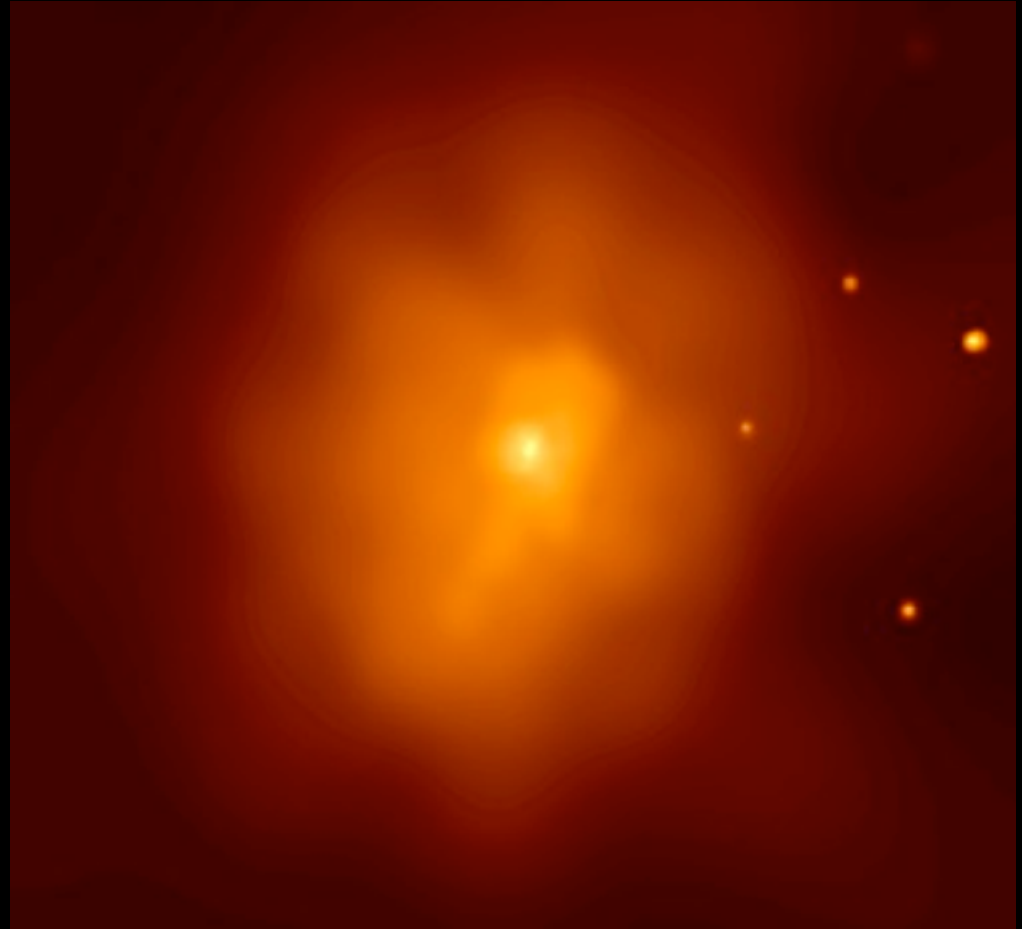
Una prima sorpresa: guardiamo un Ammasso con uno strumento
in grado di vedere i raggi X



Una prima sorpresa: guardiamo un Ammasso con uno strumento
in grado di vedere i raggi X

$$KT = \frac{GM}{R}$$

Immagine in raggi X: Emissione di gas diffuso nell' ammasso

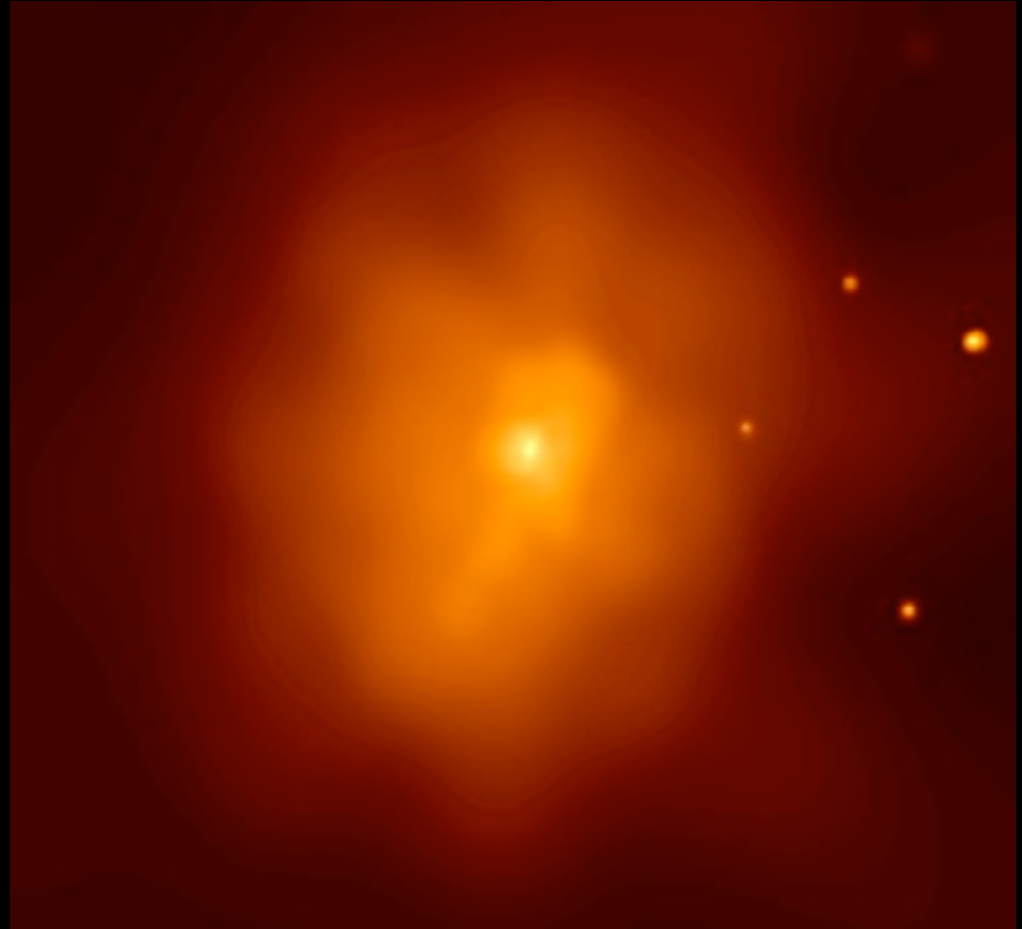
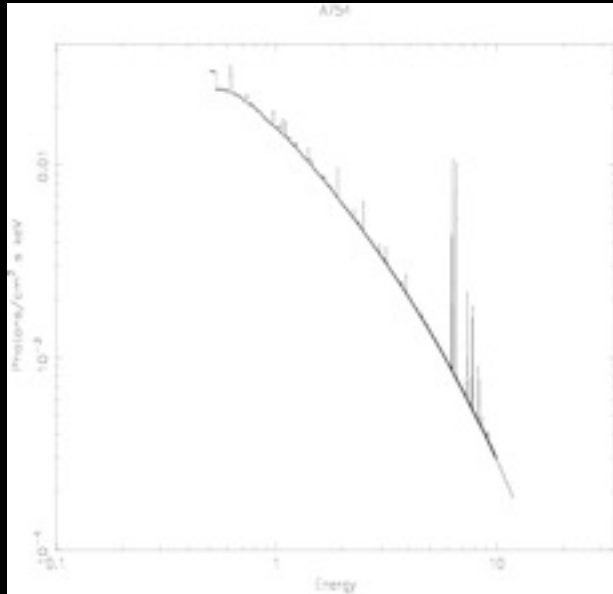


$$KT = \frac{GM}{R}$$

Gli ammassi di galassie contengono tenue gas diffuso (1 atomo per litro mediando sull'intero ammasso, con densità maggiori al centro) a temperature di 10^7 - 10^8 K che emette raggi X (vedi sopra). La massa è $\approx 30\%$ del totale (più delle stelle). Il gas è originato da venti galattici e/o *stripping*

$$s(\nu) \propto \frac{n_e n_i}{\sqrt{kT}} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

Immagine in raggi X: Emissione di gas diffuso nell' ammasso

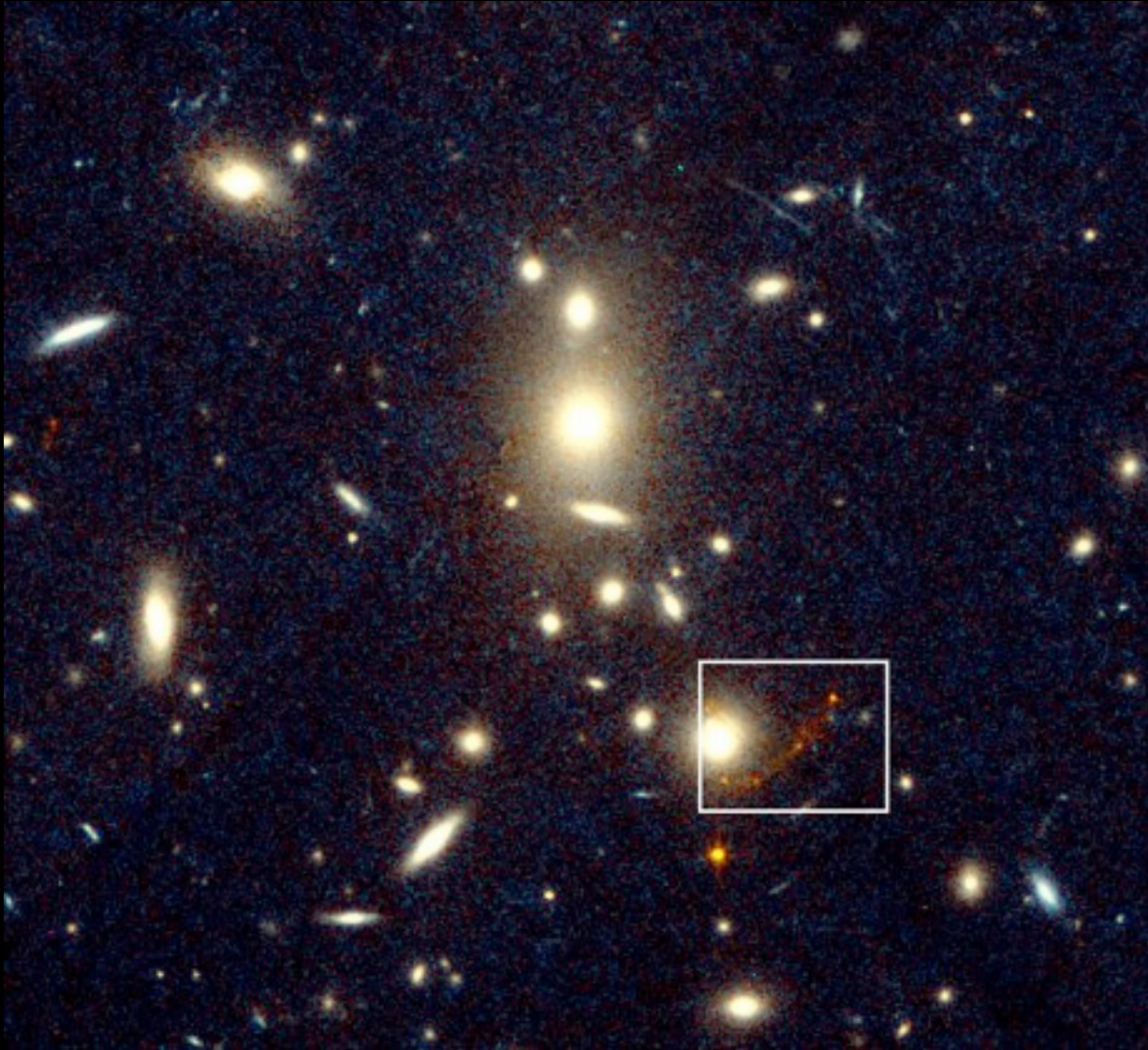


$$KT = \frac{GM}{R}$$

Gli ammassi di galassie contengono tenue gas diffuso (1 atomo per litro mediando sull'intero ammasso, con densità maggiori al centro) a temperature di 10⁷-10⁸ K che emette raggi X (vedi sopra). La massa è ≈ 30 % del totale (più delle stelle). Il gas è originato da venti galattici e/o *stripping*

$$s(\nu) \propto \frac{n_e n_i}{\sqrt{kT}} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

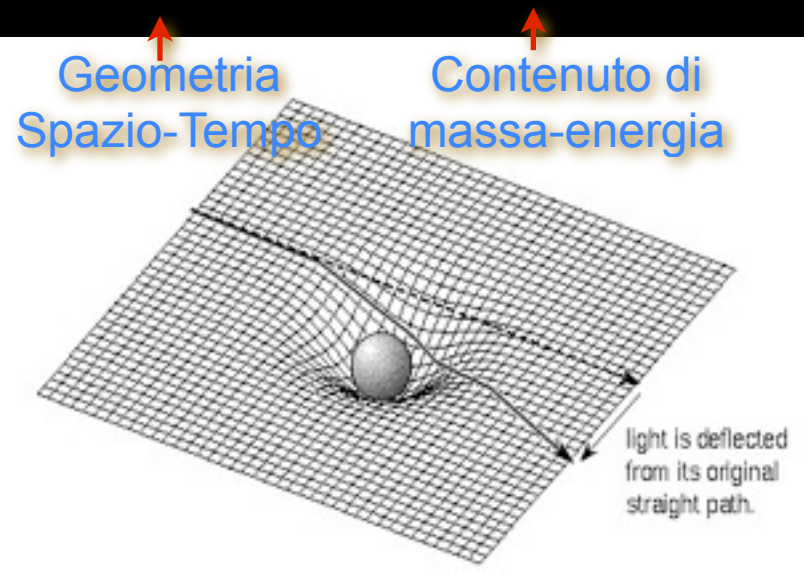
Le Lenti Gravitazionali





Gravitational Lens
Galaxy Cluster 0024+1654

HST · WFPC2



Gravitational Lens Galaxy Cluster 0024+1654

HST · WFPC2

PRC96-10 · ST ScI OPO · April 24, 1996

W.N. Colley (Princeton University), E. Turner (Princeton University),
J.A. Tyson (AT&T Bell Labs) and NASA

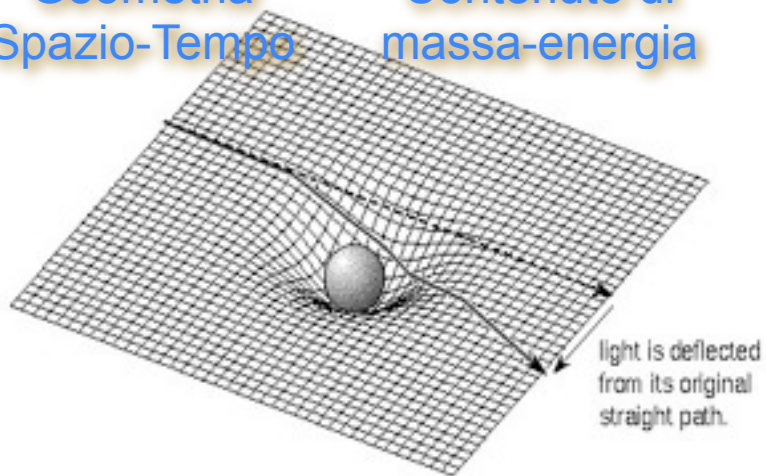


THE EINSTEIN FIELD EQUATION

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

Geometria
Spazio-Tempo

Contenuto di
massa-energia



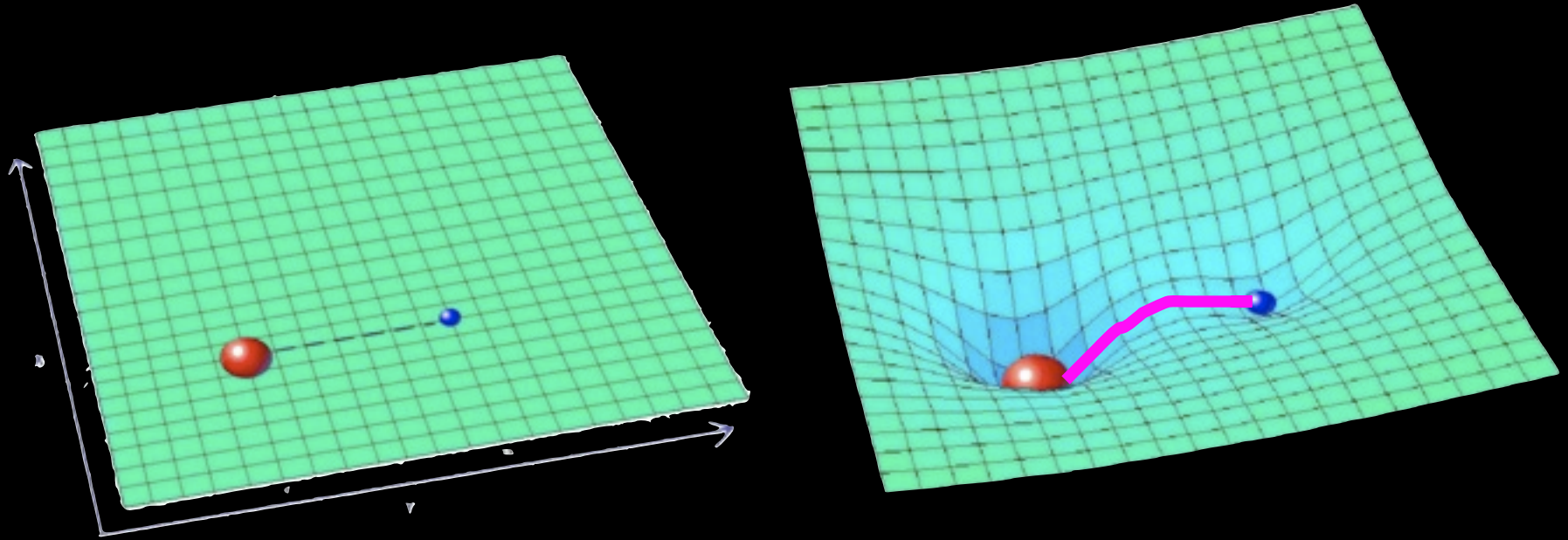
Gravitational Lens Galaxy Cluster 0024+1654

HST · WFPC2

PRC96-10 · ST ScI OPO · April 24, 1996

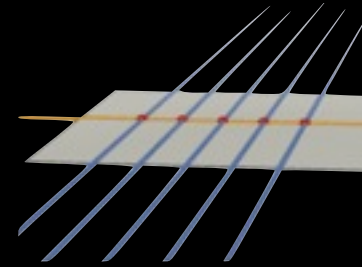
W.N. Colley (Princeton University), E. Turner (Princeton University),
J.A. Tyson (AT&T Bell Labs) and NASA

La distanza minima tra 2 punti non e' una retta:
e' detta geodetica



Geometria Euclidea

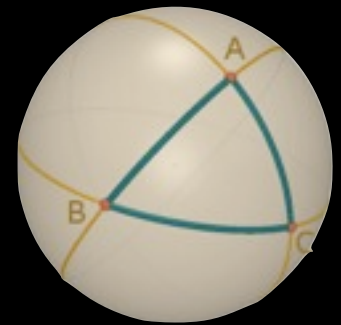
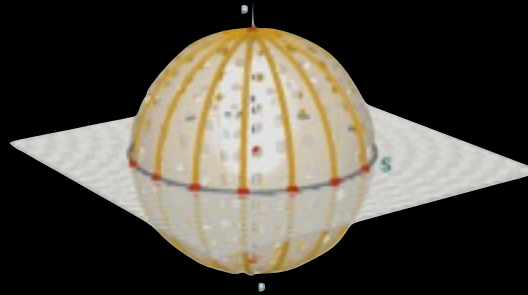
V postulato : data una retta r ed un punto P , esiste un'unica retta parallela a r passante per P



Geometria ellittica:

- Assenza di rette parallele
- rette aventi una perpendicolare in comune si incrociano
- somma angoli interni triangolo $> 180^\circ$

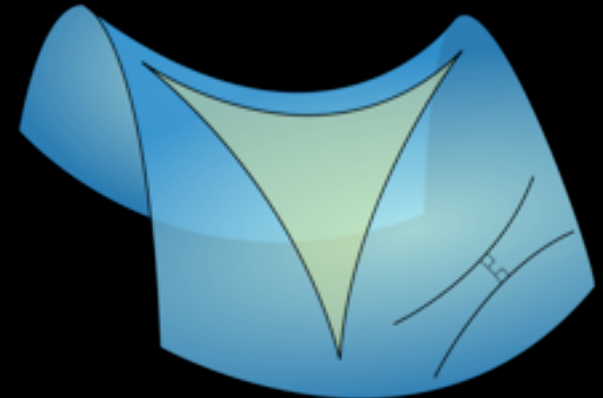
...



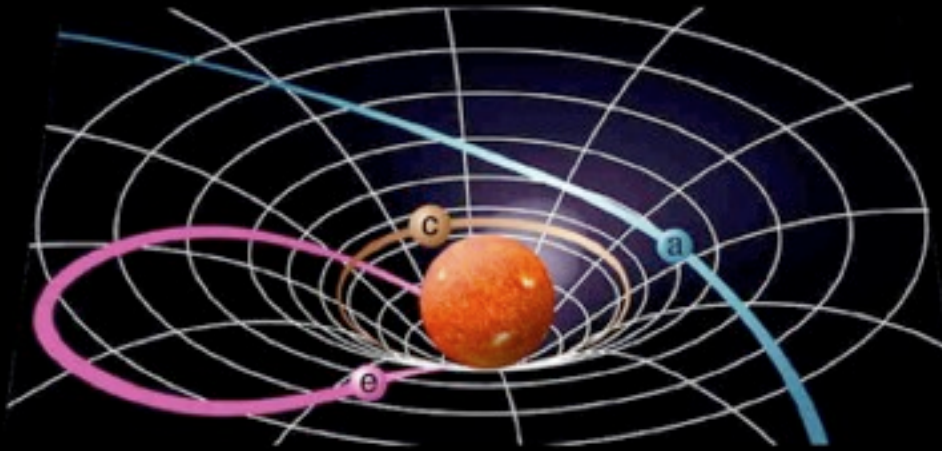
Geometria iperbolica:

- Data una retta r e un punto P disgiunto da r , esistono almeno due rette distinte passanti per P e parallele a r .
- rette aventi una perpendicolare in comune divergono
- somma angoli interni triangolo $< 180^\circ$

...



Relativita' Generale



Geometria
Spazio-Tempo

Contenuto di
massa-energia

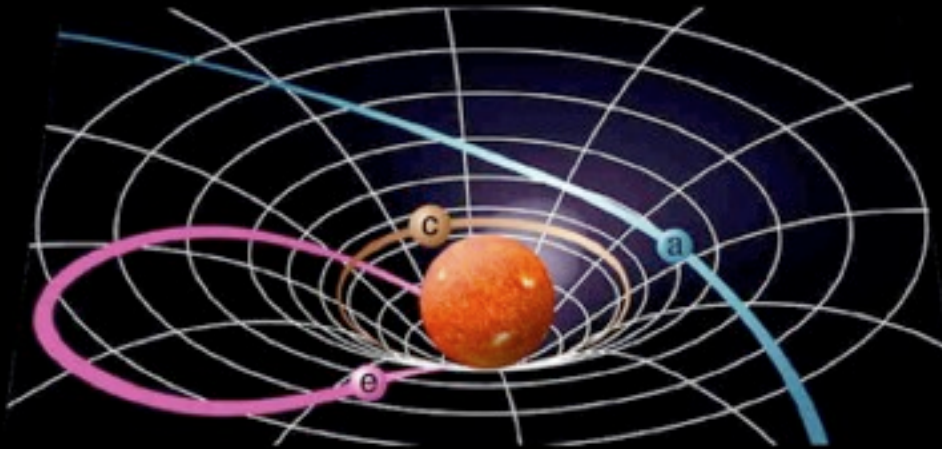
Descrizione geometrica della gravità:
le distorsioni dello spazio-tempo sono
la gravità stessa

La materia dice allo spazio-tempo
come curvarsi



Lo spaziotempo dice alla materia
come muoversi

Relativita' Generale



Descrizione geometrica della gravità:
le distorsioni dello spazio-tempo sono
la gravità stessa

La materia dice allo spazio-tempo
come curvarsi



Lo spaziotempo dice alla materia
come muoversi

THE EINSTEIN FIELD EQUATION

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

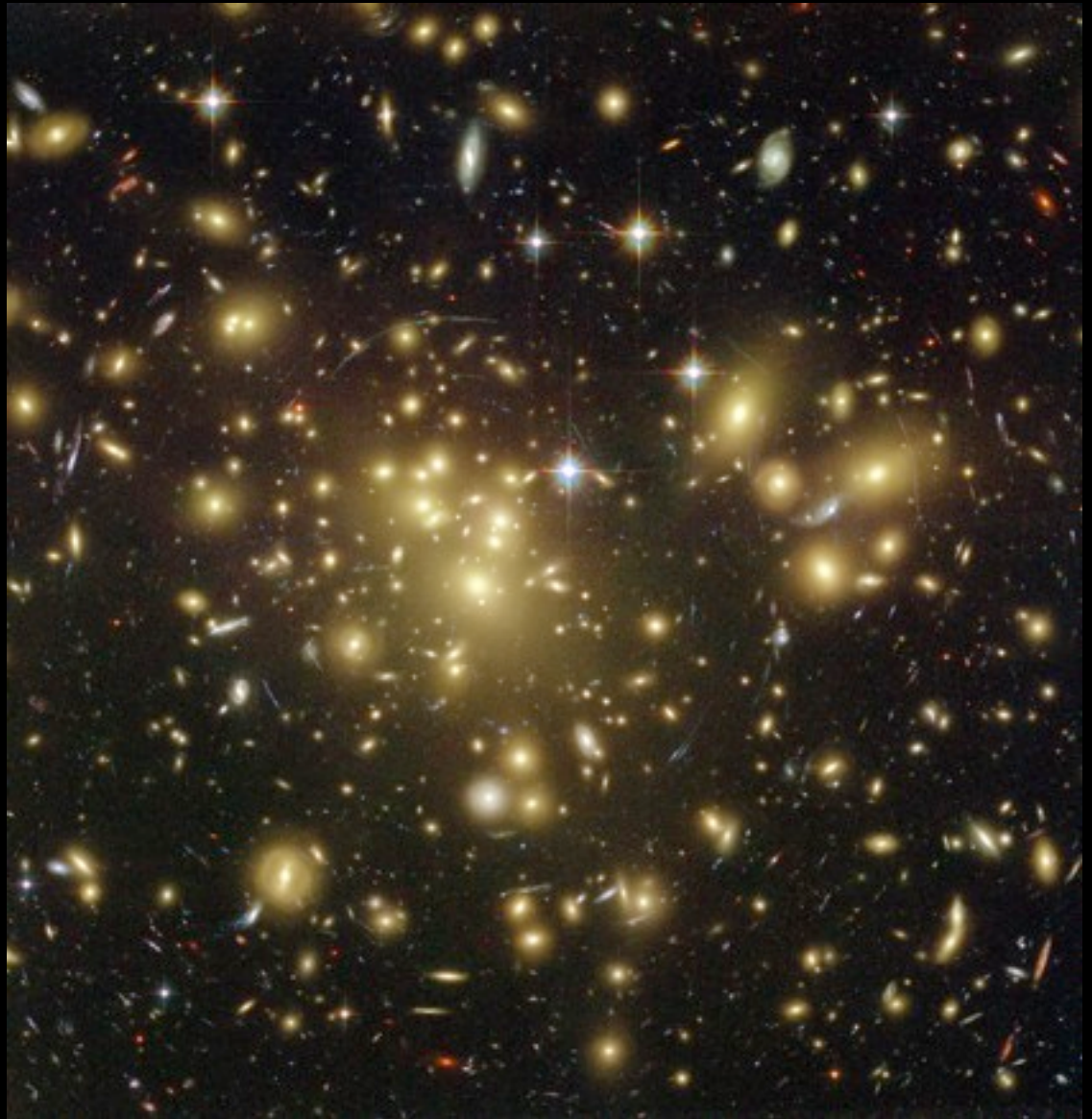
Geometria
Spazio-Tempo

Contenuto di
massa-energia



Galaxy Cluster Abell 1689 Details
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, R. Barnes (LMU, Tübingen), P. Bressan (The Hebrew University), R. Fied (LMU, M. Garching), G. Hasing (STScI), G. Hasing (STScI), G. Hasing (STScI), the ACS Science Team and ESA • STScI PR020-01a





Galaxy Cluster Abell 1689 Details
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, R. Barnes (LMU, Tübingen), The Hubble University, R. Ford (LMU, M. Garching), G. Hasinger (STScI), G. W. Hasinger (ESO/Caltech Observatories), the ACS Science Team and ESA • STScI-PRC10-37

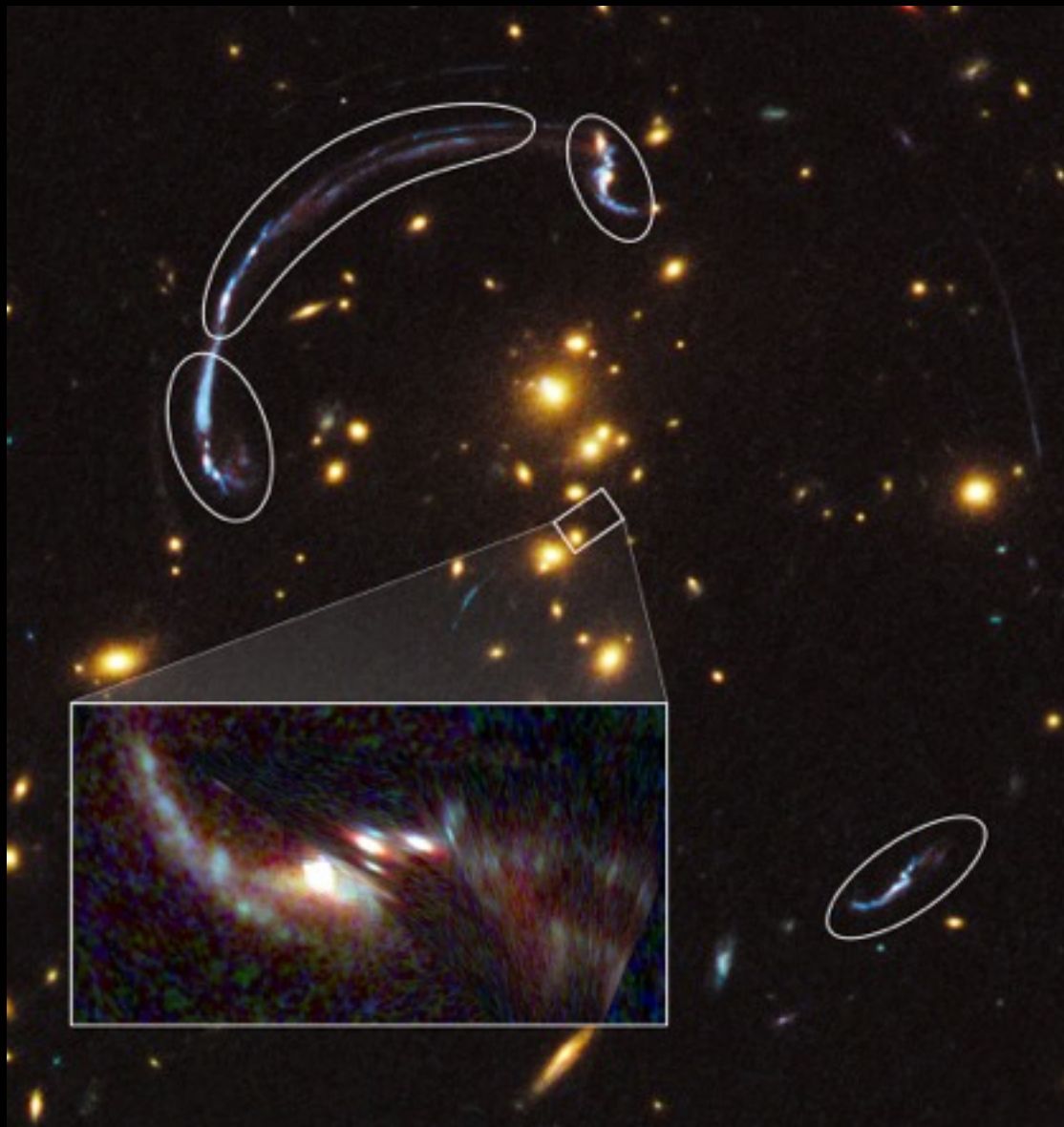
Dark Matter Map in Galaxy Cluster Abell 1689

HST ACSWFC

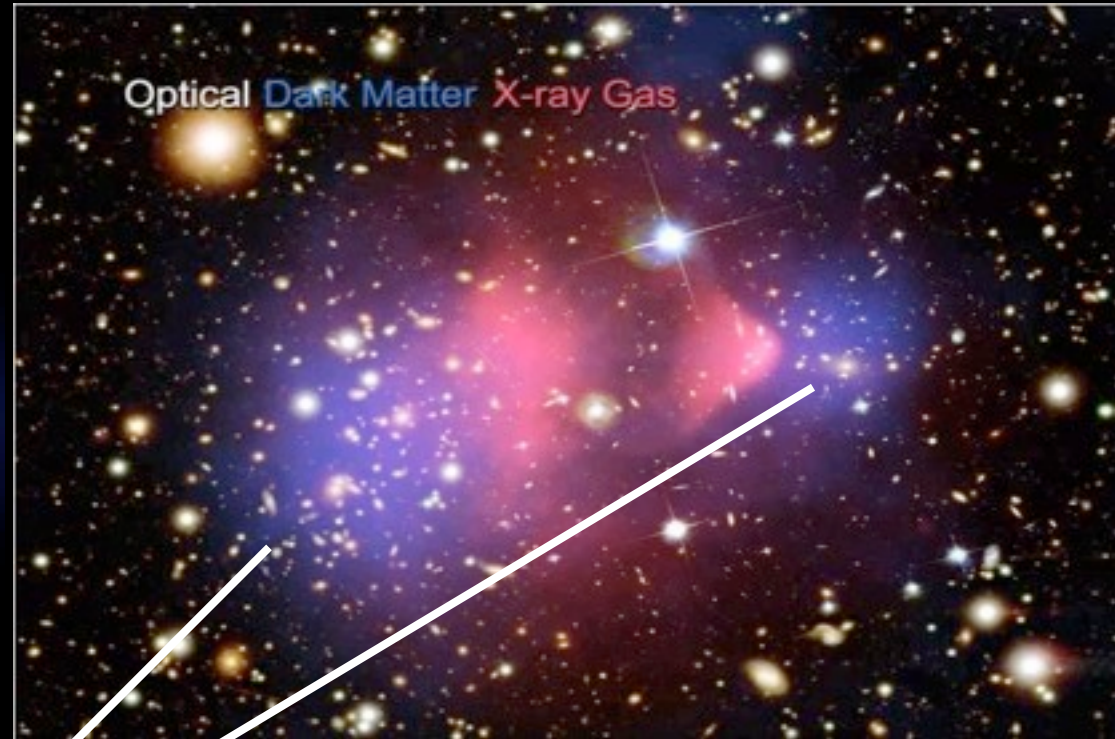


NASA, ESA, and D. Coe (JPL/Caltech and STScI)

STScI-PRC10-37



La Materia Oscura: una nuova forma di materia di cui vediamo solo l'effetto gravitazionale



Le particelle di Materia Oscura non interagiscono tra loro come le particelle cariche che compongono il Plasma : i due Ammassi “si attraversano” l’un l’altro

Sistema Solare

0.0004 a.l.

Stella piu' vicina al Sole

4

a.l.

Dim. Ammassi Globulari

50

a.l.

Dimens. Galassia

100 000

a.l.

Dist. Gal. di Andromeda

2 000 000

a.l.

Dim. Ammassi di Galassie

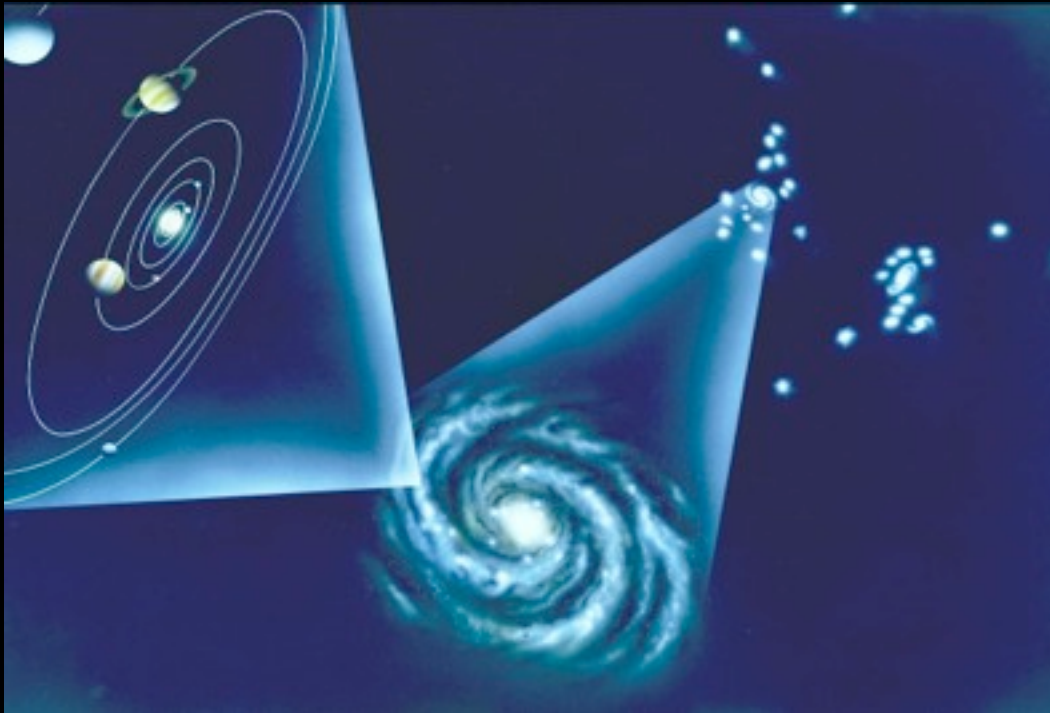
10 000 000

a.l.

10

200

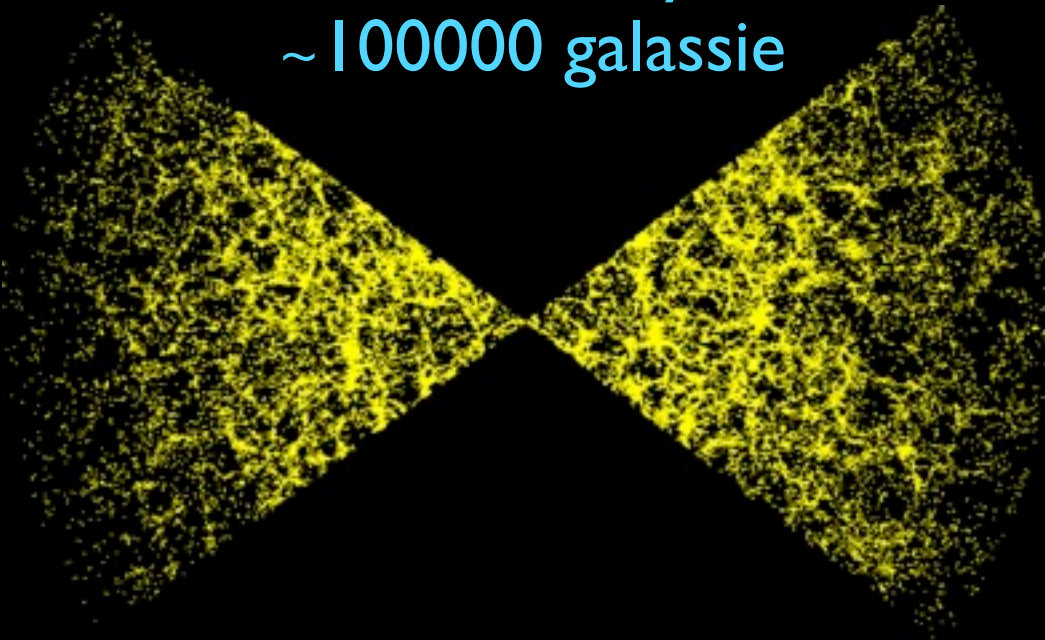
Massa Oscura
Massa Luminosa



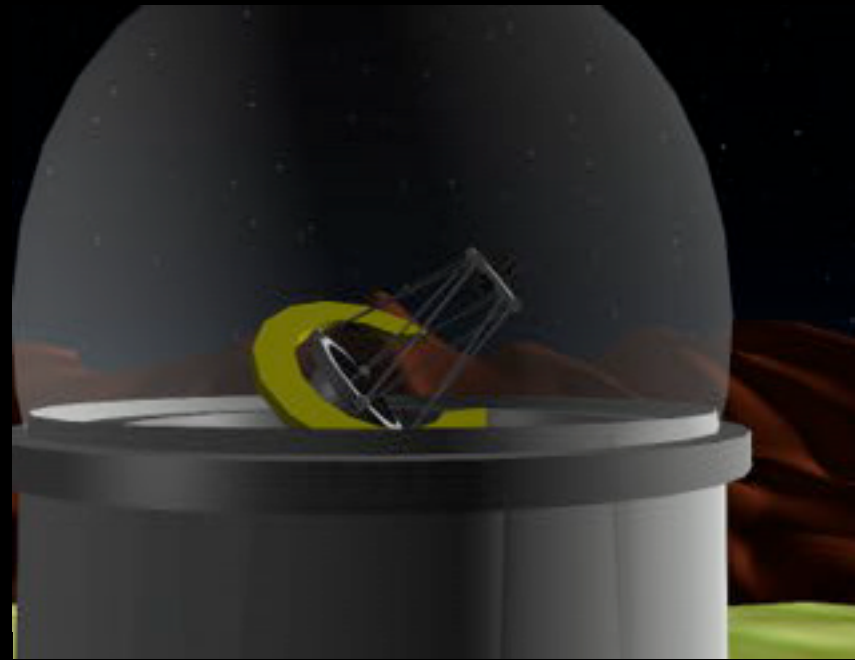
Survey di Galassie

Misurare la posizione di un campione contenente un gran numero di galassie

2dF survey
~100000 galassie



6 billion light years



2dF survey
~ 100000 galassie

6 billion light years

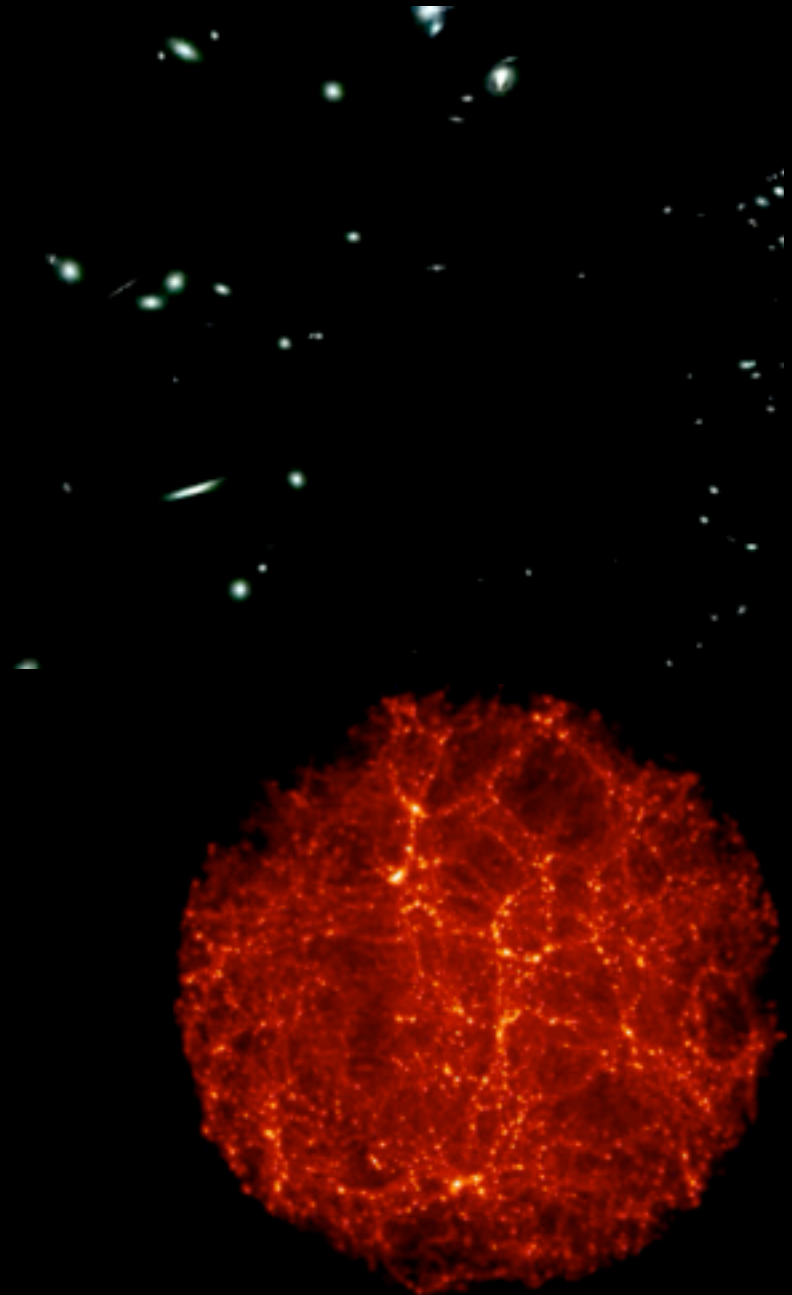
Strutture su Grande Scala

si estendono su regioni di 100 Mpc
(300 milioni di a.l.)

alle intersezioni dei filamenti ci sono
gruppi ed ammassi di galassie

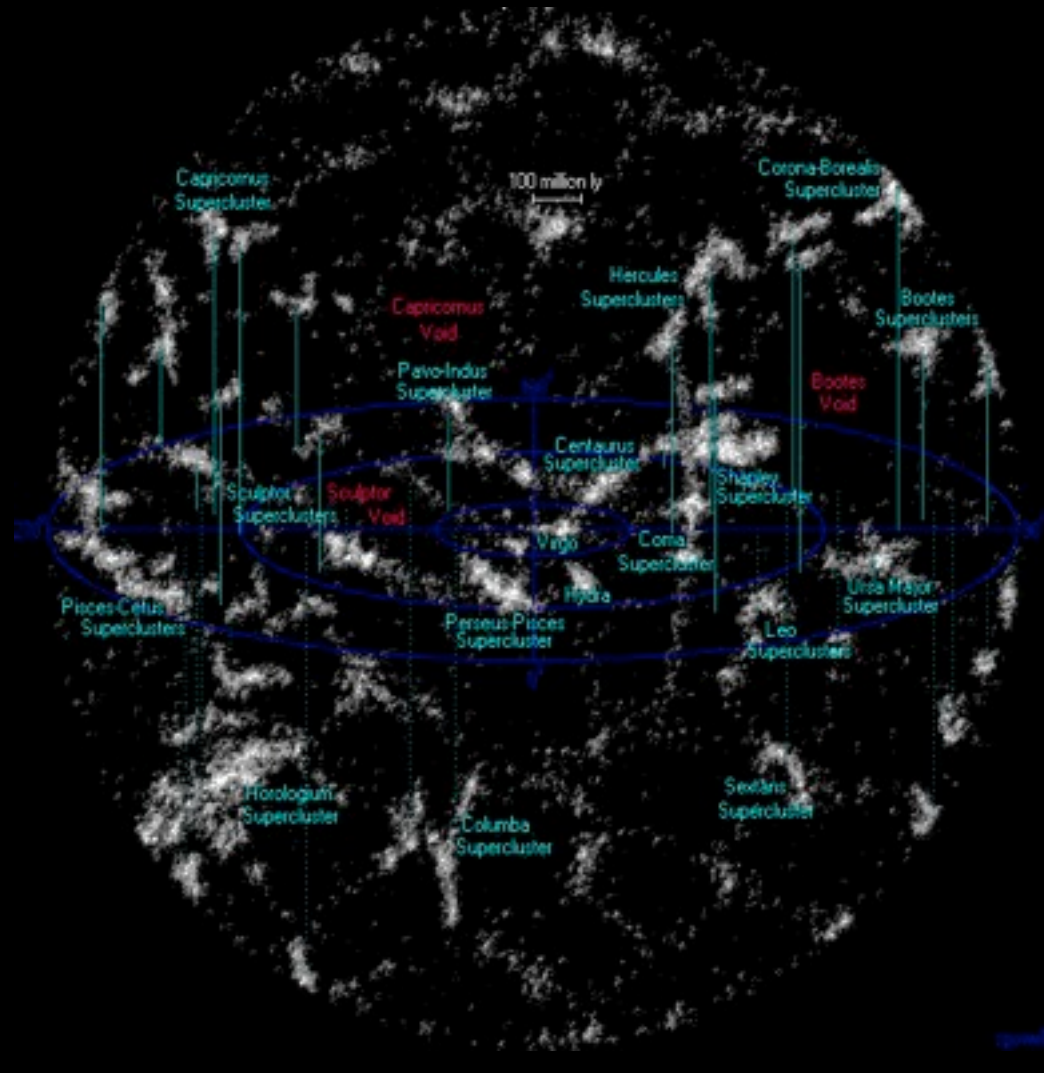
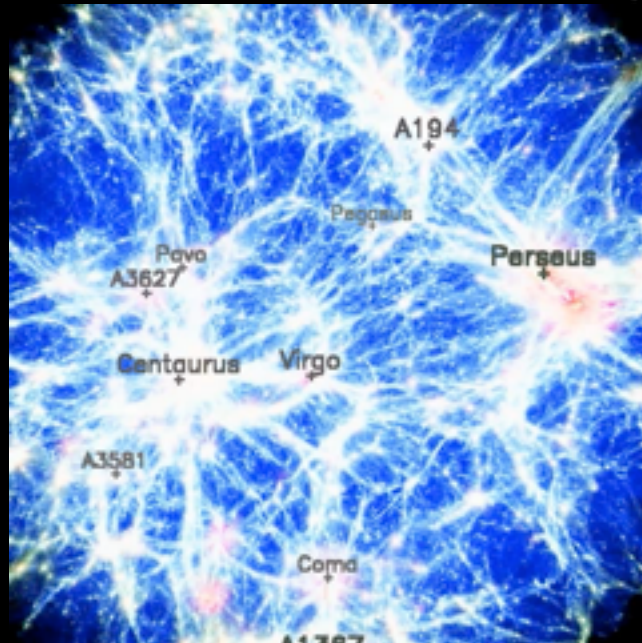
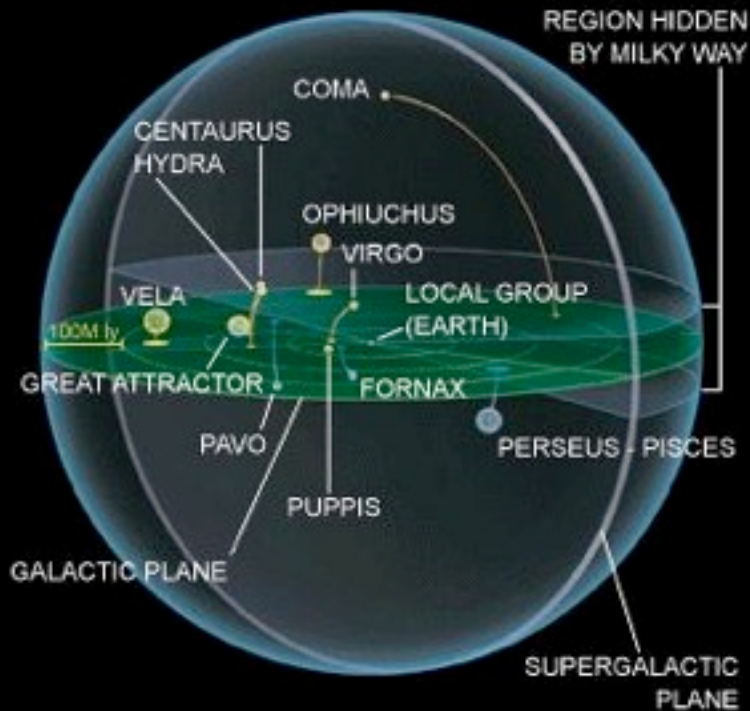
2dF survey
~ 100000 galassie

6 billion light years



L'intorno locale

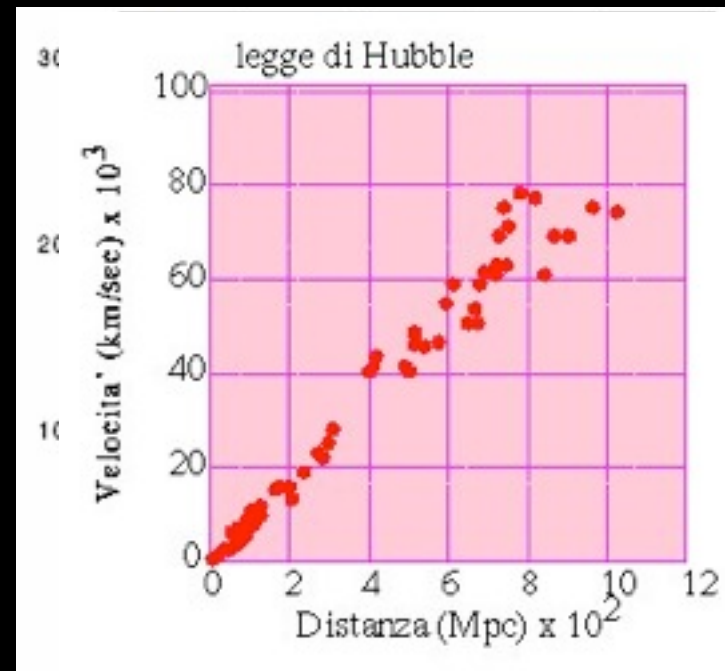
La struttura su grande scala nell'intorno della Via Lattea



La Materia Oscura in un Contesto Cosmologico

1923: E. Hubble scopre che le altre galassie sono insieme di gas e stelle esterni rispetto alla nostra

1924: E. Hubble scopre che le galassie si allontanano IN MEDIA le une dalle altre con una velocità proporzionale alla loro distanza

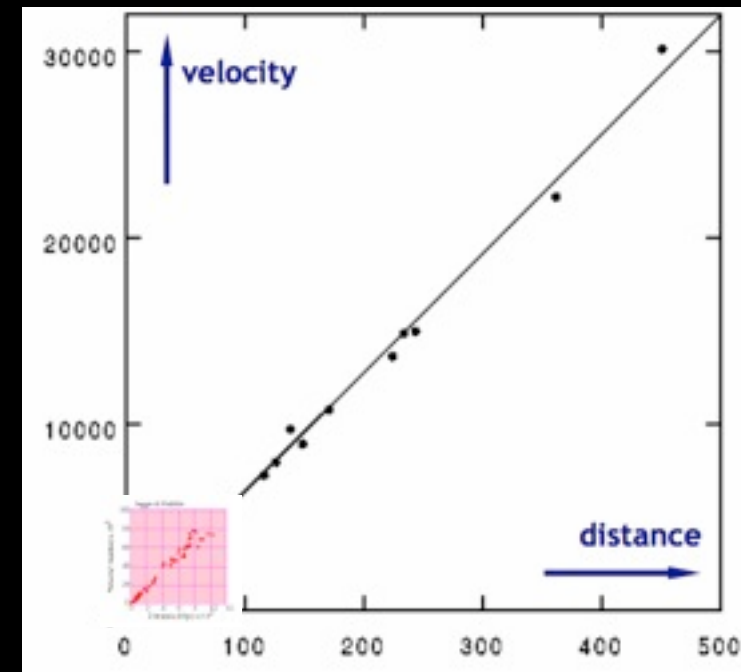
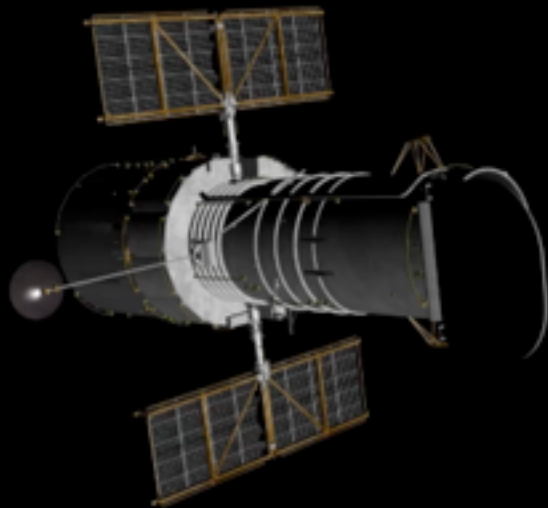


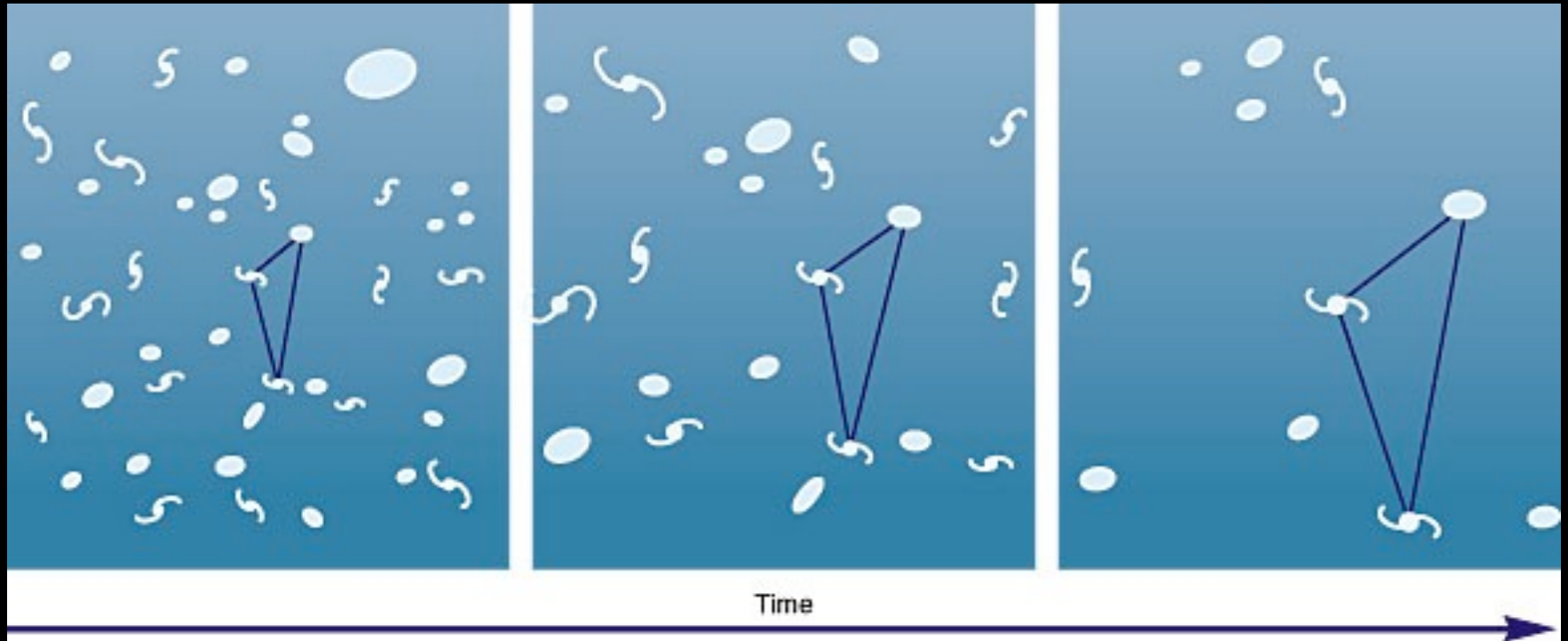
La Materia Oscura in un Contesto Cosmologico

1923: E. Hubble scopre che le altre galassie sono insiemi di gas e stelle esterni rispetto alla nostra

1924: E. Hubble scopre che le galassie si allontanano IN MEDIA le une dalle altre con una velocità proporzionale alla loro distanza

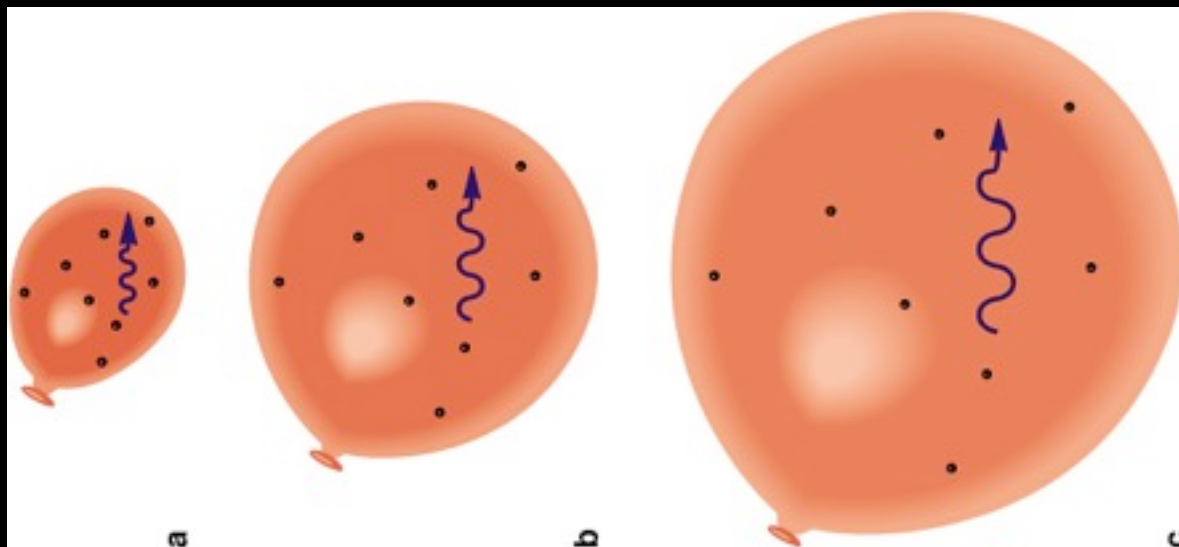
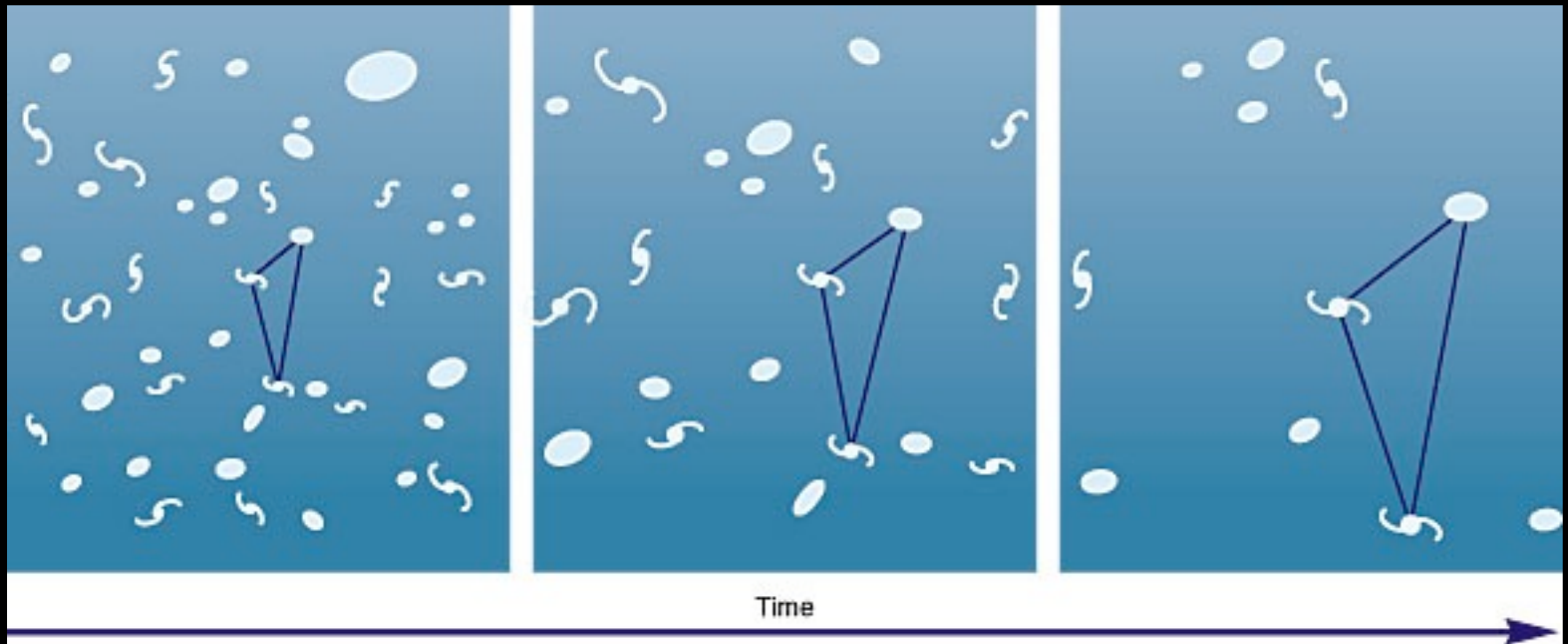
Oggi si osservano galassie distanti fino a 12 Mld di anni luce





Galassie lontane hanno **REDSHIFT** maggiore perche' l'espansione dell'Universo "stira" la lunghezza d'onda della luce emessa

REDSHIFT: aumento della lunghezza d'onda della luce dovuto alla espansione dell'Universo



Galassie lontane hanno **REDSHIFT** maggiore perché l'espansione dell'Universo "stira" la lunghezza d'onda della luce emessa

REDSHIFT: aumento della lunghezza d'onda della luce dovuto alla espansione dell'Universo

Equazioni Einstein

THE EINSTEIN FIELD EQUATION

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

Geometria

Massa-Energia

$$1 + \frac{kc^2}{H^2 R^2} = \frac{8\pi G \rho}{3 H^2}$$

$$1 - \Omega_k = \Omega_m$$

Geometria: omogeneita' + isotropia

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R(t) \left(\frac{dr^2}{1 - k r^2} + d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2 \right)$$



$$k = 0$$

$$k = 1$$

$$k = -1$$

$$H = \frac{\dot{R}}{R} \quad \text{Tasso Espansione}$$

$$\Omega_k = -\frac{k c^2}{H^2 R^2}$$

$$\rho_c = \frac{3 H^2}{8 \pi G}$$

$$\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_c}$$

La geometria e la espansione dell'Universo sono determinate dal contenute di materia/energia

$$1 - \Omega_k = \Omega_{\text{materia}}$$

Geometria Contenuto di materia

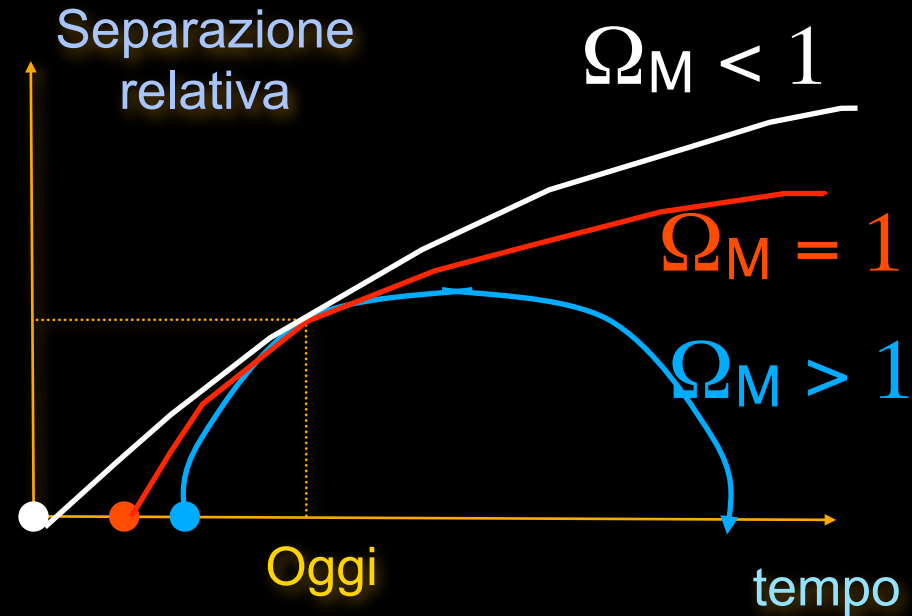
$$\Omega_M = \frac{\text{Densita' Materia}}{\text{Densita' critica}}$$

contributo da:
materia ordinaria Ω_b
materia oscura Ω_{DM}

$$\rho_c = \frac{3 H^2}{8\pi G} \approx 10^{-29} \text{ g/sm}^3$$

Misura quantita' di materia nell'universo
Determina

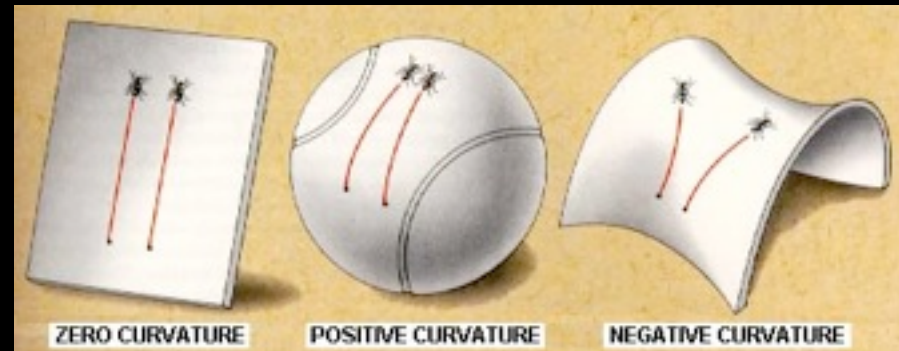
Tasso di espansione Geometria dell'universo



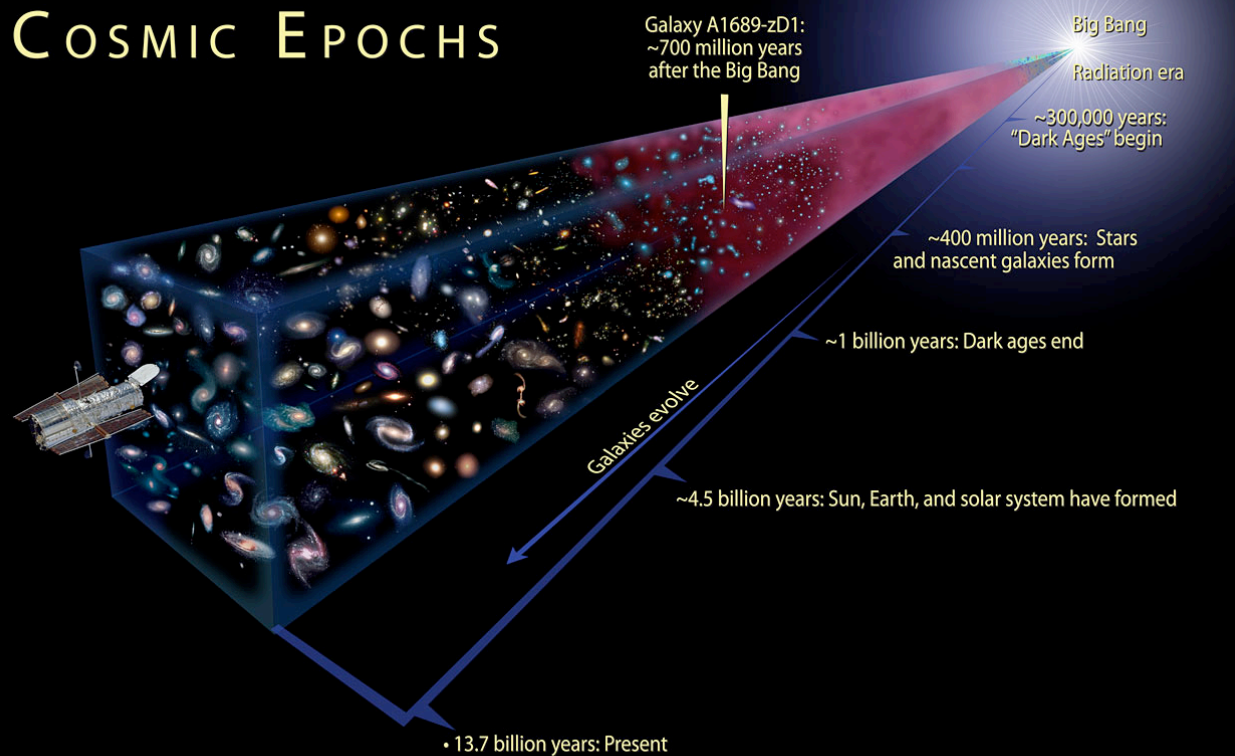
$\Omega_k = 0$

$\Omega_k > 0$

$\Omega_k < 0$



COSMIC EPOCHS



L'Universo si e' evoluto da una condizione iniziale di altissima densita' e temperatura.

300000 anni dopop il Big Bang la temperatura dell'Universo e' calata a livelli abbastanza bassi (1000 K) da permettere la formazione di atomi

PLASMA (elettroni, protoni, neutroni, fotoni) $\rightarrow$ ATOMI + fotoni (radiazione)

La radiazione che si e' liberata in quesa fase contiene preziose informazioni sullo stato fisico dell'Universo in quella lontana era

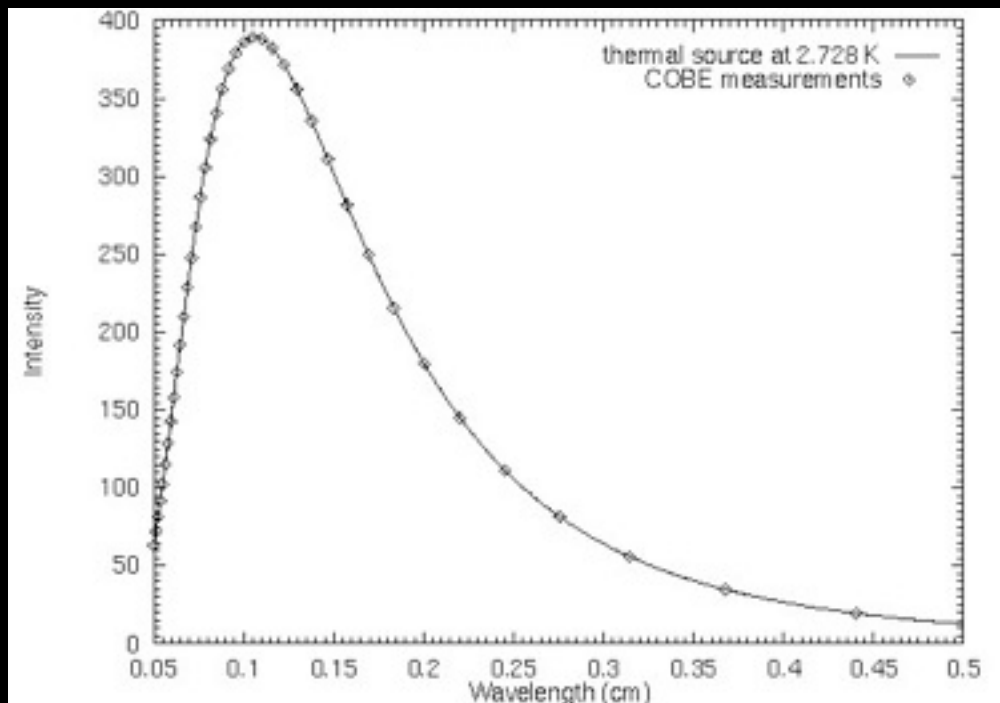
Nel 1948 Alpher Bethe e Gamow prevedono che il residuo di quella radiazione sia caratterizzato da una particolare distribuzione in frequenza (spettro), caratterizzata da una temperatura di 2.7 K

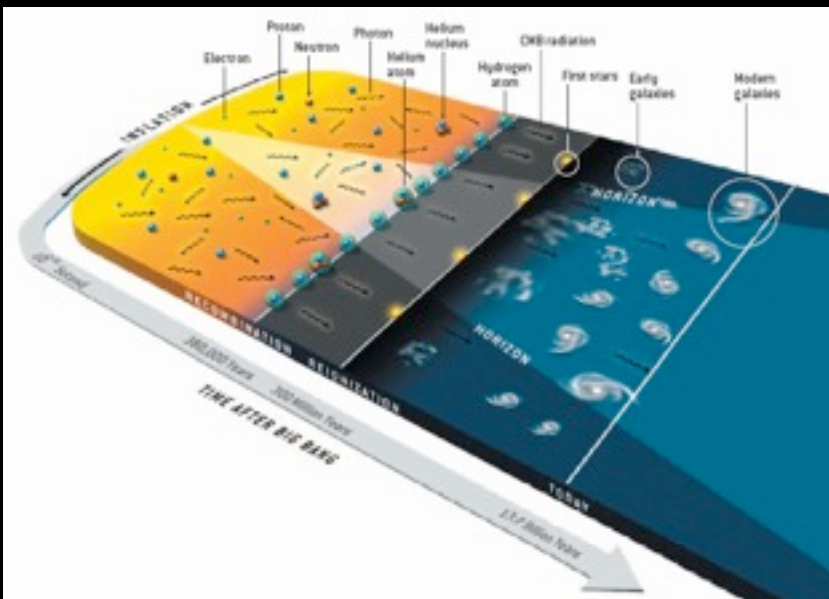
Nobel 1964
Penzias & Wilson

Penzias e Wilson scoprirono nel 1964 la radiazione cosmica di fondo mentre stavano lavorando con un nuovo tipo di antenna per microonde

Nei primi anni 90 il satellite COBE misura lo spettro del fondo cosmico con grande precisione.

Solida e precisa conferma del Big Bang:
L'Universo primordiale era estremamente diverso da quello attuale, in condizioni di altissima temperatura e densità' (PLASMA elettroni, protoni, neutroni, fotoni)



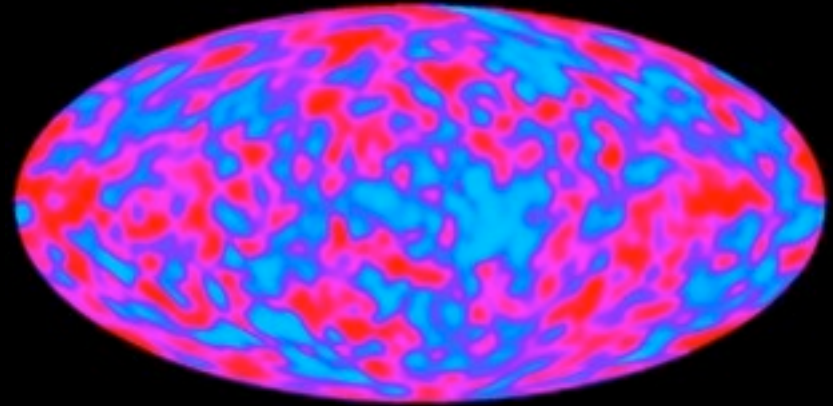
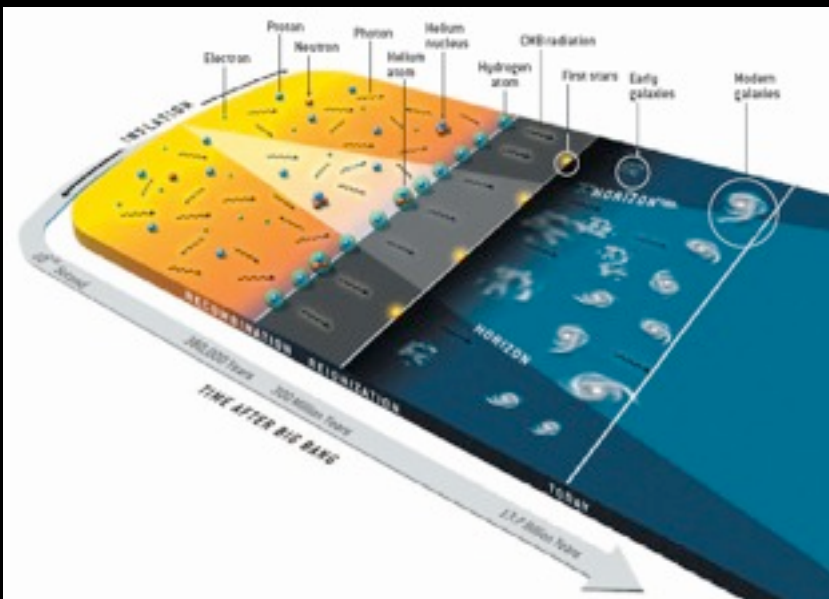


Nel 1992 vengono scoperte dal satellite COBE fluttuazioni del fondo cosmico

Nobel 1992
Smooth & Mather

Corrispondono a piccolissime disomogeneità ($1/100000$) della materia da cui hanno avuto origine le galassie e le strutture cosmiche.

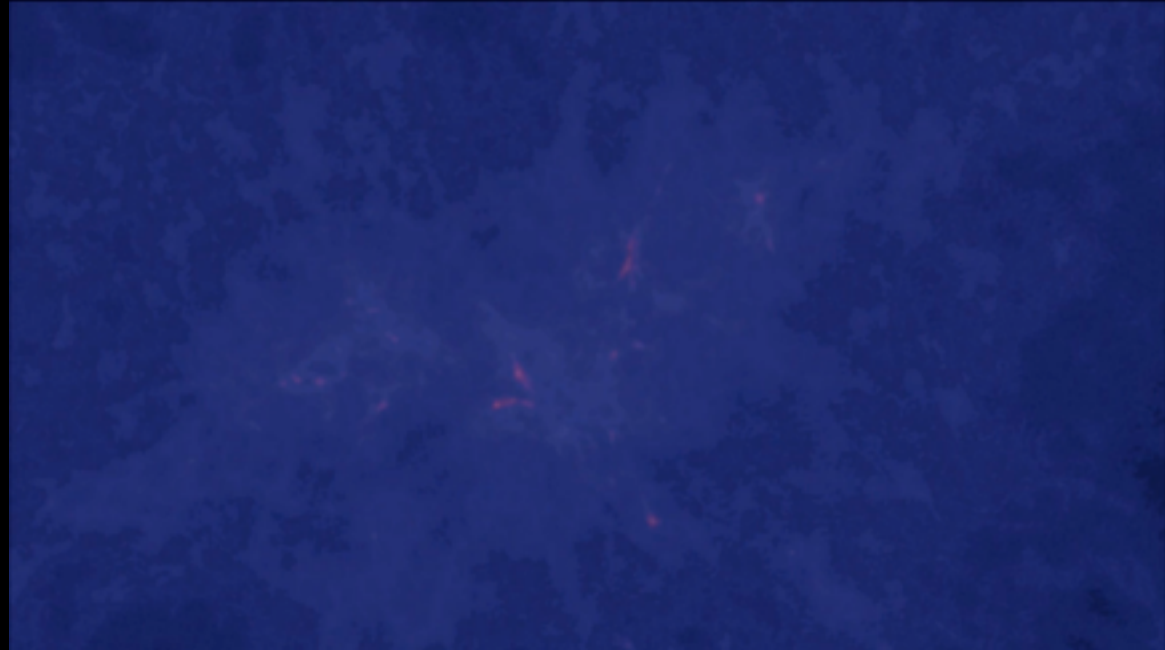
Royal Society Summer 2009 Exhibition, 'Cosmic Origins':



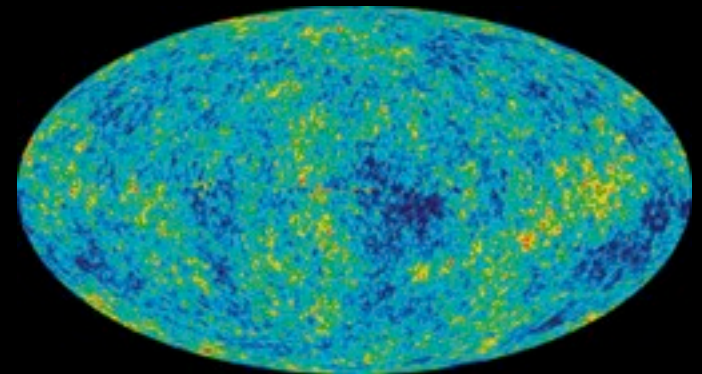
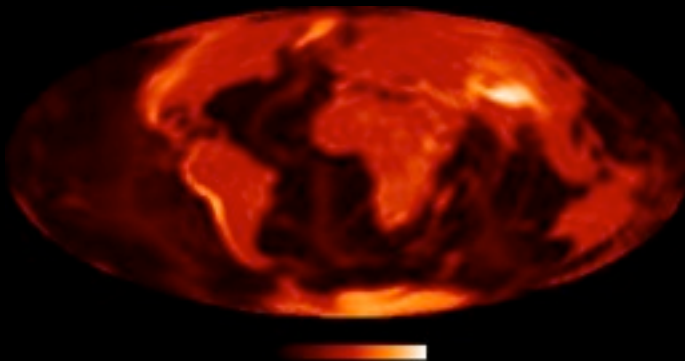
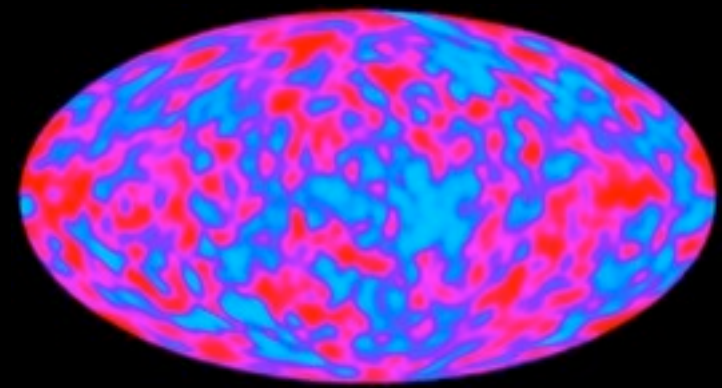
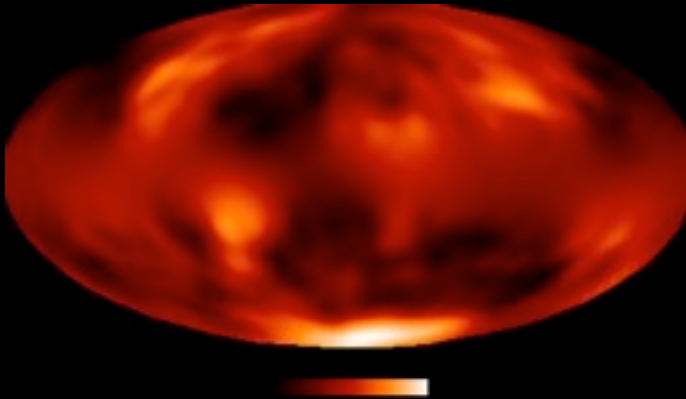
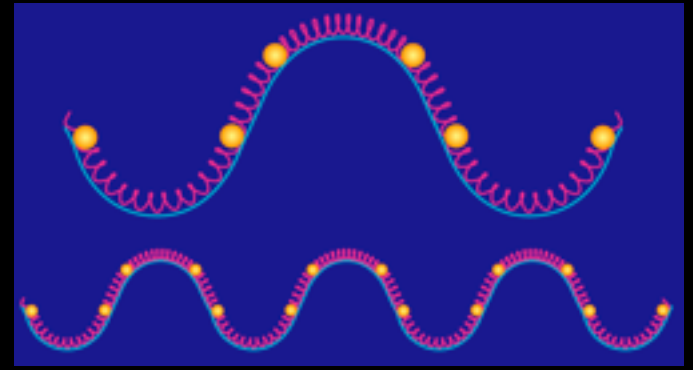
Nel 1992 vengono scoperte dal satellite COBE fluttuazioni del fondo cosmico

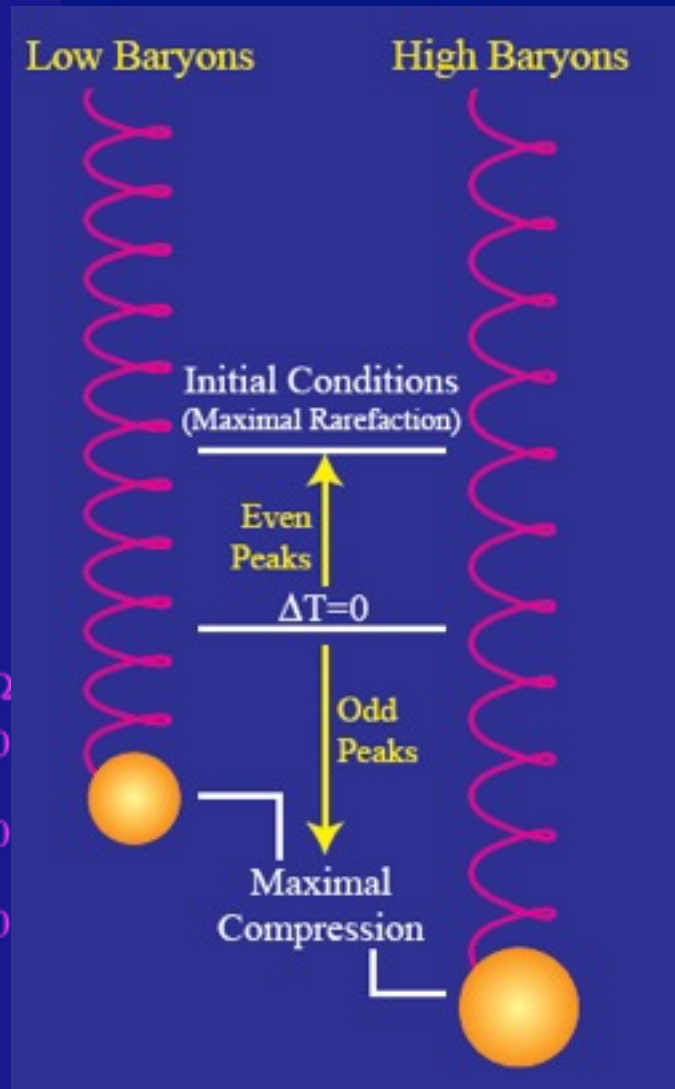
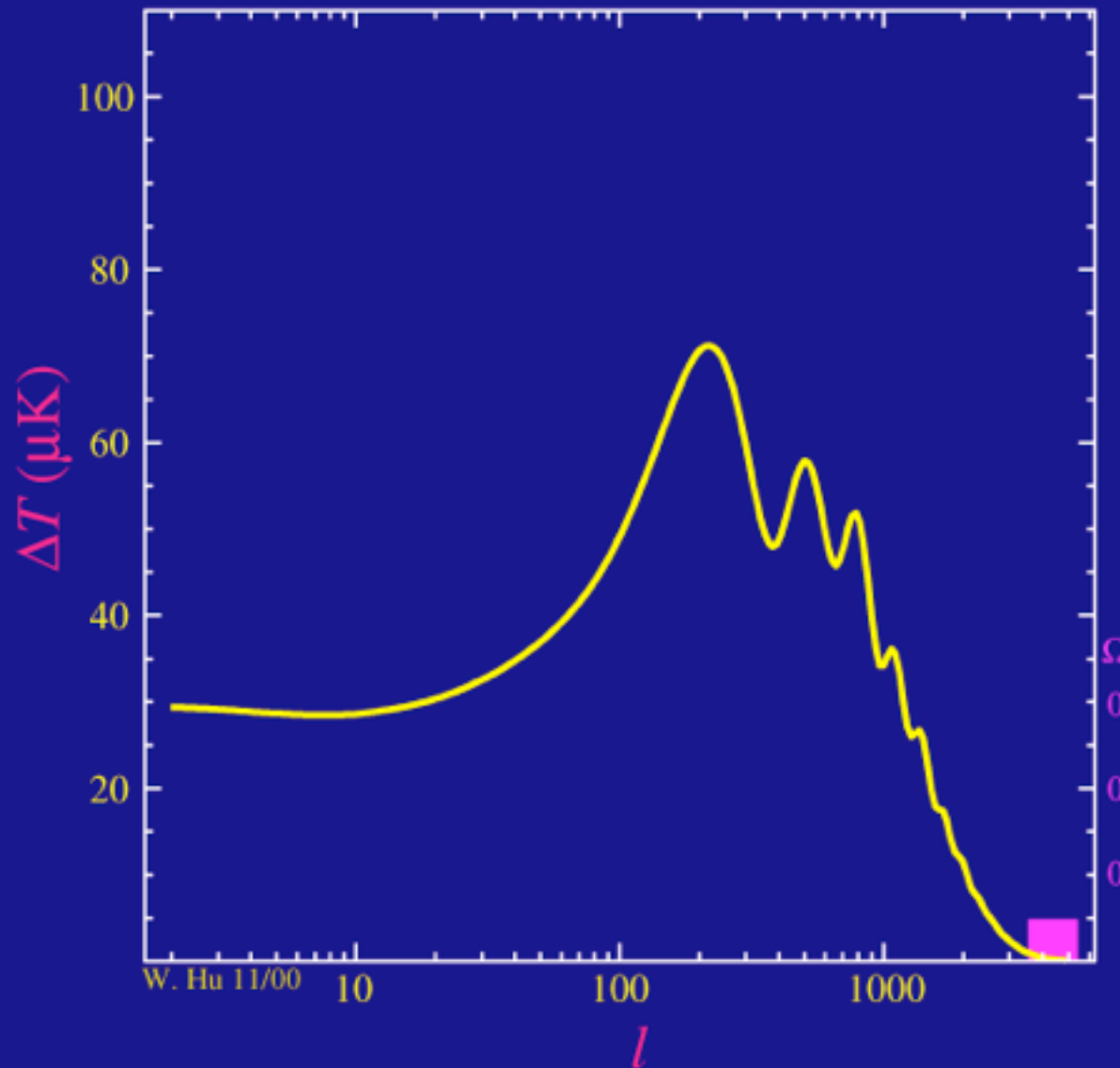
Nobel 1992
Smooth & Mather

Corrispondono a piccolissime disomogeneità ($1/100000$) della materia da cui hanno avuto origine le galassie e le strutture cosmiche.



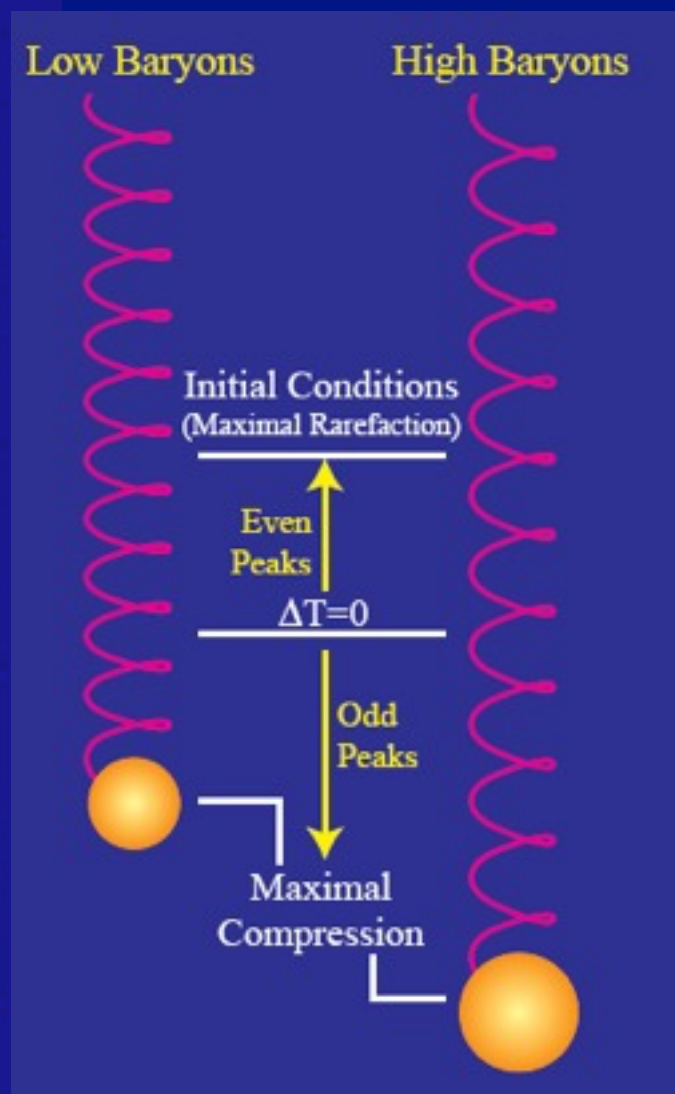
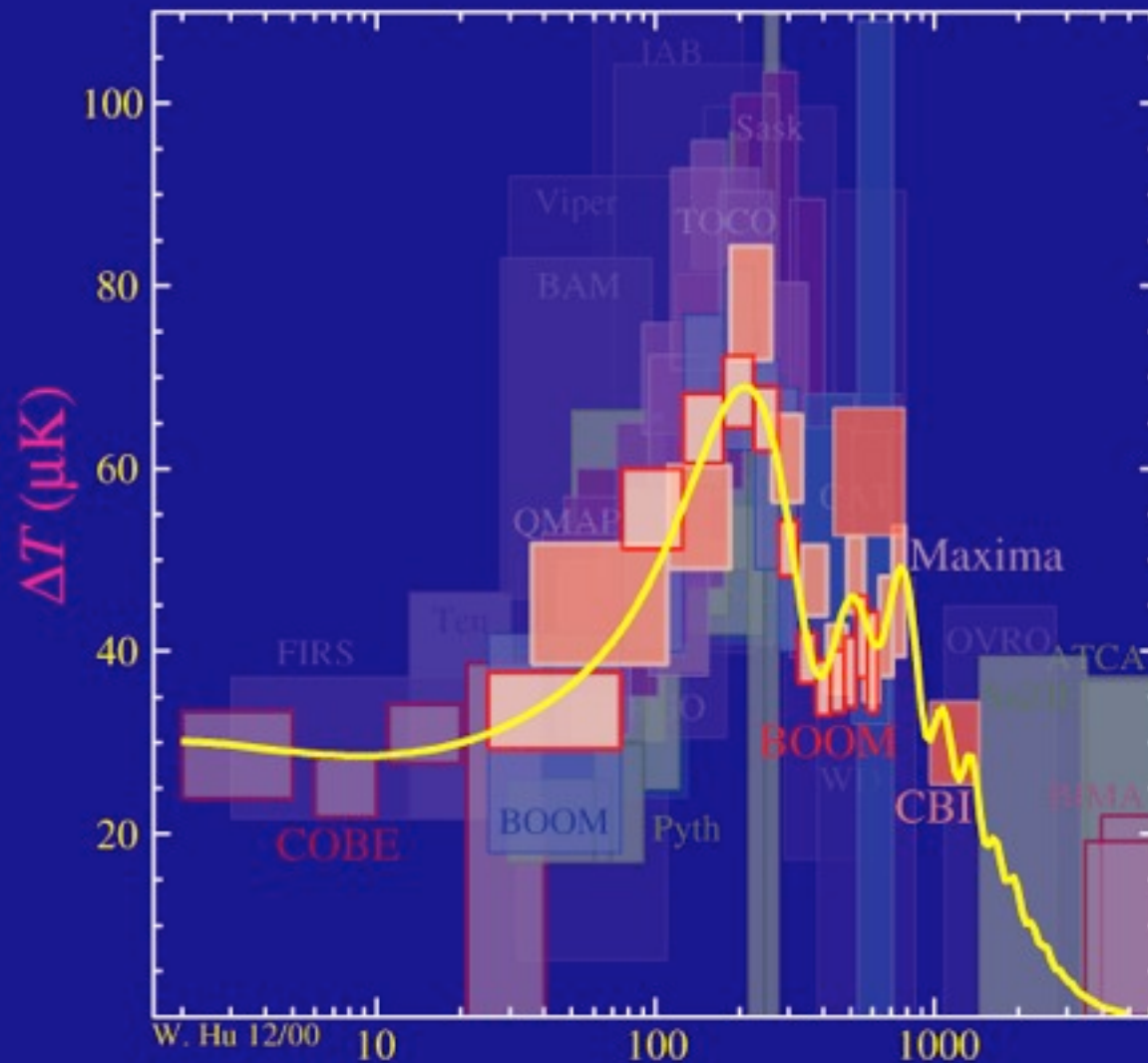
Fluttuazioni su diverse scale angolari





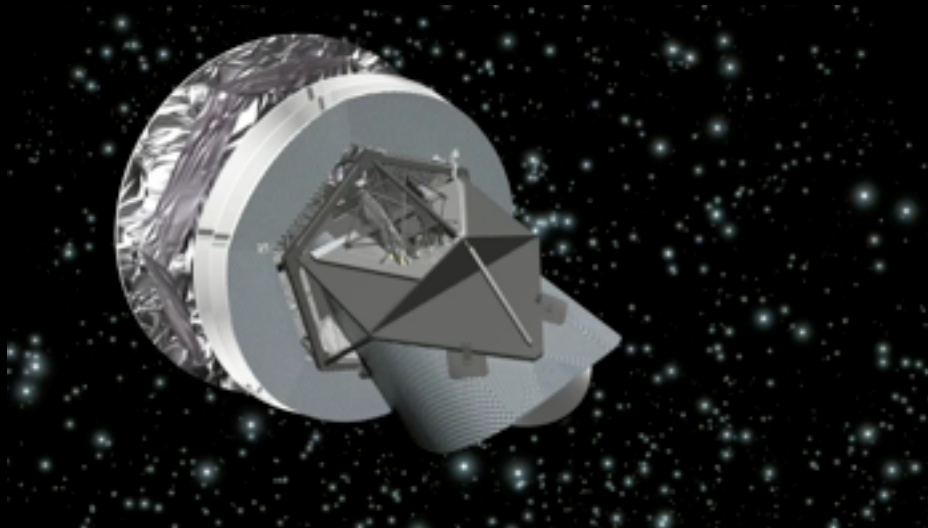
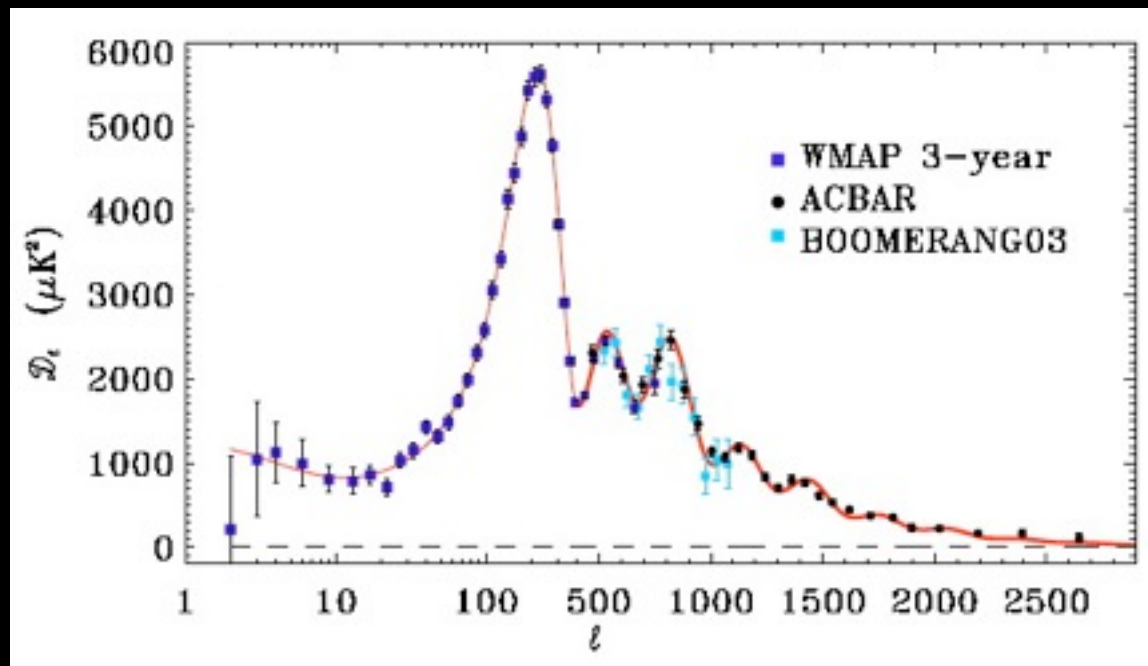
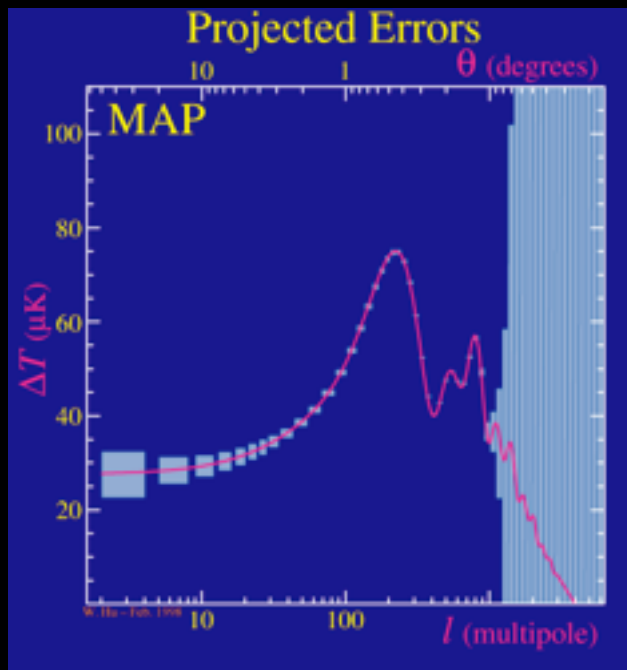
Dimensione angolare delle
disomogeneità

$$\theta \approx 180^\circ / \ell$$



Dimensione angolare delle
disomogeneità

$$\theta \approx 180^\circ / \ell$$

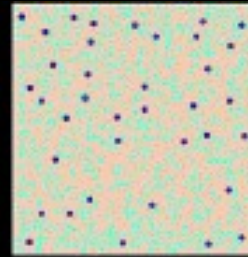
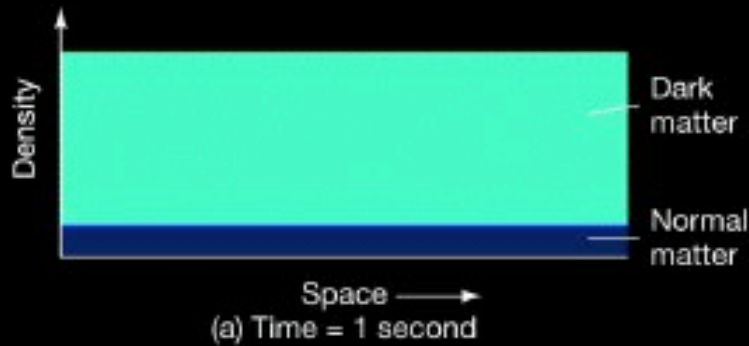


Il contributo della materia ordinaria (protoni, elettroni, tutte le particelle che interagiscono con la luce) e' estremamente piccolo:

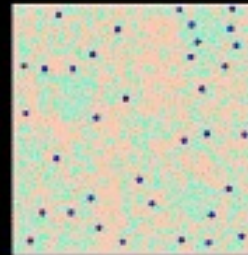
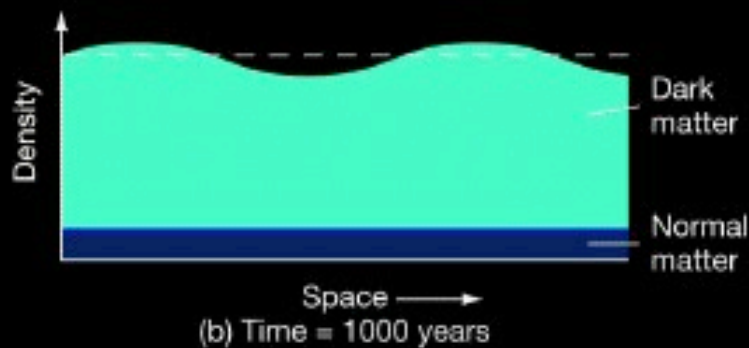
$$\Omega_b = 0.04$$

La formazione delle Strutture Cosmiche e l'abbondanza e natura della Materia Oscura

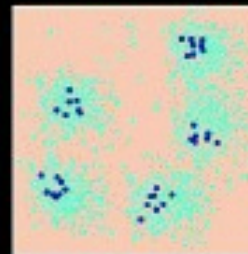
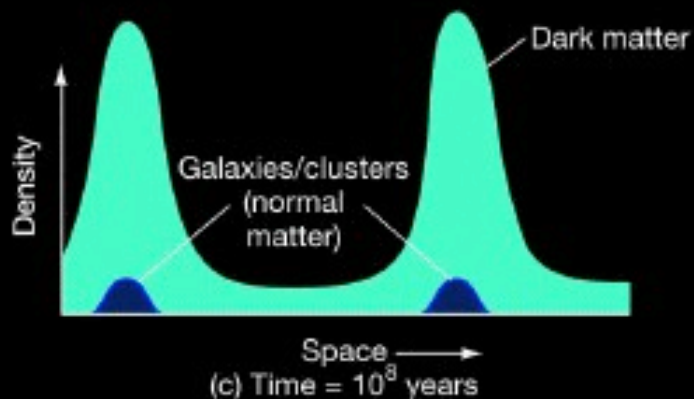
Instabilità gravitazionale: regioni sovradense aumentano progressivamente la loro densità attrahendo la materia circostante



Date le disomogeneità osservate dal fondo cosmico (1/100000)



I soli barioni non avrebbero il tempo di raggiungere i contrasti di densità osservati (formare galassie, gruppi, ammassi)



E' necessario includere la Materia Oscura:
essa comincia a condensarsi **PRIMA** della materia ordinaria (non interagisce con la radiazione) e ha il tempo di formare le **strutture osservate**

Simulazioni Numeriche:

Si assumono piccole fluttuazioni iniziali di densità

Si assume che le fluttuazioni osservate attraverso il fondo cosmico (corrispondenti a materia ordinaria) siano solo la “punta dell’iceberg” rispetto a sostanziali fluttuazioni di materia oscura:

Proporzioni:

$$\Omega_b=0.04$$

$$\Omega_{DM}=0.25$$

Aquarius Project
Virgo Consortium 2009
F. Springel et al.

$z = 48.4$

$T = 0.05 \text{ Gyr}$

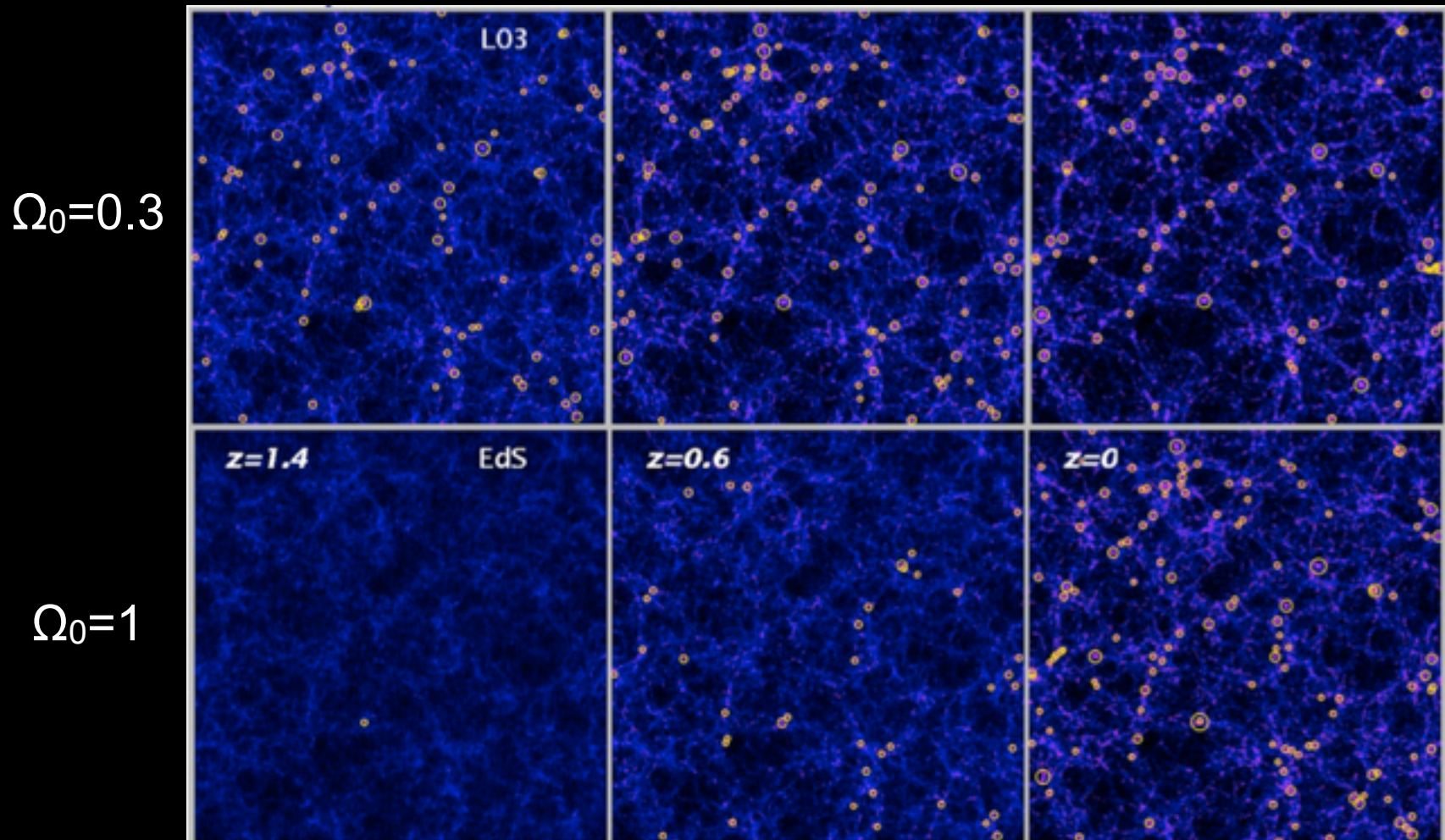
500 kpc

La formazione di strutture nell'Universo dipende fortemente da

- abbondanza
- natura

della Materia Oscura

Es. Abbondanza di Ammassi di galassie in funzione del tempo

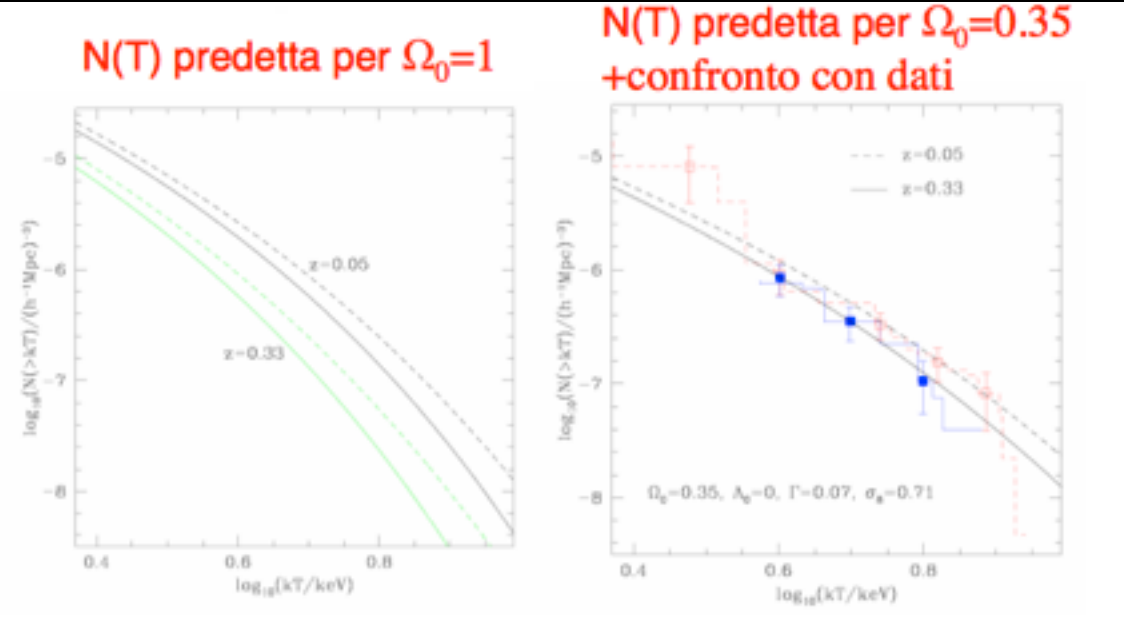


La formazione di strutture nell'Universo

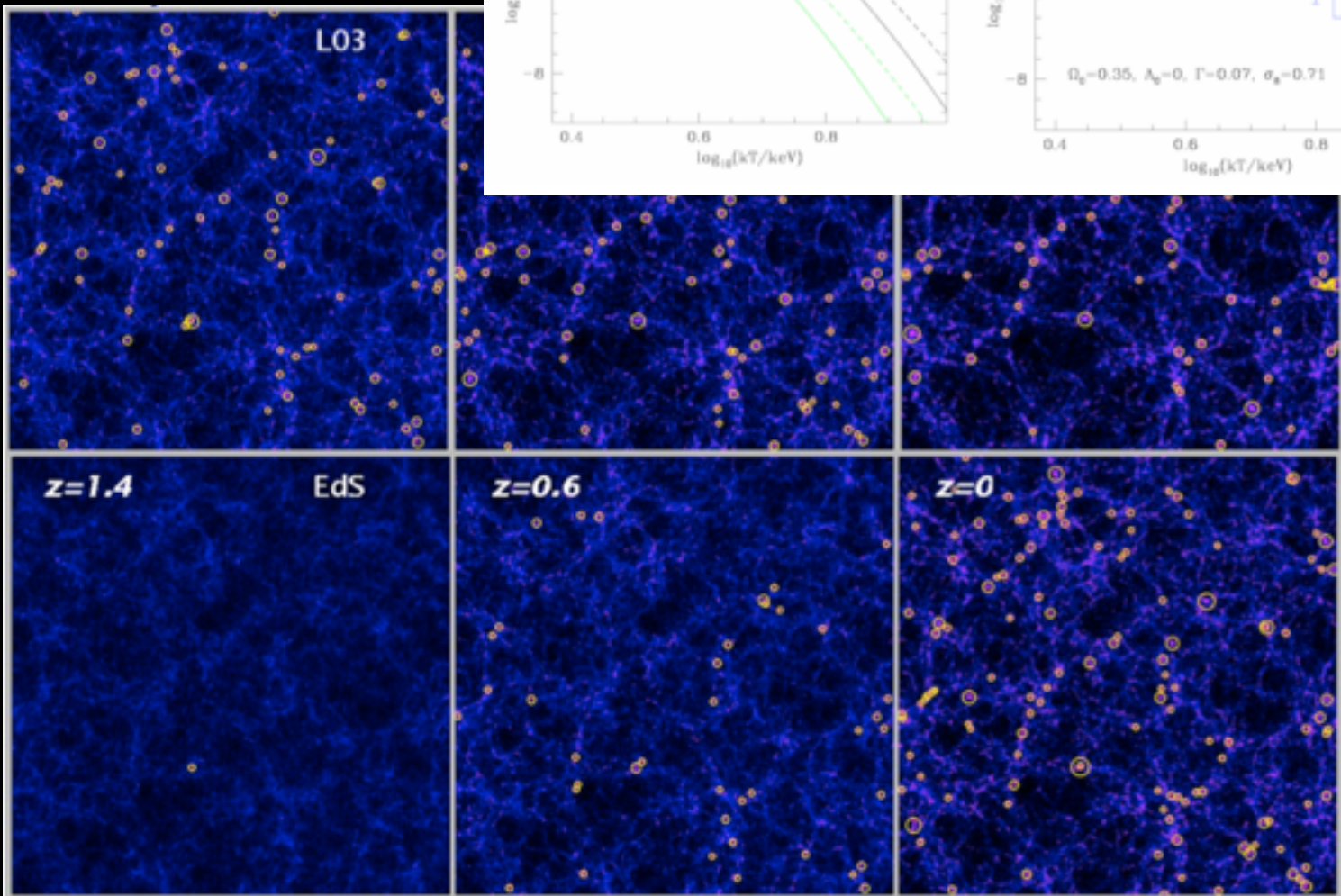
- abbondanza
- natura

della Materia Oscura

Es. Abbondanza di Ammassi di galassie



$\Omega_0=0.3$



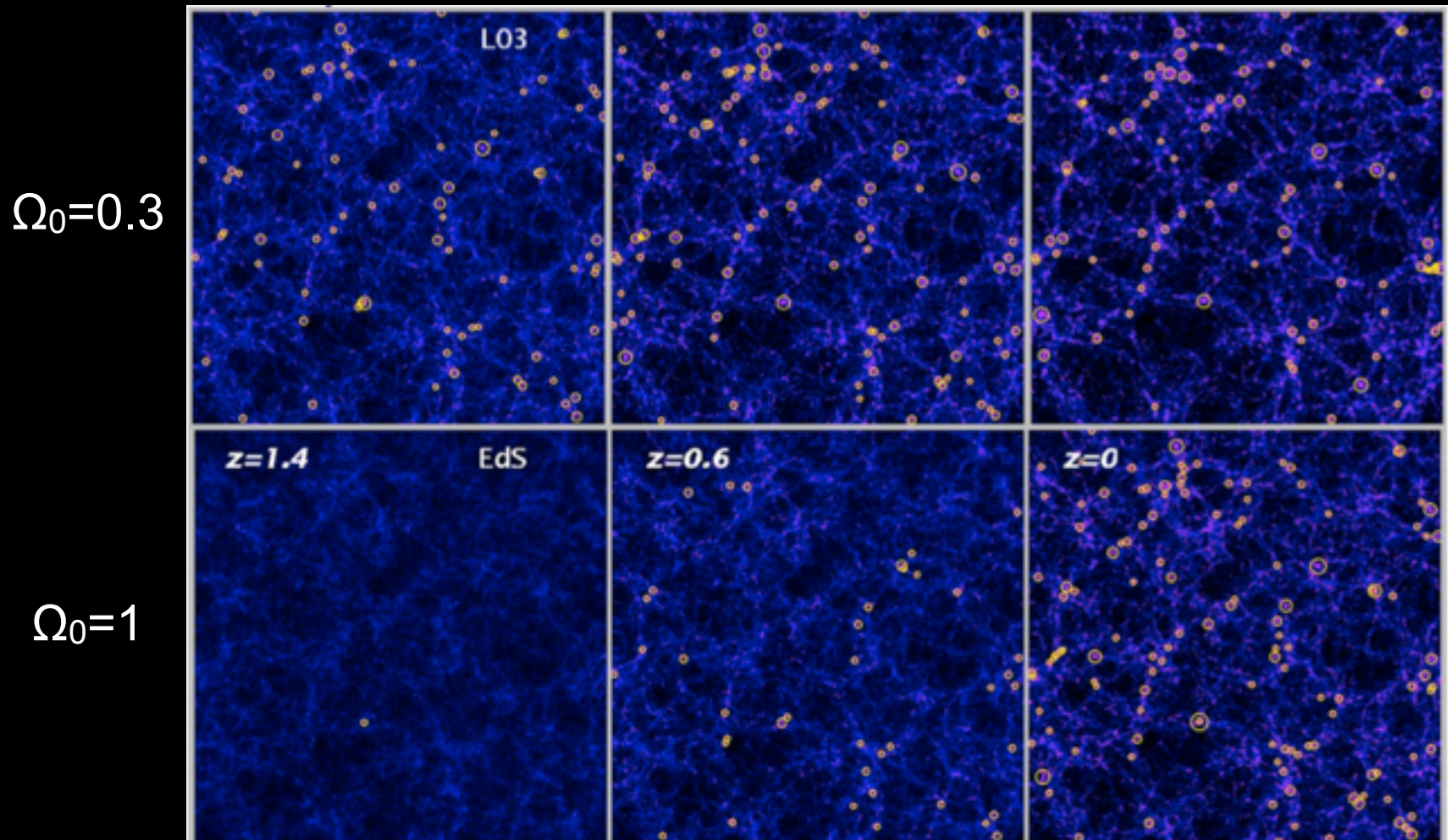
$\Omega_0=1$

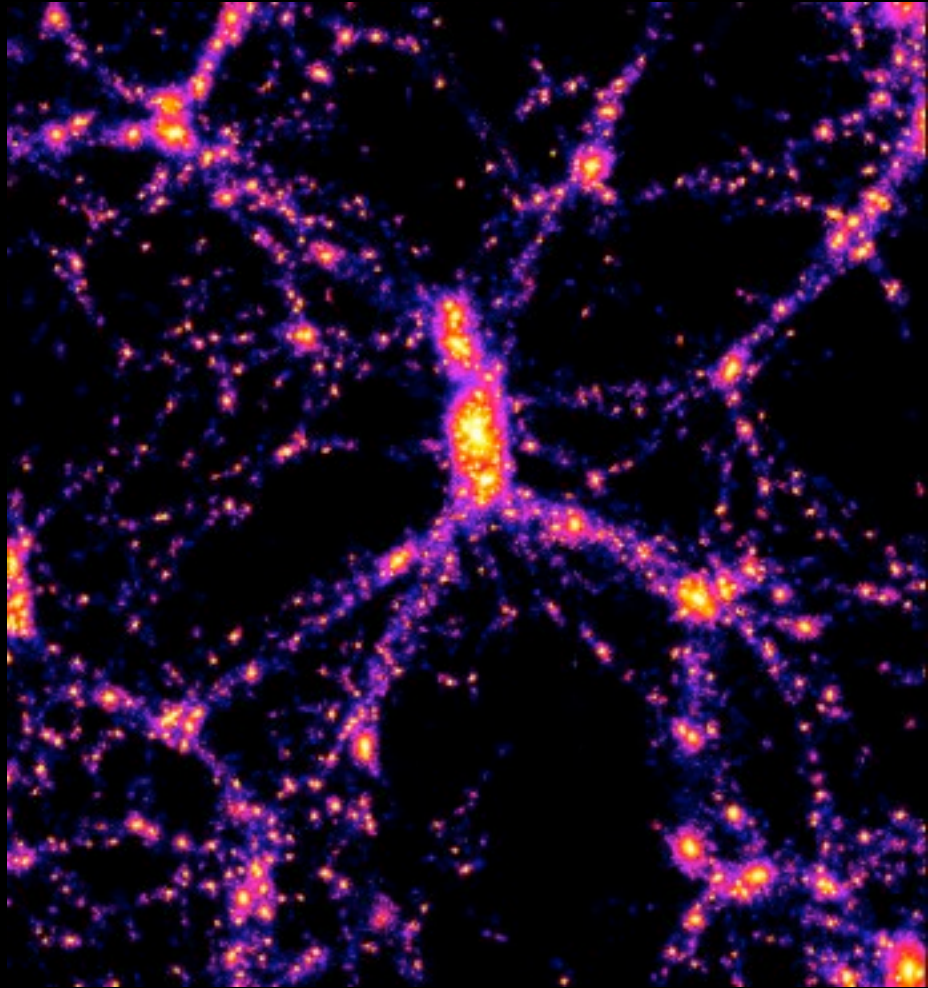
La formazione di strutture nell'Universo dipende fortemente da

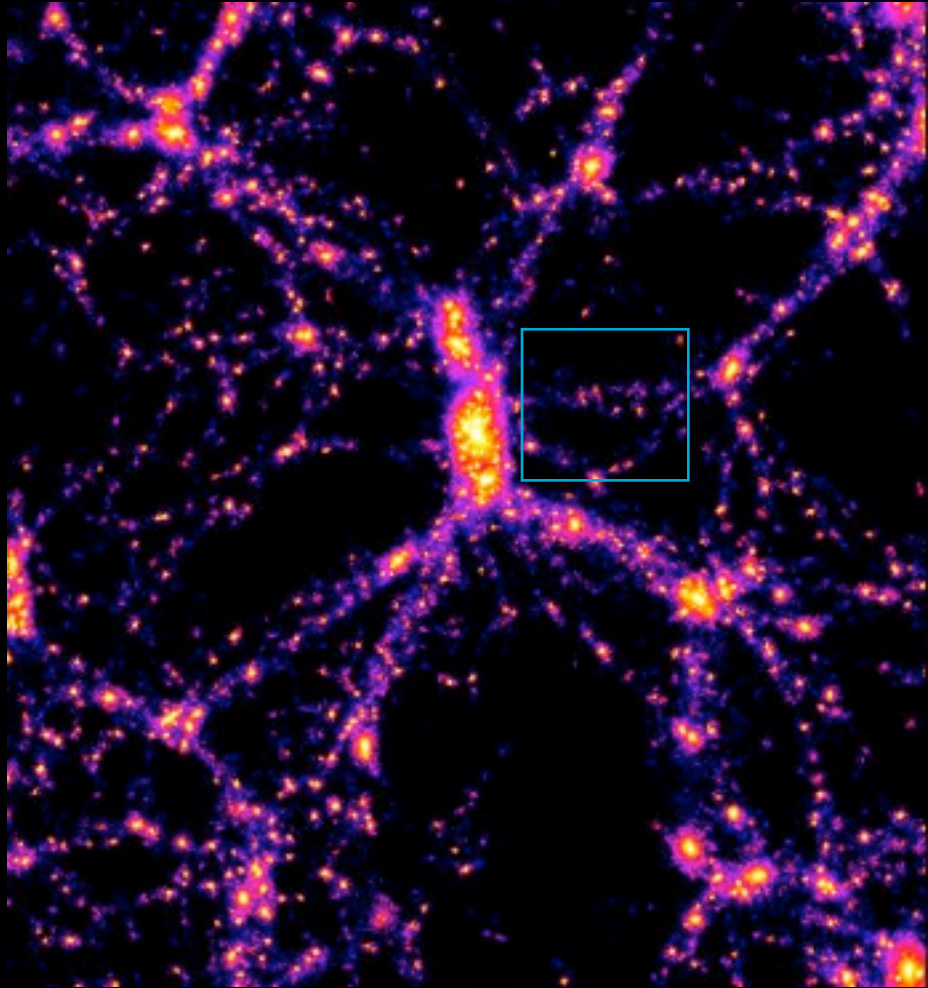
- abbondanza
- natura

della Materia Oscura

Es. Abbondanza di Ammassi di galassie in funzione del tempo ➡ $\Omega_M=0.3$







inizialmente ($t < 1 \text{ Mld anni}$)
interazioni tra protogalassie di
massa comparabile

morfologia irregolare

coalescenza con galassia
massiva (2 Mld anni)

a tempi successivi la frequenza
delle interazioni diminuisce

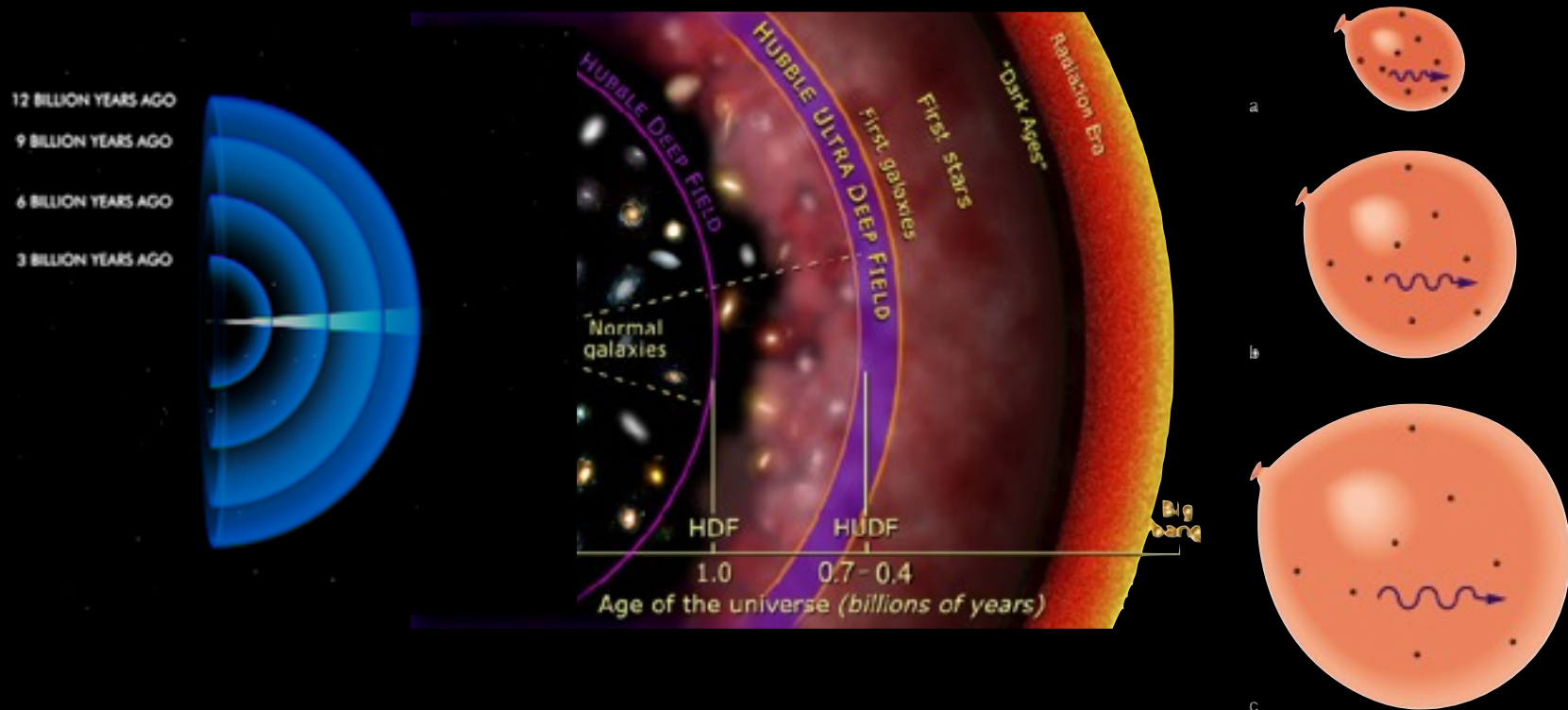
inclusione di oggetti di massa
molto minore

Oggi e' possibile verificare gli scenari di formazione delle galassie osservando galassie estremamente lontane.

La luce che riceviamo e' stata emessa miliardi di anni fa, e ci consente di osservare le fasi della formazione delle galassie

Oggi e' possibile verificare gli scenari di formazione delle galassie osservando galassie estremamente lontane.

La luce che riceviamo e' stata emessa miliardi di anni fa, e ci consente di osservare le fasi della formazione delle galassie



HDF N

150 orbite, 10 giorni consecutivi
(intorno Natale 1995)

blu, rosso, e infrarosso
(F450W, F606W, F814W)

HDF S

10 giorni esposizione in 1998

UHDF – al centro di HDF S

11.3 giorni di esposizione
gennaio 04
oltre 10000 galassie nell'immagine
piu' profonda dell'Universo

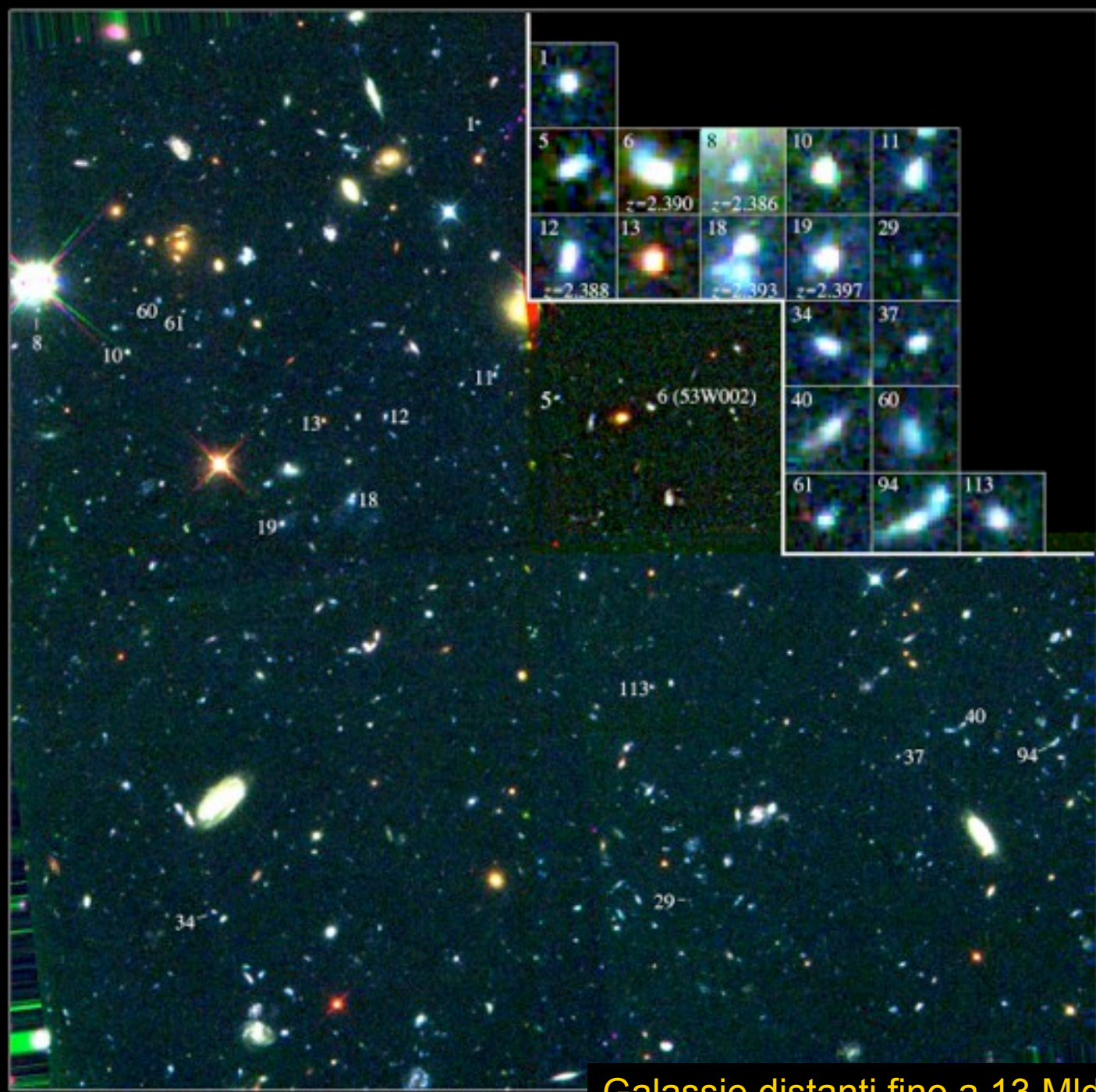
magnitudine limite
vicino alla 30-esima magnitudine



- HDF e' distante da ogni stella luminosa (>2 deg da stelle <2 mag).
- Il campo e' vuoto di galassie vicine brillanti, stelle, ammassi di galassie e radio-sorgenti)
- Bassa estinzione ($E(B-V) = 0.00$),
- Bassa densita' colonnare di H ($\log(N_H) = 20.24$).

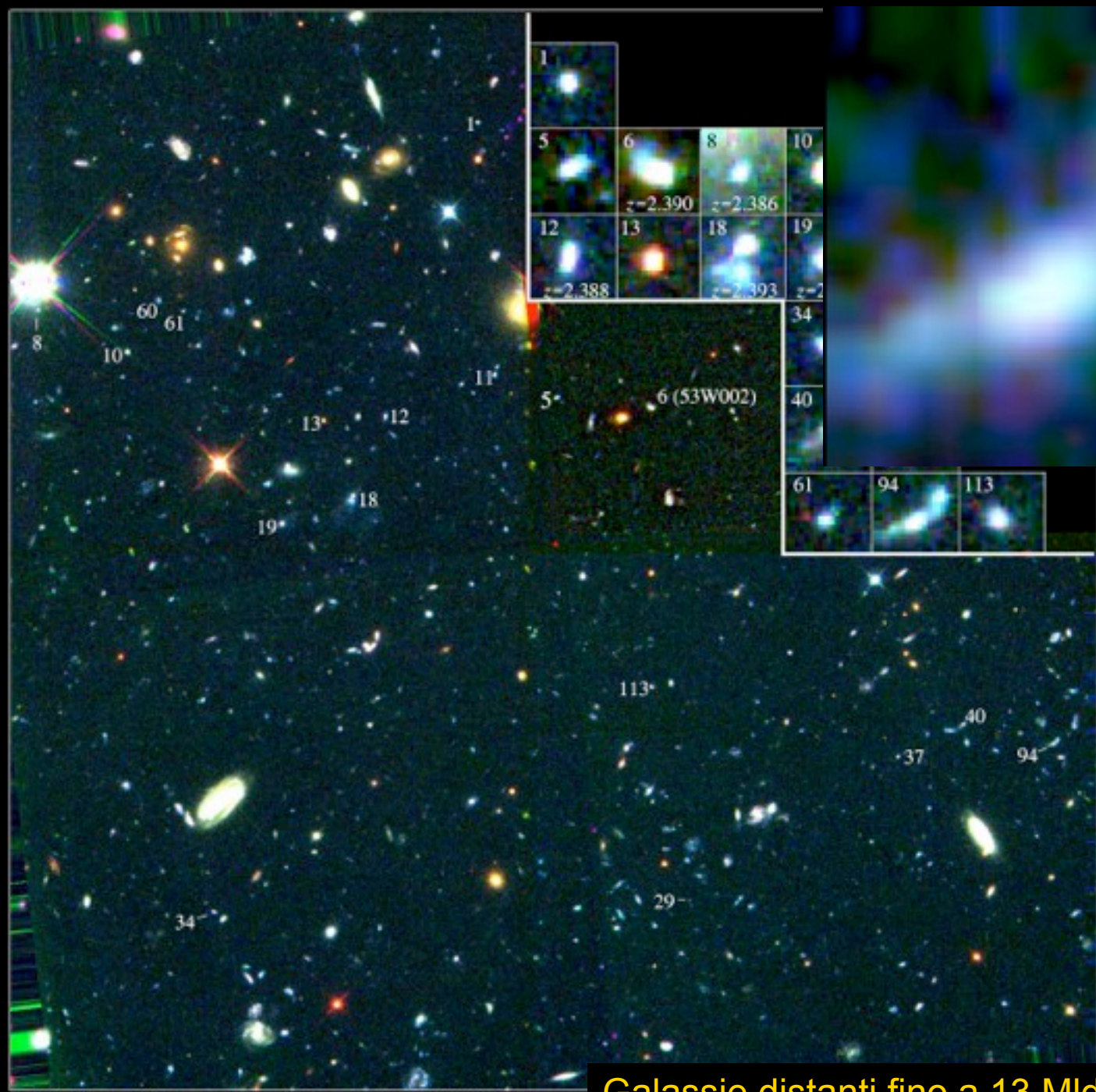


Si riescono a rivelare oggetti fino ad 4×10^9 piu' deboli
della stella piu' debole visibile a occhio nudo



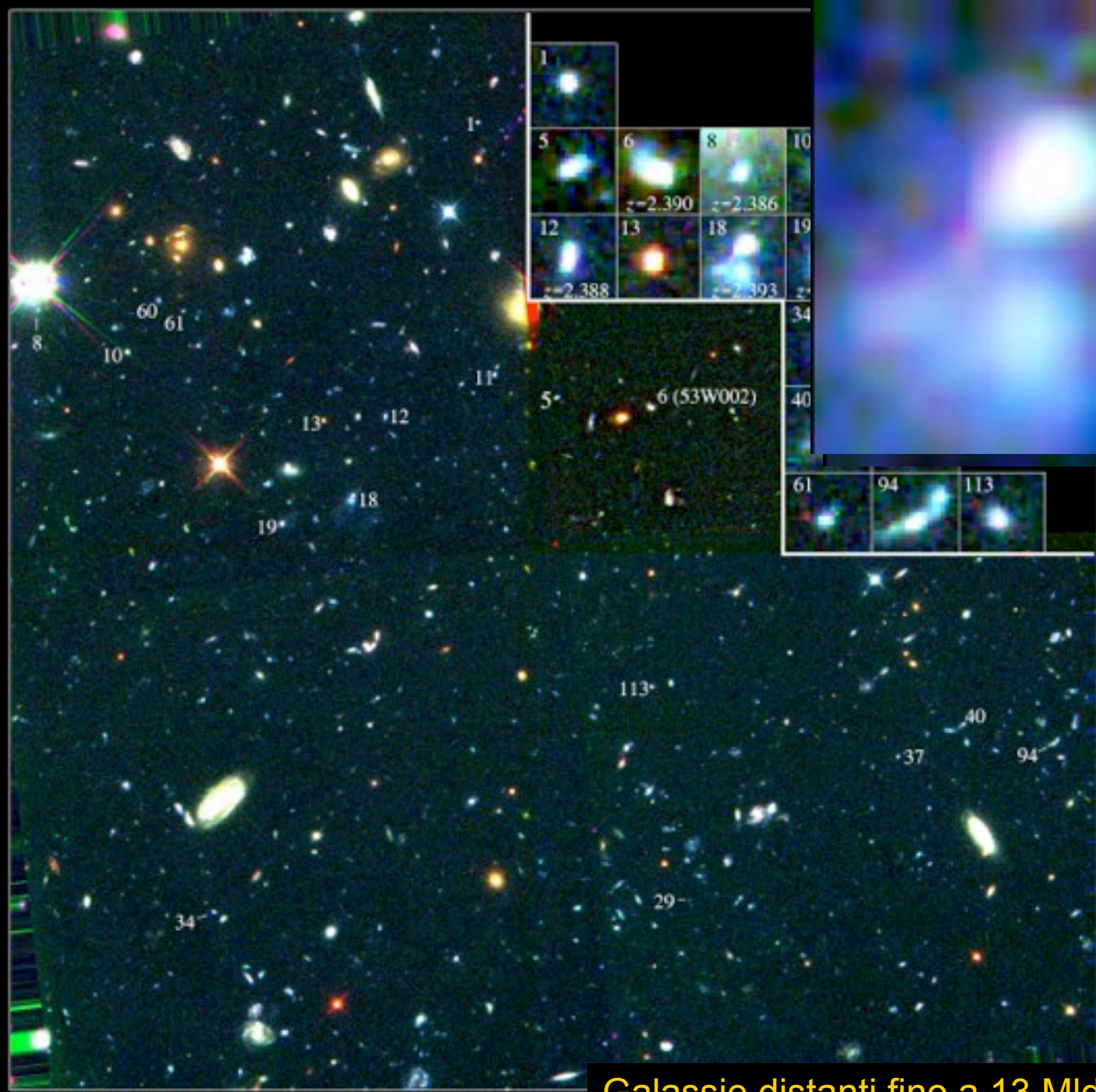
R. Windhorst (Arizona State University) and NASA

Galassie distanti fino a 13 Mld anni luce



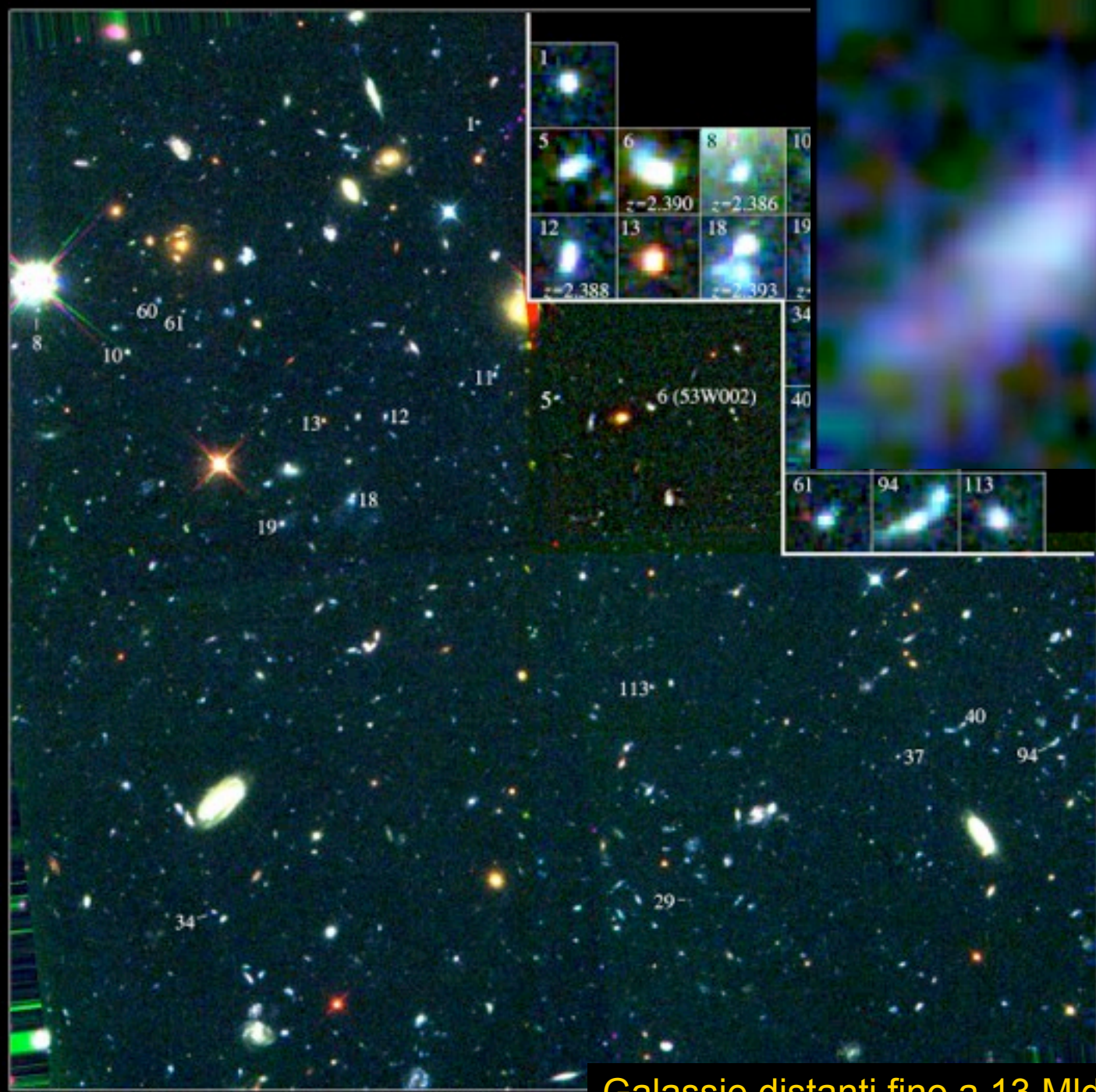
R. Windhorst (Arizona State University) and NASA

Galassie distanti fino a 13 Mld anni luce



R. Windhorst (Arizona State University) and NASA

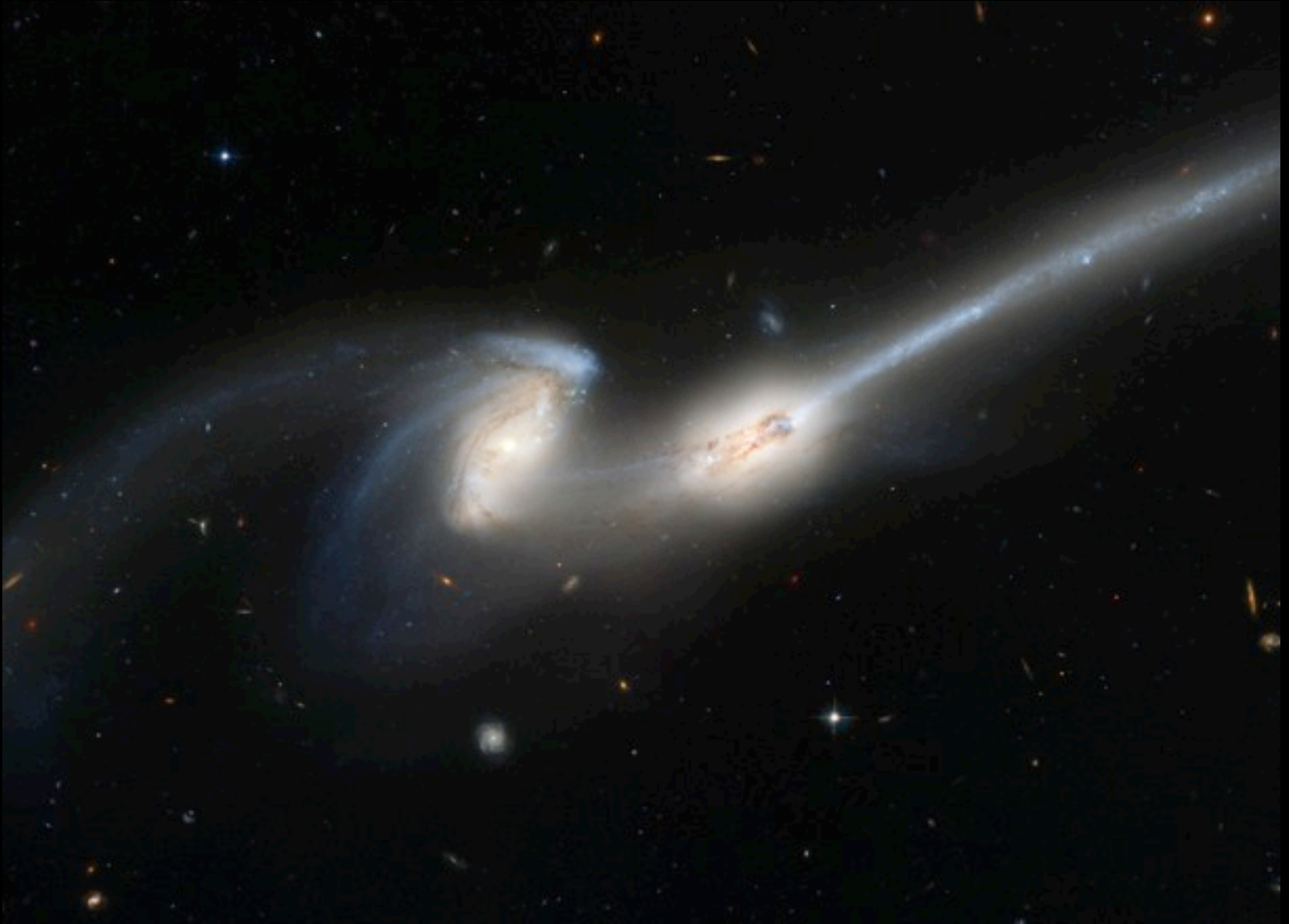
Galassie distanti fino a 13 Mld anni luce



R. Windhorst (Arizona State University) and NASA

Galassie distanti fino a 13 Mld anni luce

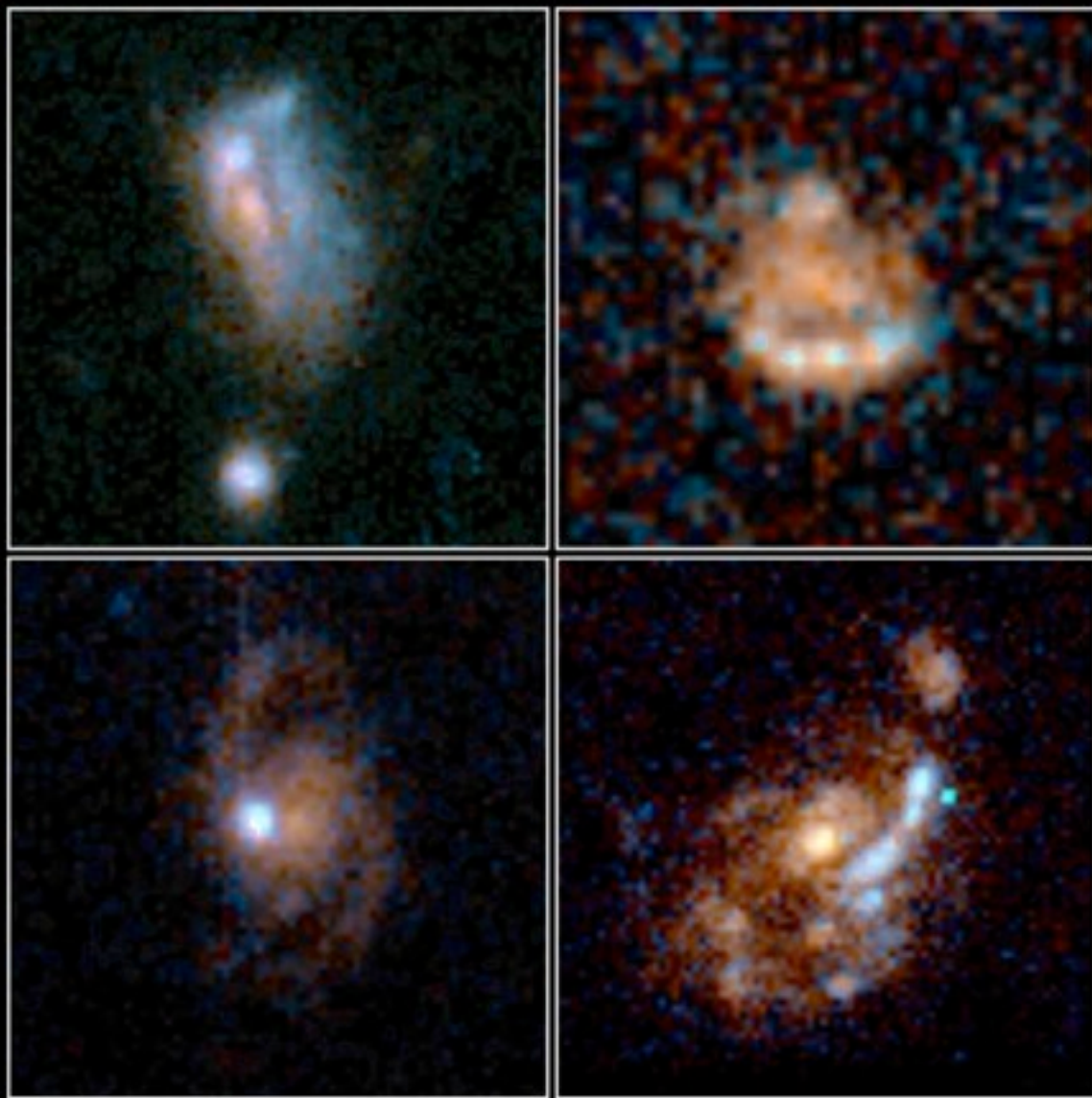
OGGI ~2% delle galassie non rientra nei tipi E, S0, S, Irr
sistemi disturbati e/o interagenti



1-4 Mld di anni dal Big Bang



1-4 Mld di anni dal Big Bang



Medium Deep Survey

HST • WFPC2

PRC94-39b • ST ScI OPO • R. Griffiths (JHU), NASA





Hubble Space Telescope's Advanced Camera for Surveys.

La "Spiderweb Galaxy," MRC 1138-262 mostra una decina di galassie satellite con alta formazione stellare in forma di addensamenti in fase di aggregazione. La galassie e' lontana 10.6 Mld di anni luce, mostra l'evoluzione delle galassie nell'Universo 3 Mld di anni dopo il Big Bang.

La formazione di strutture nell'Universo dipende fortemente da

- abbondanza
- natura

della Materia Oscura

Se DM e' costituita da particelle poco "pesanti" le alte velocita' a cui queste si muovono azzerano la condensazione alla scala delle galassie.

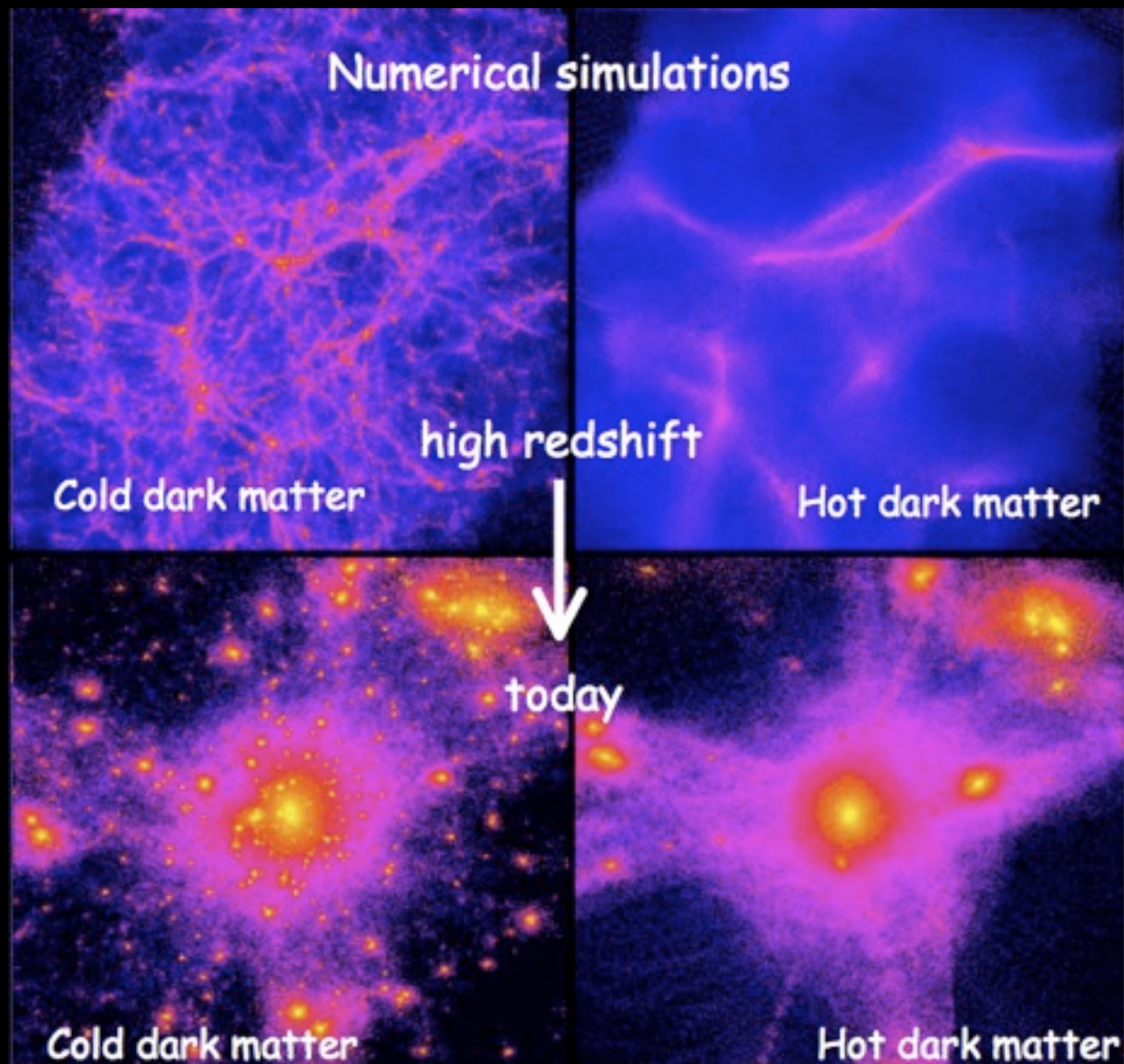
1) L'unico contributo alla DM viene dai neutrini osservati.

Masse molto piccole indicate dalle oscillazioni (ordine 0.001 eV), implicano un contributo trascurabile alla DM ($\Omega_\nu < 0.002$)

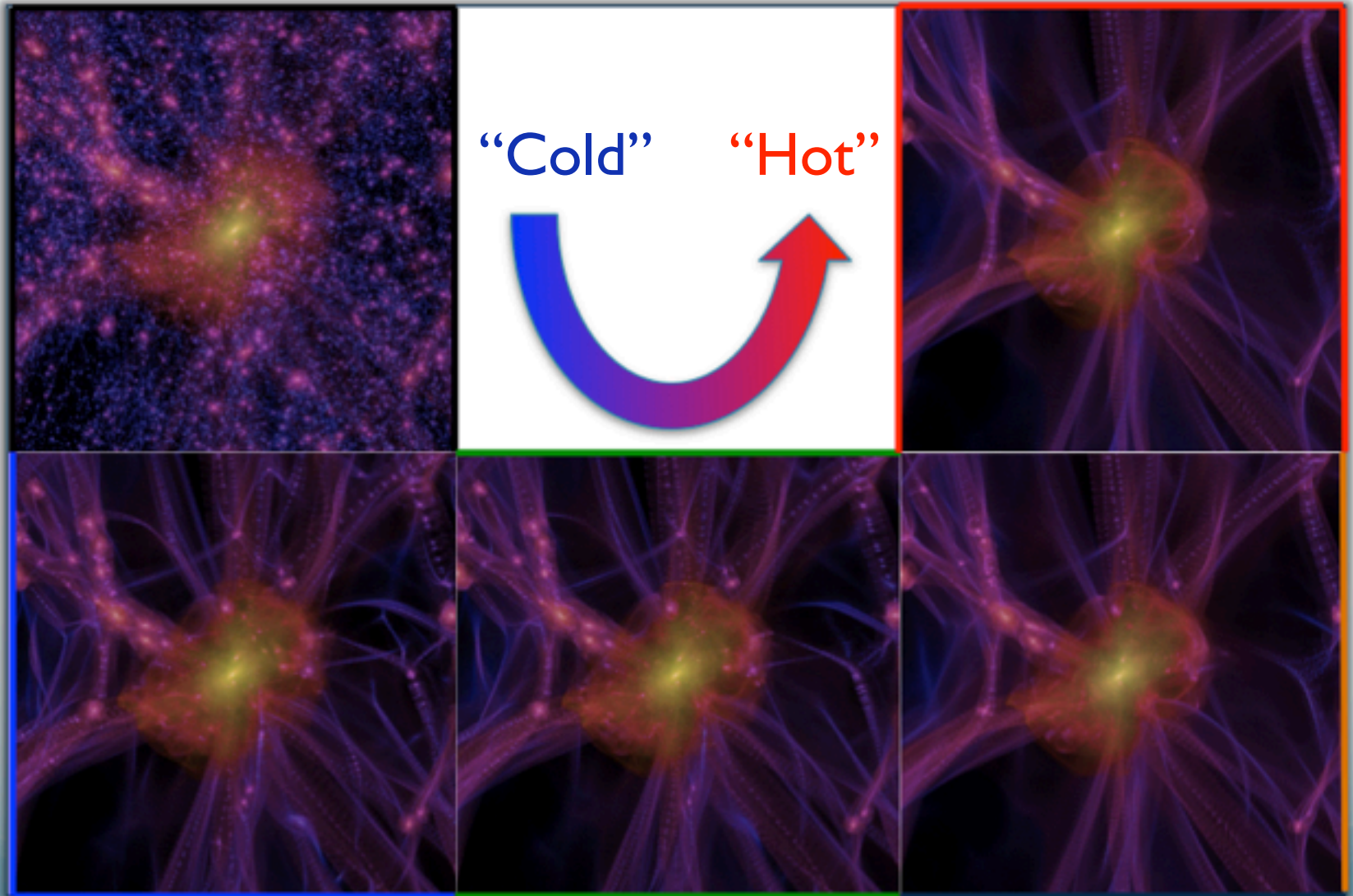
2) Esistono neutrini massivi: la formazione delle strutture cosmiche fornisce vincoli stringenti: $m_\nu > 3 \text{ keV}$

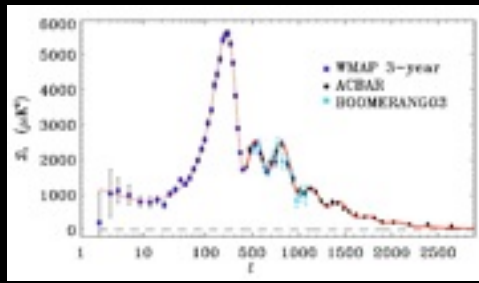
massa elettrone 511 keV = 9.10^{-28} g

$$E=mc^2$$



Varying the particle mass

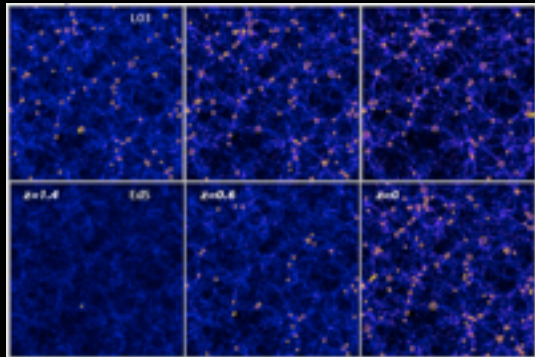
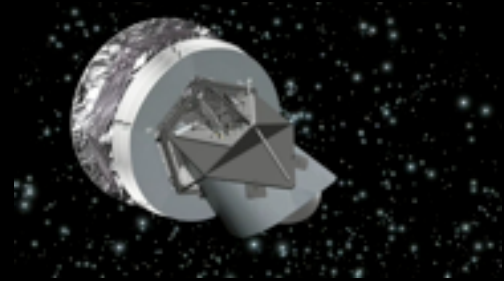




Il contributo della materia ordinaria (protoni, elettroni, tutte le particelle che interagiscono con la luce) e' estremamente piccolo:

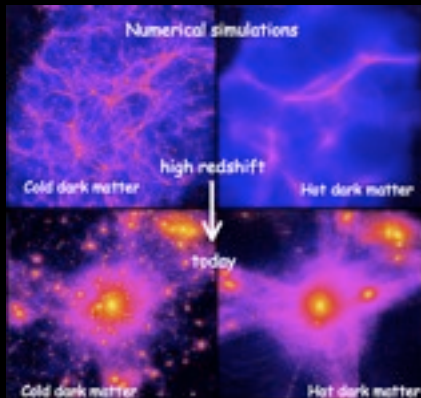
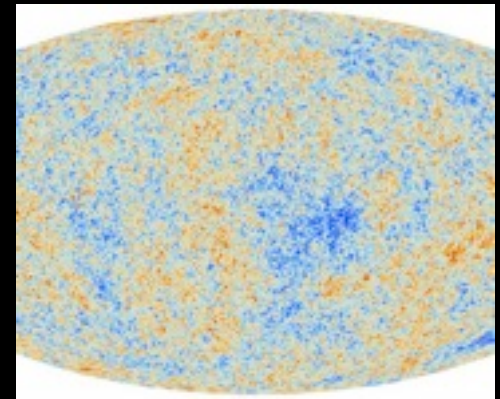
$$\Omega_b=0.04$$

Planck Observatory



Il contributo alla densita' dell'Universo da parte della Materia Oscura e'

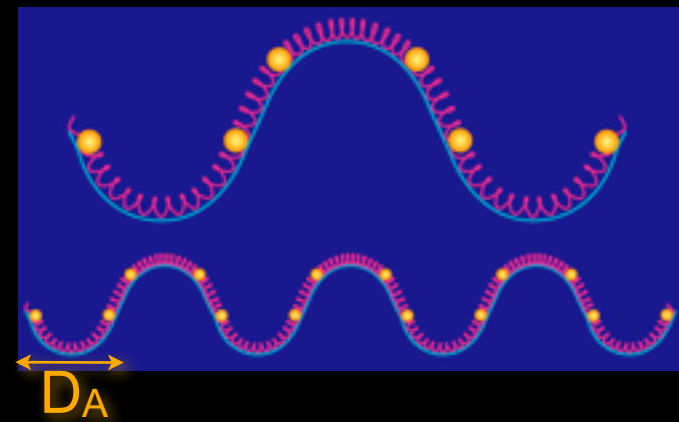
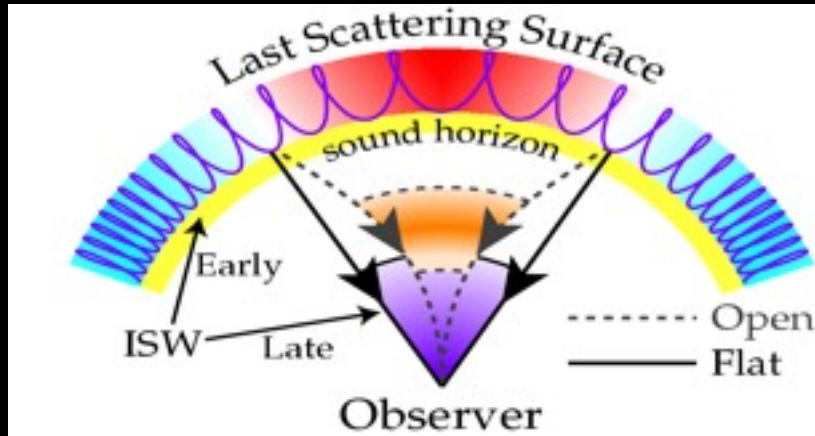
$$\Omega_{DM}=0.25$$



Sebbene la natura della Materia Oscura e' ignota, non puo' essere materia oscura "calda". Particelle con massa > 3 keV

Materia Oscura Fredda - **CDM**

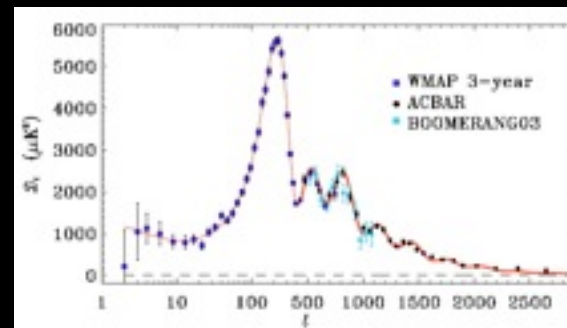
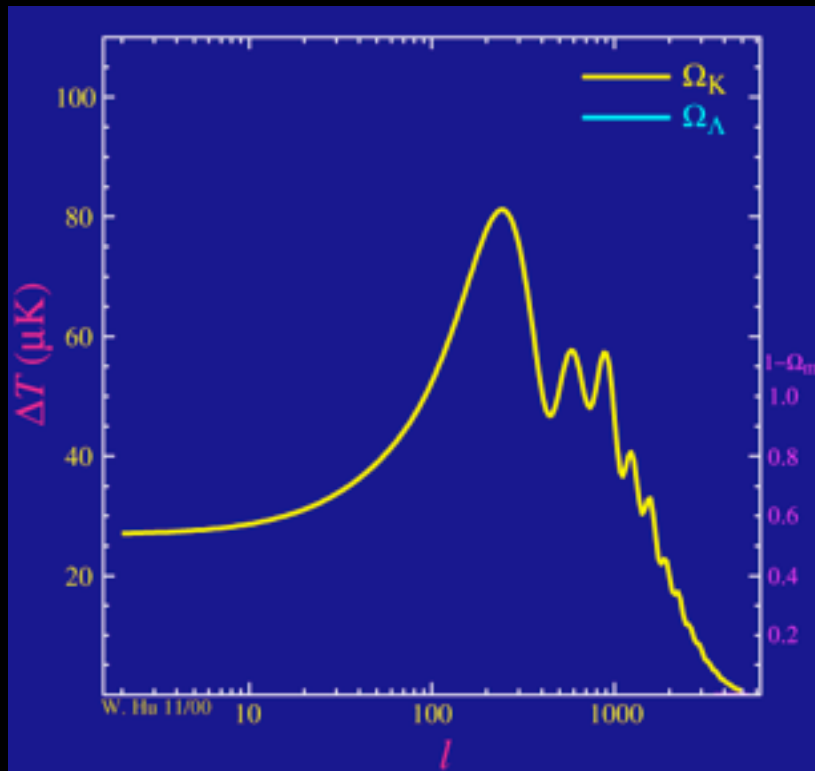
Attraverso la misura dell'angolo sotteso dalle fluttuazioni del fondo cosmico possiamo misurare la geometria dell'Universo



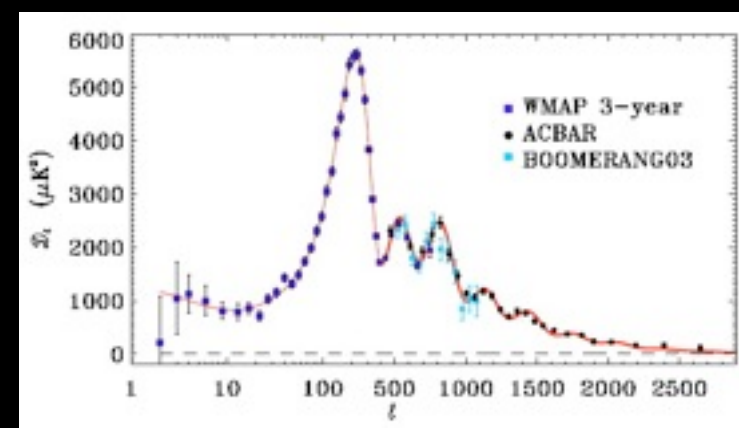
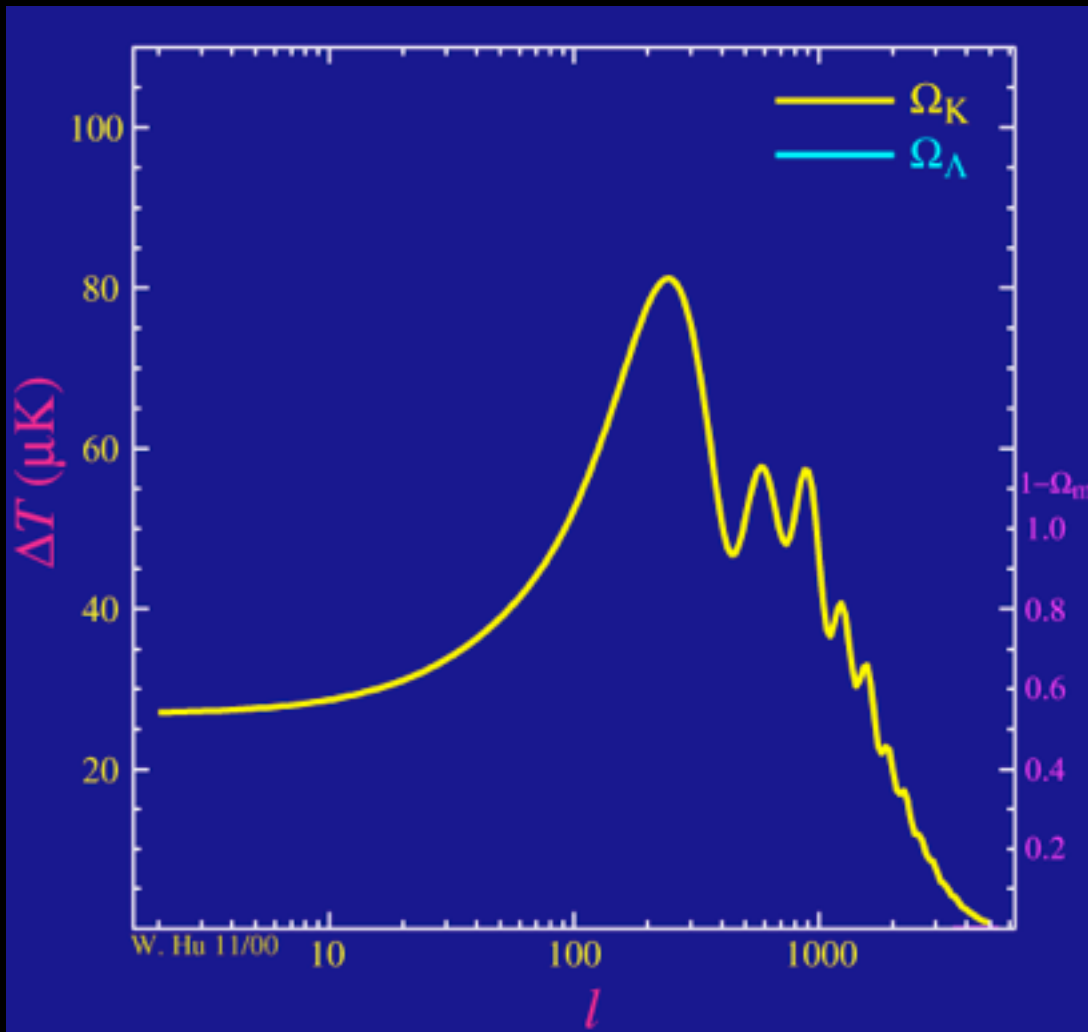
$D_A = c_s t_R$
Orizzonte Acustico

Perturbazioni su scale D_A hanno raggiunto la massima compressione al tempo della ricombinazione t_R

Calcolato D_A , l'angolo sotteso dipende dalla geometria dell'Universo: posso confrontarlo con quello osservato



$$\theta \approx 180^\circ / \ell$$



Risultato $\Omega_K=0$

Ma $\Omega_{\text{materia}}=0.3$

manca qualcosa $1-\Omega_K = \Omega_{\text{materia}} + \dots$

Equazioni Einstein

THE EINSTEIN FIELD EQUATION

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

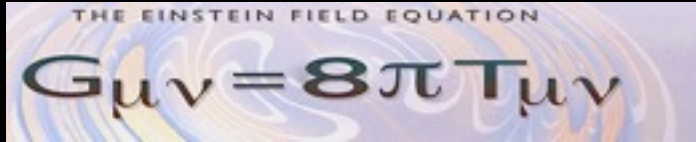
Geometria

Massa-Energia

$$1 + \frac{kc^2}{H^2 R^2} = \frac{8\pi G \rho}{3 H^2}$$

$$1 - \Omega_k = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

Equazioni Einstein


$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

$$+ \Lambda g_{\mu.\nu}$$

Geometria

Massa-Energia

Energia del Vuoto

$$1 + \frac{kc^2}{H^2 R^2} = \frac{8\pi G \rho}{3 H^2} + \frac{\Lambda}{3 H^2}$$

$$1 - \Omega_k = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

Equazioni Einstein

THE EINSTEIN FIELD EQUATION

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

$$+ \Lambda g_{\mu.\nu}$$

Geometria

Massa-Energia

Energia del Vuoto

$$1 + \frac{\cancel{kc^2}}{\cancel{H^2} R^2} = \frac{8\pi G \rho}{3 H^2} + \frac{\Lambda}{3 H^2}$$

$$1 - \cancel{\Omega_k} = \Omega_m + \Omega_\Lambda \quad \Rightarrow \quad 1 = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

Le misure su

- densita' di materia oscura
- geometria dell'Universo

sono consistenti se si assume l'esistenza di una costante cosmologica con $\Omega_{\Lambda}=0.7$

Quale e' il suo effetto sull'espansione dell'Universo ?

0.3



0.7



Ω_{Λ}

Le misure su

- densita' di materia oscura
- geometria dell'Universo

sono consistenti se si assume l'esistenza di una costante cosmologica con $\Omega_\Lambda=0.7$

Quale e' il suo effetto sull'espansione dell'Universo ?

The diagram shows the equation $1 = \Omega_m + \Omega_\Lambda$ enclosed in a rounded rectangle. Above the term Ω_m , there is a white arrow pointing upwards to the number 0.3. Above the term Ω_Λ , there is a blue arrow pointing upwards to the number 0.7.

$$1 = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

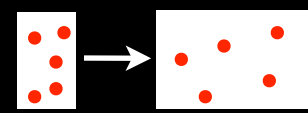
Universo dominato da materia oscura

$$1 = \Omega_m$$

$$H = \frac{\dot{R}}{R} \quad \text{Tasso Espansione}$$

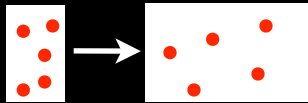
$$\rho_c = \frac{3 H^2}{8 \pi G}$$

$$\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_c}$$

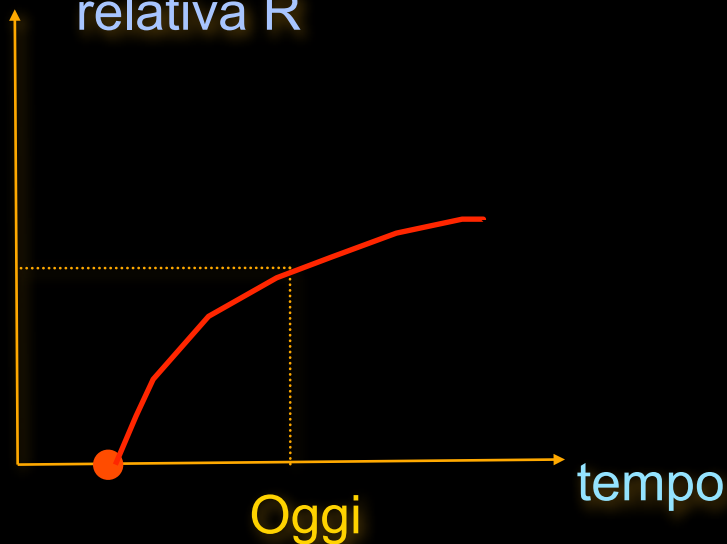


$$\rho = \frac{\rho_0}{R^3}$$

$$1 = \frac{8 \pi G \rho}{3 H^2}$$



Separazione relativa R



$$H^2 = \left(\frac{8 \pi G \rho_0}{r} \right) \frac{1}{R^3}$$

Tasso espansione

Espansione

velocita' espansione
diminuisce con R

Universo dominato
da energia oscura

$$1 = \Omega_{\Lambda}$$

$$H = \frac{\dot{R}}{R} \quad \text{Tasso Espansione}$$

$$\rho_c = \frac{3 H^2}{8 \pi G}$$

$$\Omega_{\Lambda} = \frac{\Lambda}{3 H^2}$$



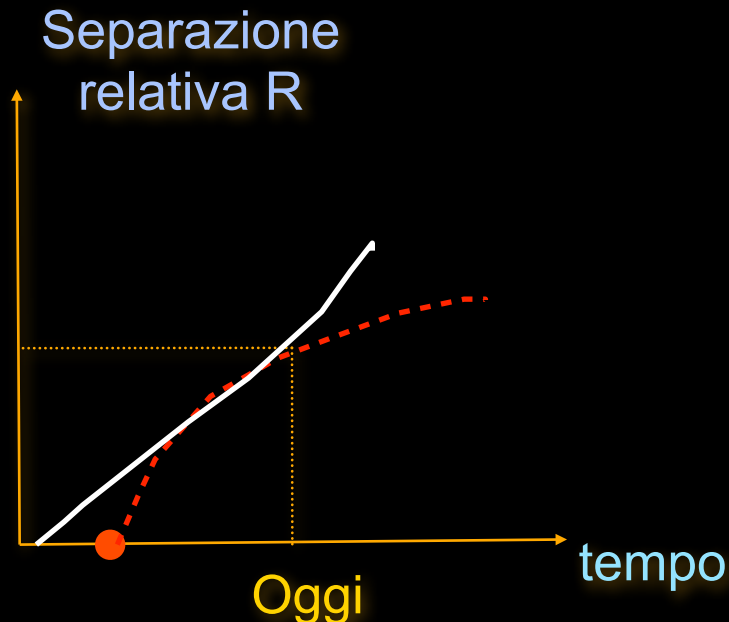
En. Vuoto
costante

$$1 = \frac{\Lambda}{3 H^2}$$

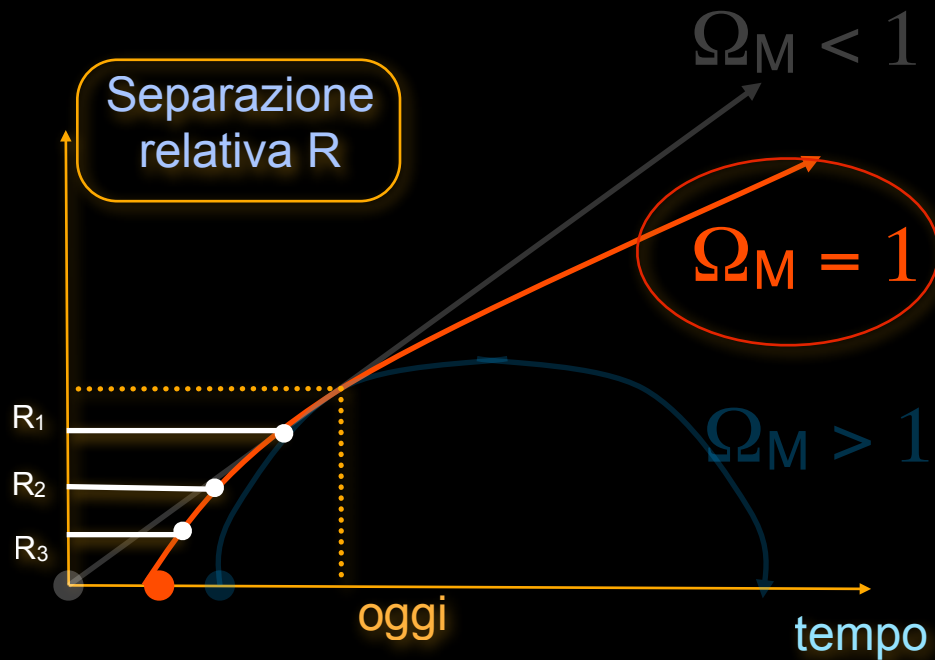
$$H^2 = \frac{\Lambda}{3}$$

Tasso espansione

velocita' espansione
cresce con R



Misurare l'evoluzione del Fattore di Scala R



Misurare

1) Separazione relativa

Fattore di espansione $R \rightarrow$ Redshift

2) Tempo

= Distanza di un Oggetto / c

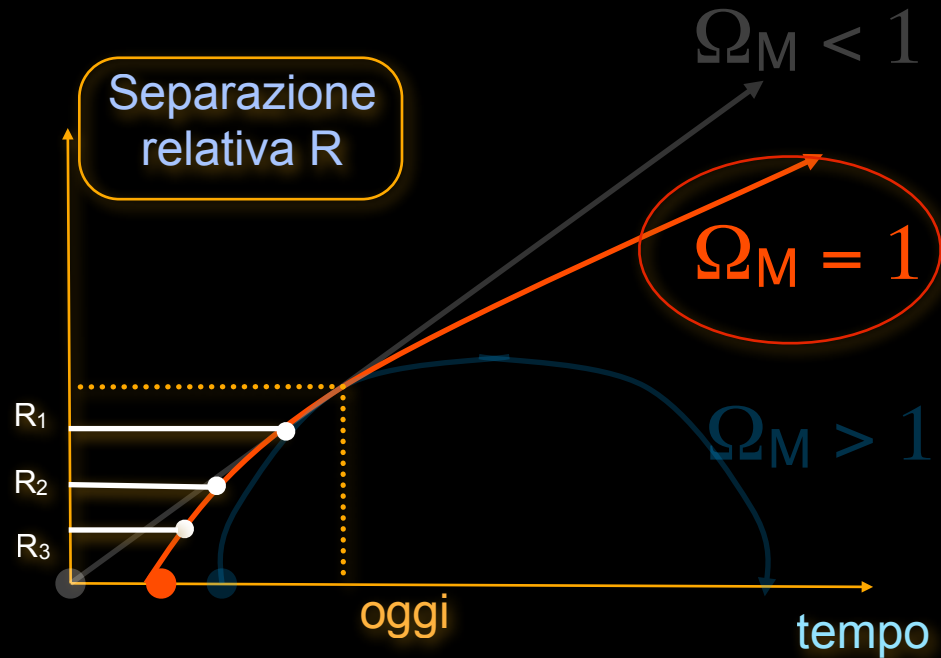
Misurare l'evoluzione del Fattore di Scala R

$$R = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

R_1

R_2

R_3



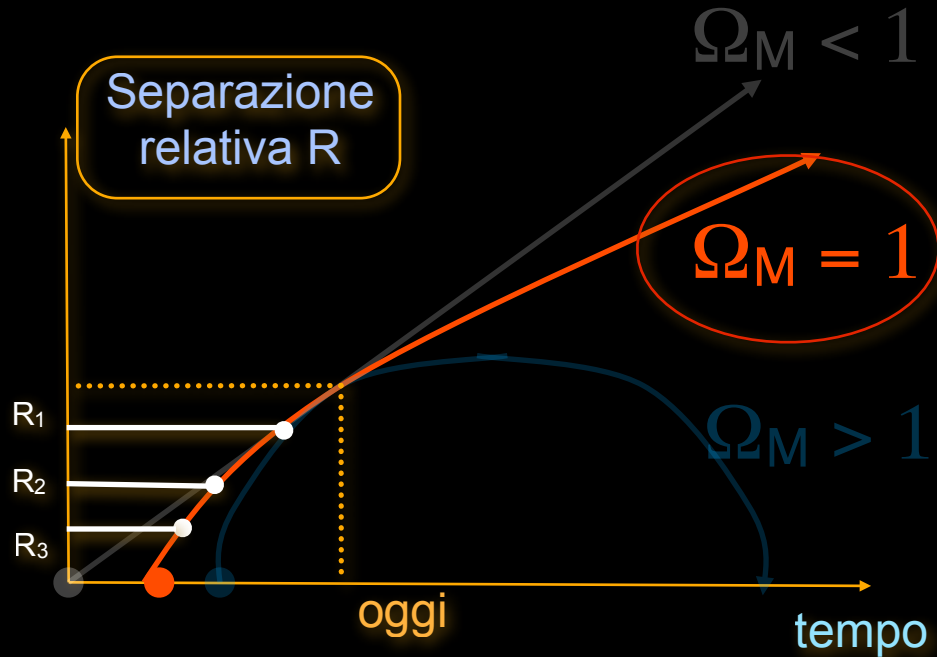
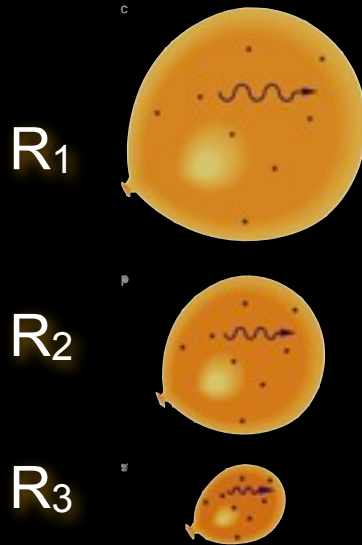
Misurare

1) Separazione relativa
Fattore di espansione $R \rightarrow$ Redshift

2) Tempo
= Distanza di un Oggetto / c

Misurare l'evoluzione del Fattore di Scala R

$$R = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

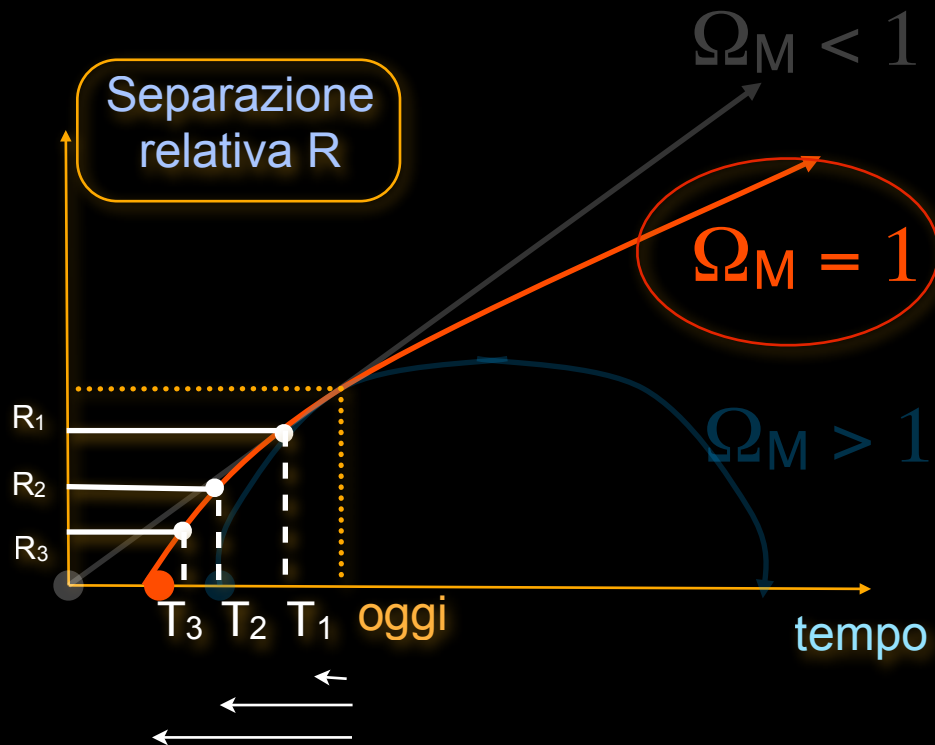


Misurare

1) Separazione relativa
Fattore di espansione $R \rightarrow$ Redshift

2) Tempo
= Distanza di un Oggetto / c

Misurare l'evoluzione del Fattore di Scala R



Misurare

1) Separazione relativa

Fattore di espansione $R \rightarrow$ Redshift

2) Tempo

= Distanza di un Oggetto / c

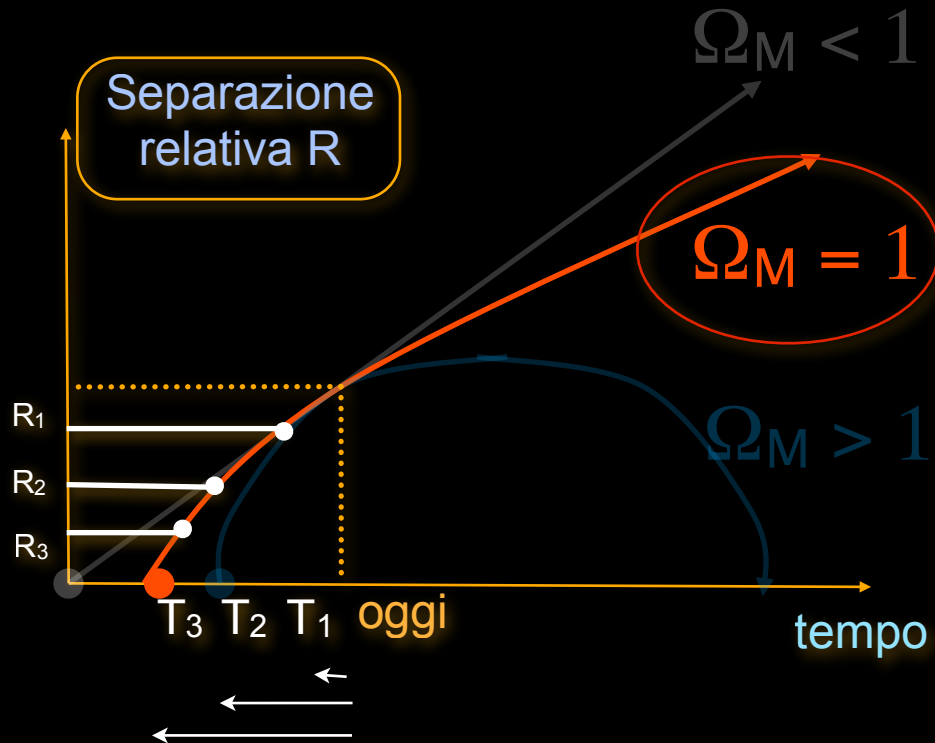
Misurare l'evoluzione del Fattore di Scala R

$$R = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

R_1

R_2

R_3



Misurare

1) Separazione relativa
Fattore di espansione $R \rightarrow$ Redshift

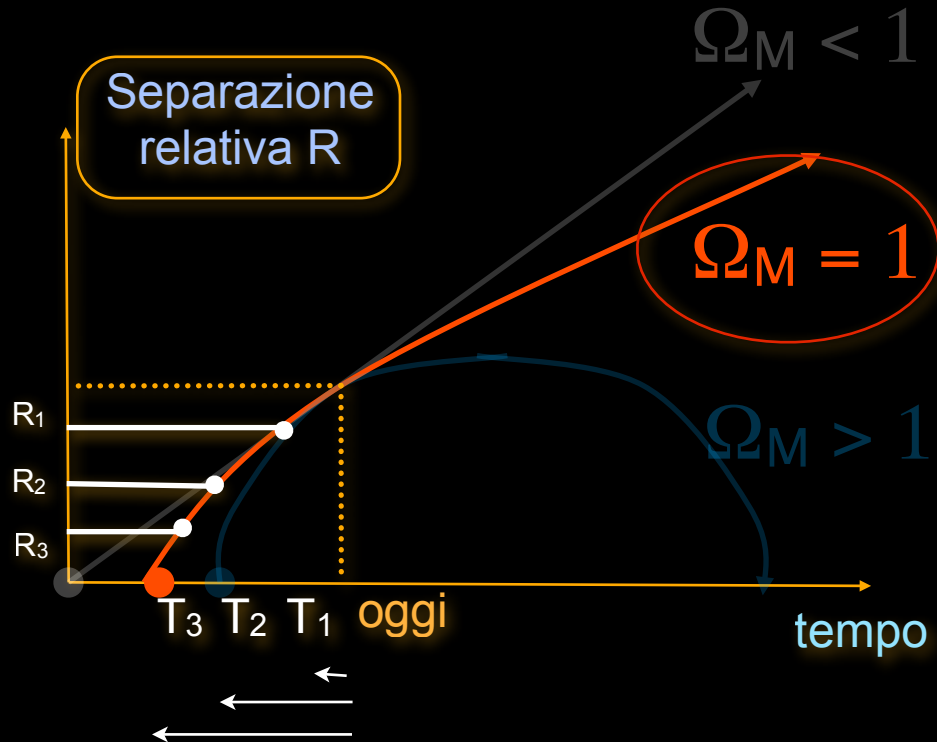
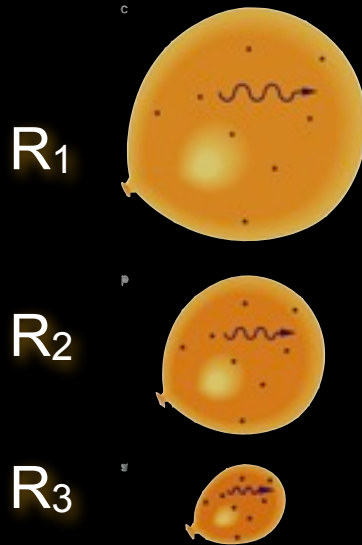
2) Tempo
= Distanza di un Oggetto / c

Osservare oggetti distanti
per cui posso effettuare
misure di

- Fattore di Espansione
- Distanza

Misurare l'evoluzione del Fattore di Scala R

$$R = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$



Misurare

1) Separazione relativa
Fattore di espansione $R \rightarrow$ Redshift

2) Tempo
= Distanza di un Oggetto / c

Osservare oggetti distanti
per cui posso effettuare
misure di

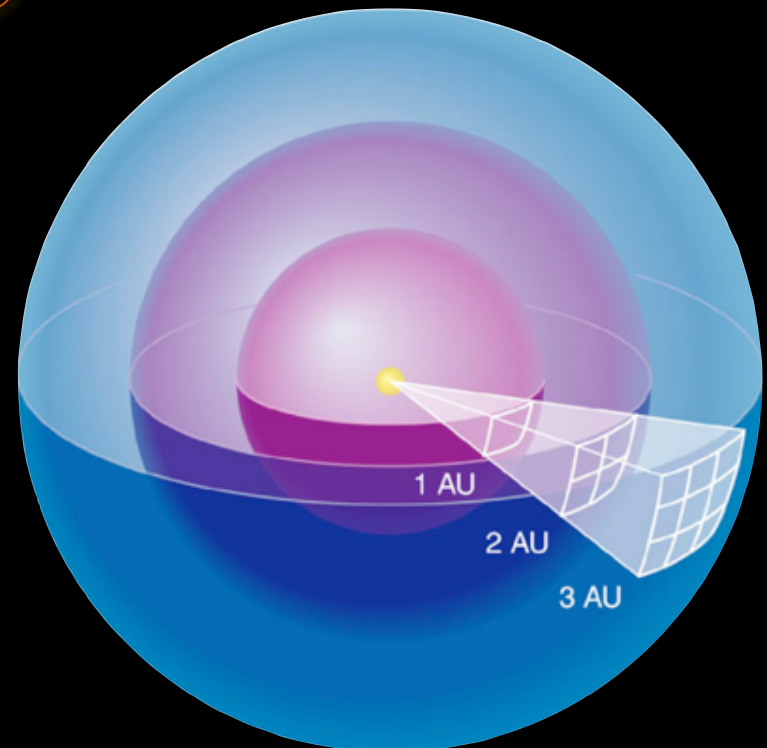
- Fattore di Espansione
- Distanza

Se - data la luminosita' APPARENTE di un'oggetto -
posso anche misurarne

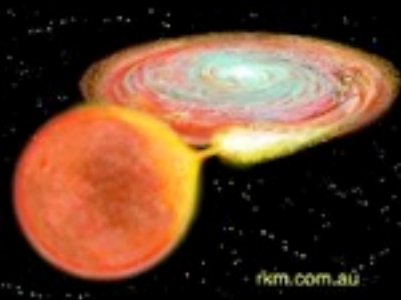
la luminosita' INTRINSECA

cio' mi permette di misurare la sua DISTANZA

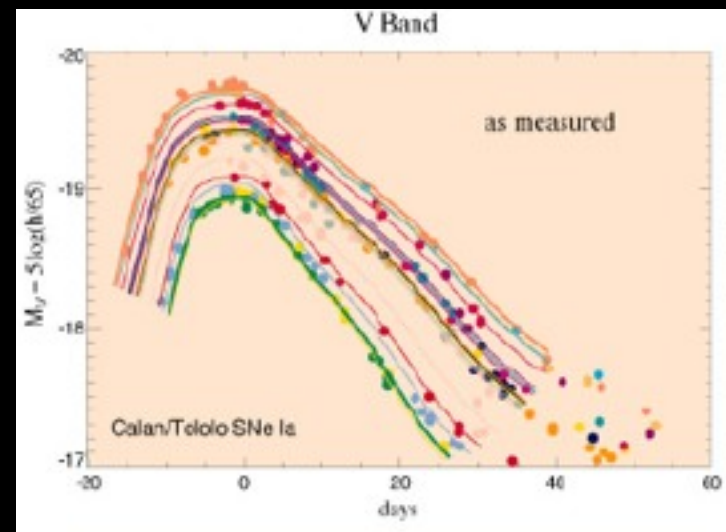
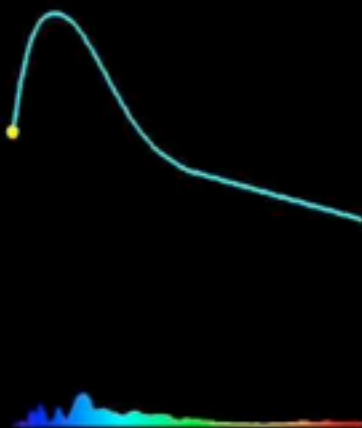
$$Flusso = \frac{Luminosita'}{4 \pi D^2}$$



To measure the expansion rate at large distances, we search for events that are very bright, and predictably so: **Type Ia Supernovae**.

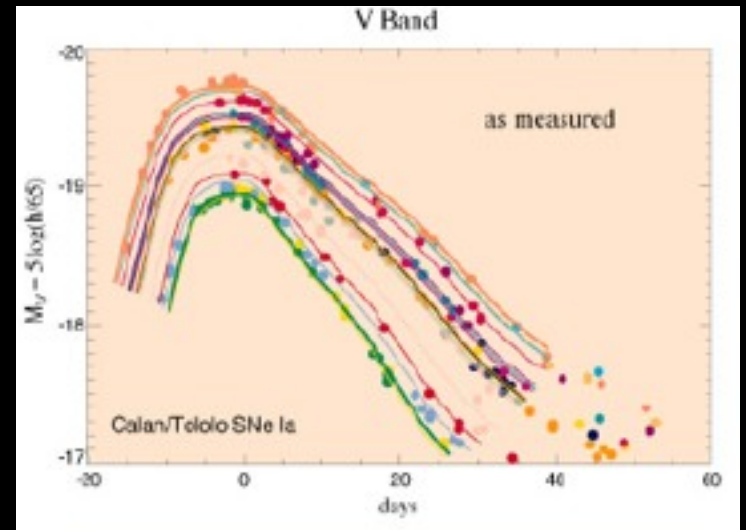
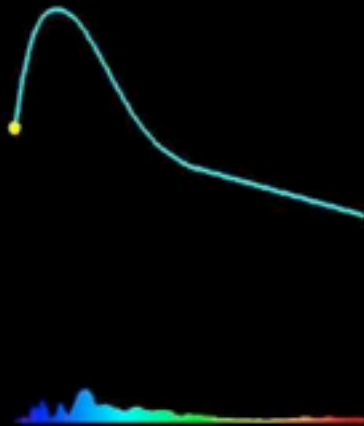


Matter gradually accretes onto a compact white dwarf star, until the gravitational pull becomes too great (at the Chandrasekhar limit) and the star collapses and explodes.



La Velocita' di Diminuzione della luce
della SNIa e' legata alla loro luminosita'
massima

Misura del tempo di decadimento
→ misura della luminosita' intrinseca
→ misura della distanza



La Velocita' di Diminuzione della luce
della SNIa e' legata alla loro luminosita'
massima

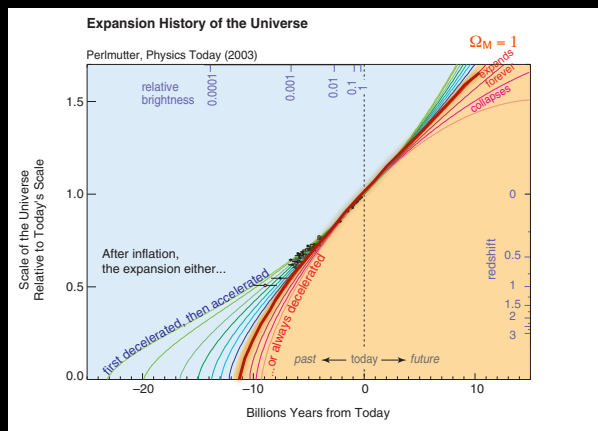
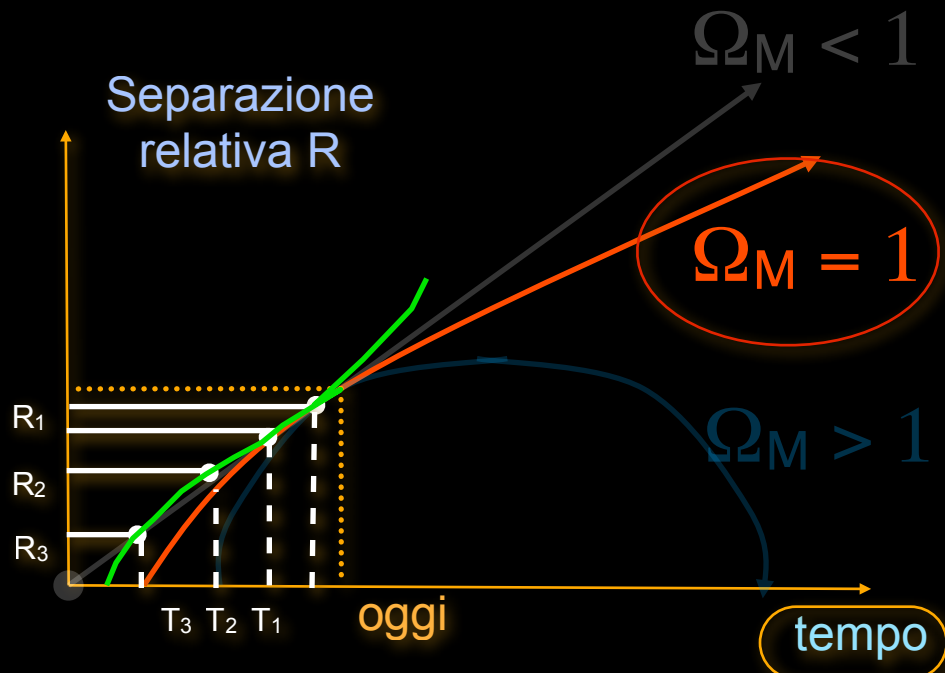
Misura del tempo di decadimento
→ misura della luminosita' intrinseca
→ misura della distanza



Misurare l'evoluzione del Fattore di Scala R

Risultati indicano una
espansione accelerata

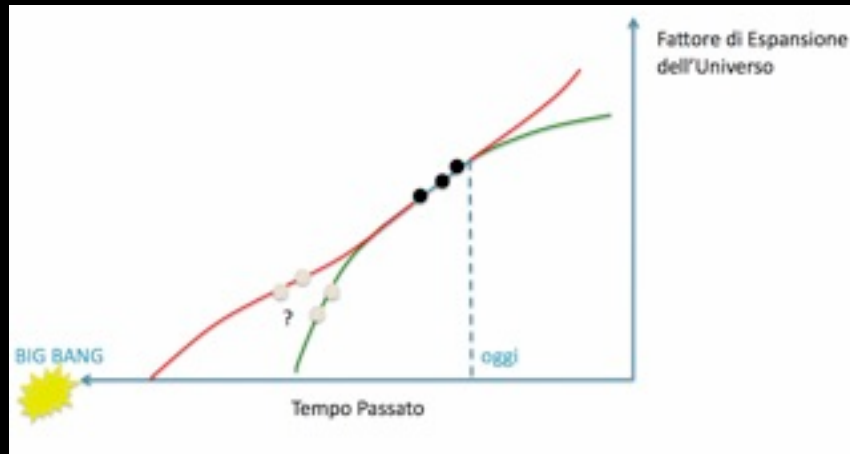
Nobel 2011 a
S. Perlmutter, B. Schmidt
e A. Riess



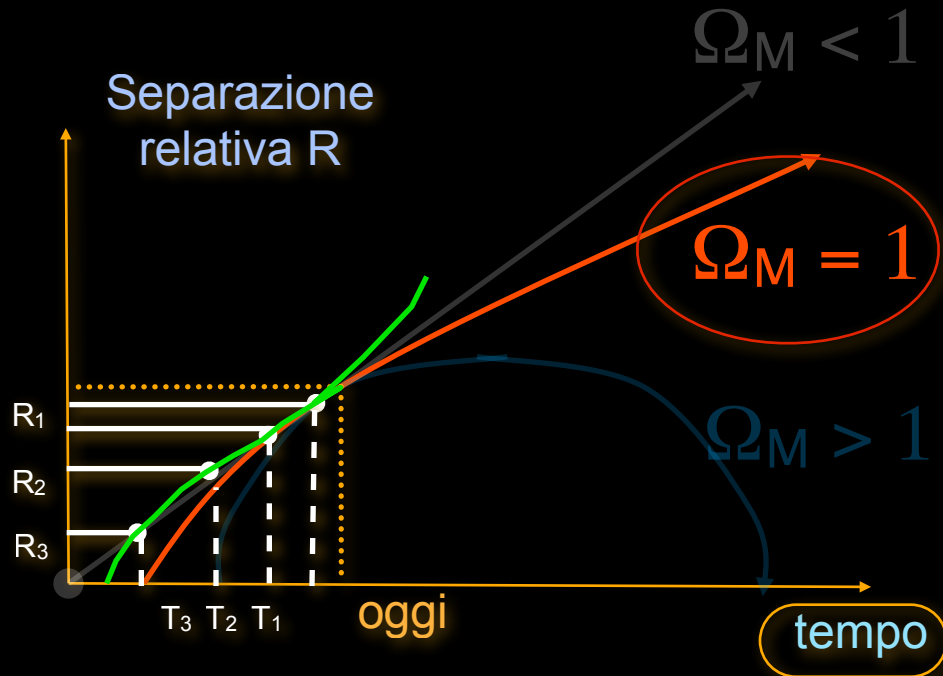
L'Universo e' in fase di espansione accelerata
Qualsiasi gas di particelle produce una decelerazione
 $\Omega_{En.Vuoto} = 0.7$

Misurare l'evoluzione del Fattore di Scala R

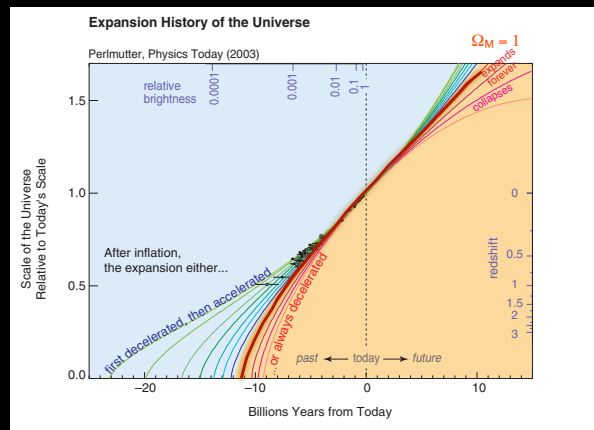
Risultati indicano una
espansione accelerata



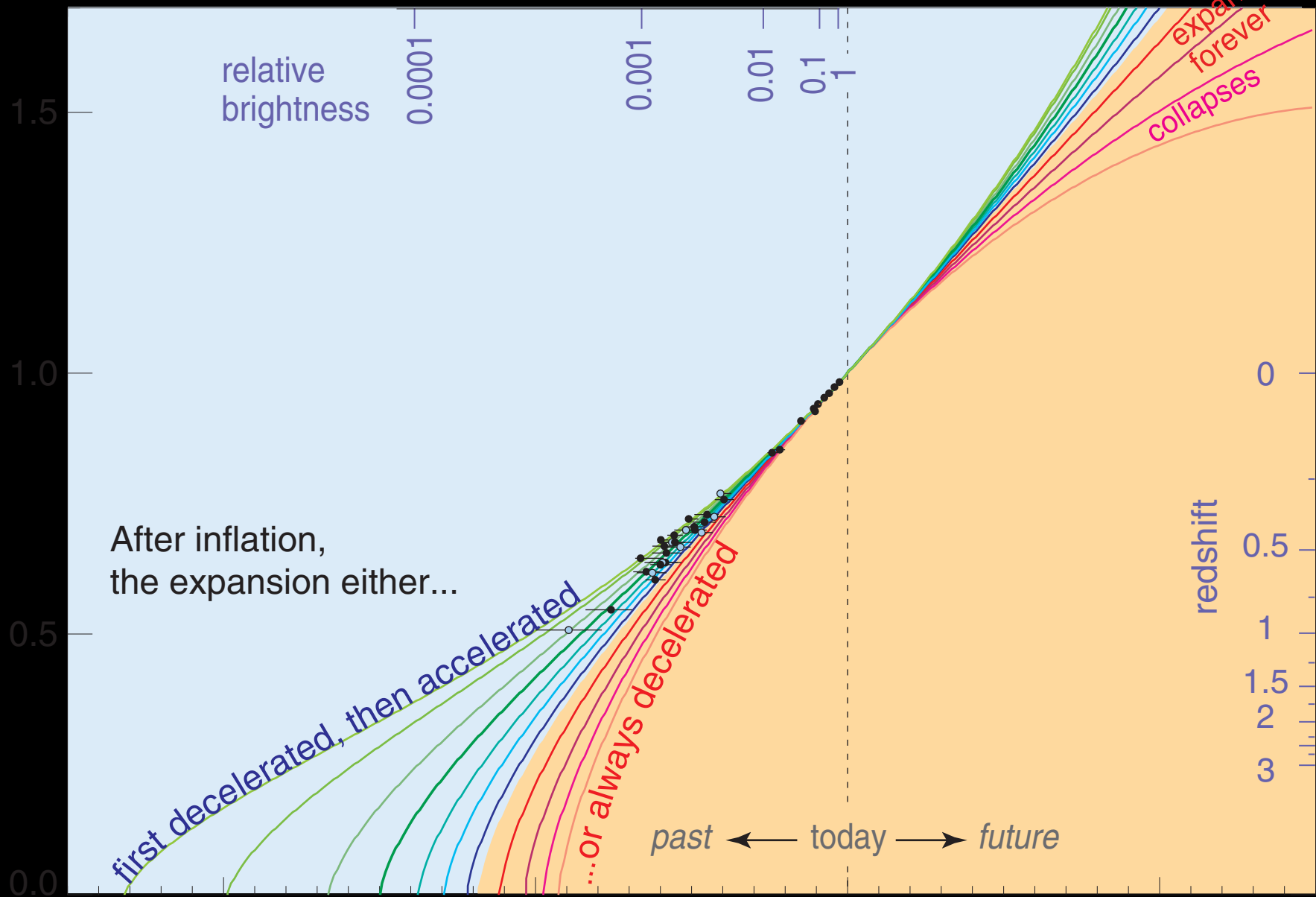
Separazione
relativa R



Nobel 2011 a
S. Perlmutter, B. Schmidt
e A. Riess



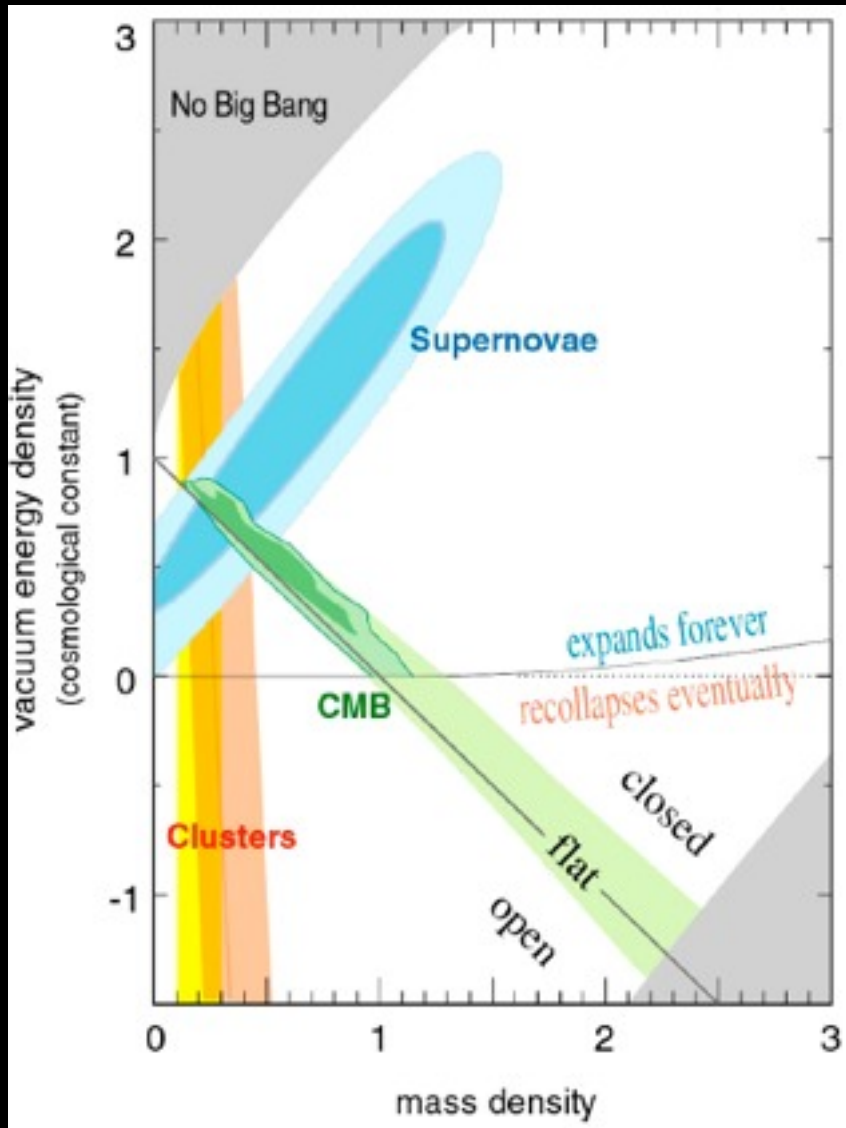
L'Universo e' in fase di espansione accelerata
Qualsiasi gas di particelle produce una decelerazione
 $\Omega_{En.Vuoto} = 0.7$



L'Universo e' in fase di espansione accelerata

$$\Omega_{\text{En.Vuoto}} = 0.7$$

“Concordance Cosmology”



Geometria
Universo
Fondo Cosmico
(CMB)

Abbondanza
Ammassi
Galassie

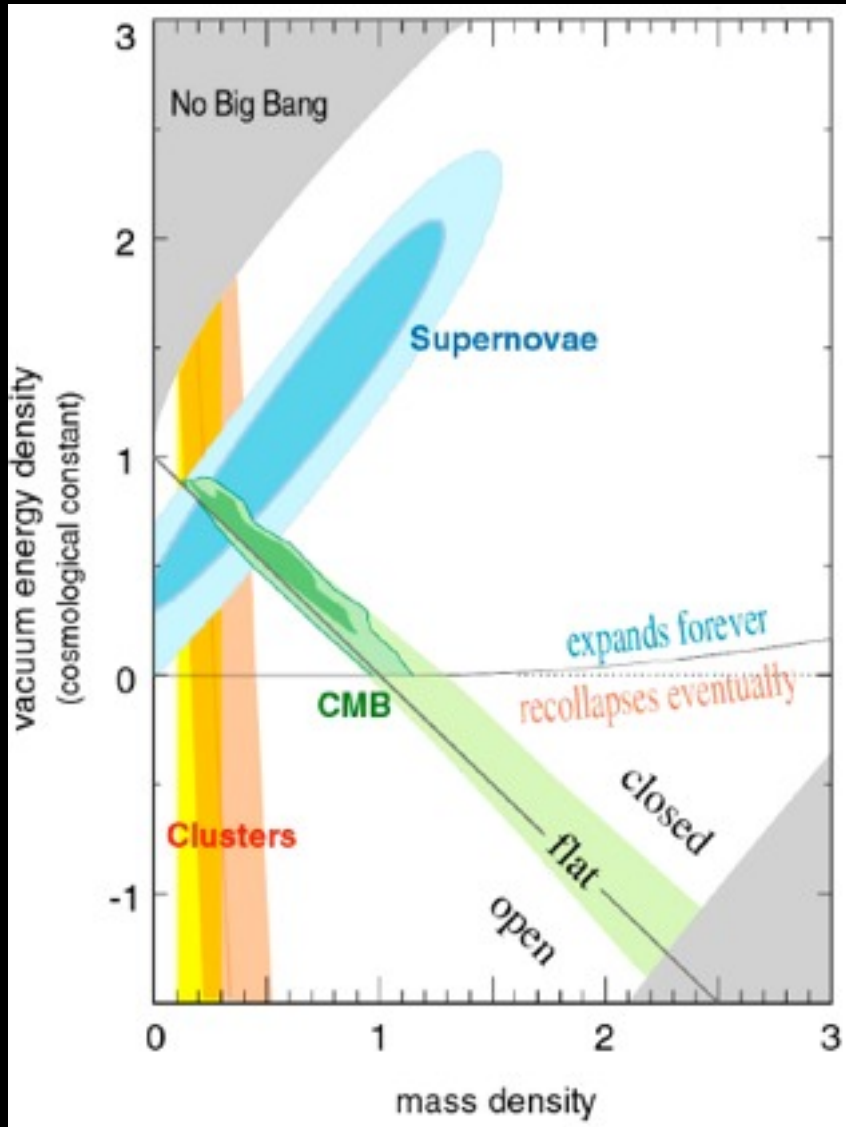
Espansione
Accelerata:
Supernovae Ia

0.3

0.7

Ω_Λ

“Concordance Cosmology”



Geometria
Universo
Fondo Cosmico
(CMB)

Abbondanza
Ammassi
Galassie

Espansione
Accelerata:
Supernovae Ia

0.3

0.7

$$1 = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

EVIDENZE PER CONTRIBUTO DOMINANTE DI MATERIA OSCURA



- Curve di Rotazione delle galassie
- Velocita' delle Galassie in Ammassi
- Temperatura Gas in Ammassi di Galassie
- Lenti Gravitazionali
- Fondo Cosmico di Micro-onde
- Struttura su Grande Scala e Formazione delle Galassie

$$\Omega_{DM}=0.25$$
$$\Omega_{barioni}=0.04$$

Il contenuto di materia dell'Universo e' dominato da materia oscura
NON costituita dal tipo di particelle che compongono la materia
"ordinaria" (protoni, neutroni, elettroni):

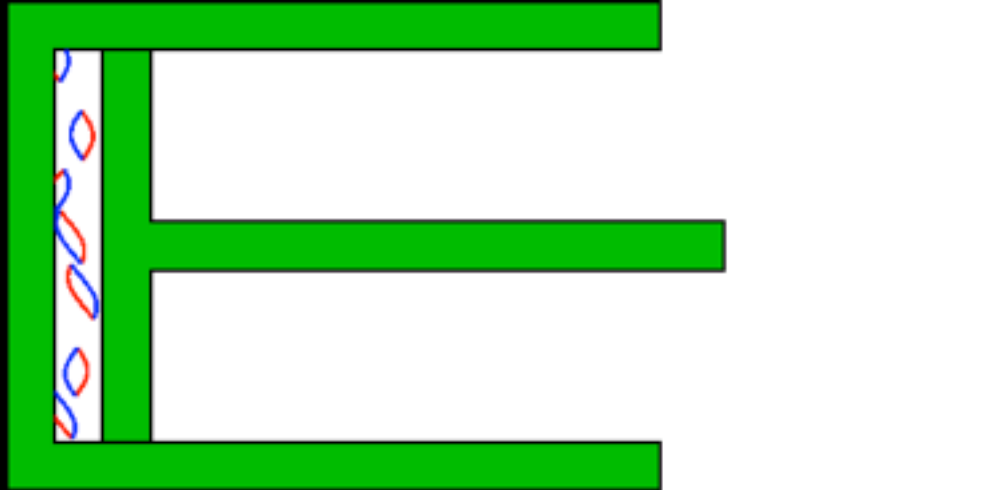
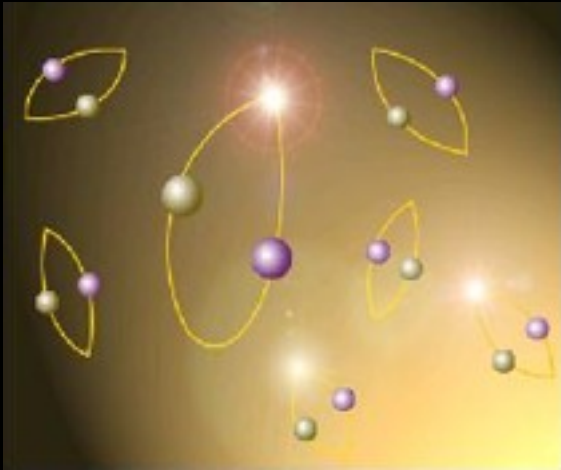
OLTRE IL MODELLO STANDARD delle particelle elementari

Tutte le estensioni del MODELLO STANDARD delle particelle elementari
predicono l'esistenza di particelle con queste proprieta'

- Possibilita' di trovarle in laboratorio (LHC)
- Discriminare tra varie teorie ?

Accelerazione dell'Espansione: la spiegazione piu' diretta e' in termini di en. del vuoto (Dark Energy)

$$\rho_{\Lambda} = \Omega_{\Lambda} \rho_c \simeq 2 \times 10^{-10} \text{ erg cm}^{-3} \simeq 2 \times 10^{-47} \text{ GeV}^4$$



Una energia del vuoto produce una pressione negativa (cio' che occorre per una espansione accelerata)

Problema: la energia del vuoto “aspettata” dalla teoria quantistica dei campi e' 10^{120} volte piu' grande di quella che corrisponderebbe alla accelerazione osservata:

Una eventuale cancellazione dovuta al bilanciamento tra i contributi dei vari campi quantistici richiederebbe un grado di aggiustamento “miracoloso”

Scenario Favorito: Cold Dark Matter

La materia oscura e' costituita da particelle massive debolmente interagenti,
non relativistiche:

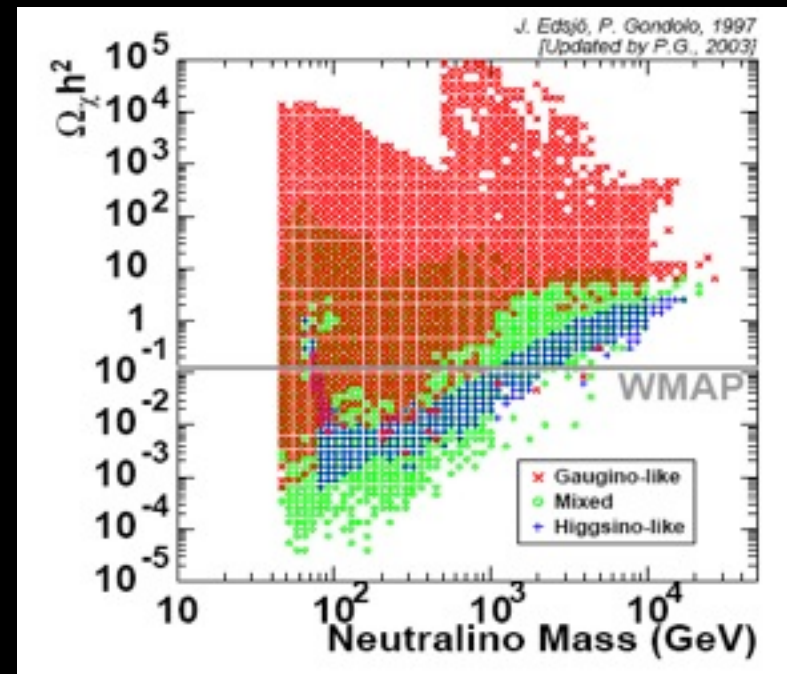
masse ordine 1 GeV - 10 TeV

Diversi candidati sono proposti da diverse estensioni del Modello Standard

Es. Supersimmetria: la particella piu' leggera e' stabile

Es. Il neutralino (superpartner di bosoni di gauge e campi di Higgs neutri) puo costituire l'intera componente di DM.

Le predizioni per Ω_χ per vari modelli SUSY (e quindi varie masse m_χ) sono compatibili con i limiti della concordance cosmology ($\Omega_0 \approx 0.25$).



neutrini solari:

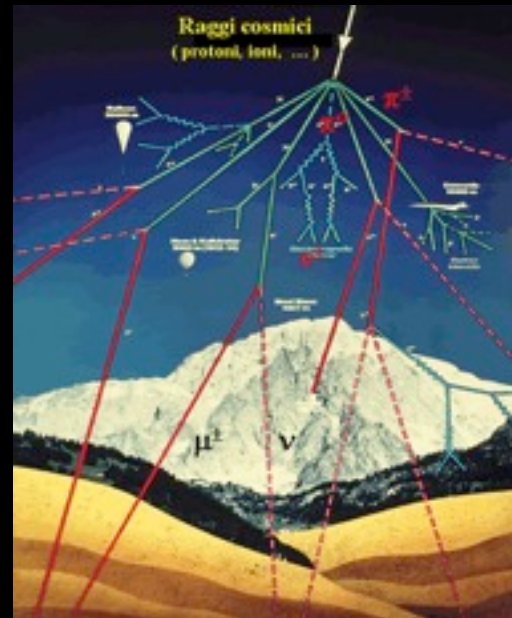
deficit di ν_e provenienti dal Sole
attribuiti a oscillazioni $\nu_e - \nu_\mu$



Neutrini atmosferici:

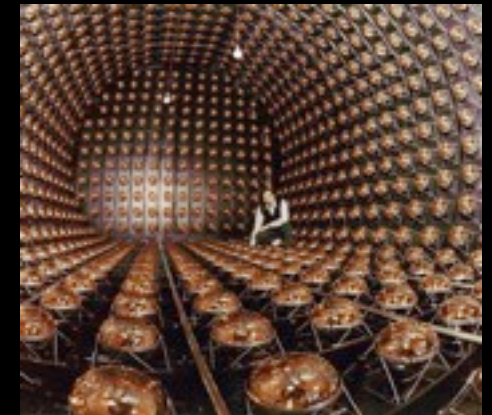
deficit di ν_μ derivanti da sciame di raggi cosmici: attribuito a oscillazione $\nu_\mu - \nu_\tau$

Asimmetria tra numero neutrini provenienti dall'alto e quelli provenienti dal basso



Neutrini provenienti da reattore o acceleratore

KamLAND (Giappone): 1000 tonnellate di olio
LNSD (Los Alamos USA): neutrini da acceleratore



Differenze di massa tra i vari stati $\lesssim 10^{-3}$ eV

Sulla origine di questo tipo di masse vi sono diverse ipotesi, tutte contenenti estensioni del modello standard: in alcuni casi si prevedono neutrini "pesanti" finora non osservati, che contribuirebbero a dare massa ai neutrini attraverso accoppiamento con campo di Higgs.

Siamo probabilmente alla vigilia di una rivoluzione nella nostra comprensione della fisica fondamentale

2 Modelli Standard ESTREMAMENTE in accordo con i dati ma che ASSUMONO valori "innaturali" per grandezze fondamentali, NON predette all'interno della teoria

Cio' indica che entrambe i Modelli Standard sono la manifestazione di una teoria piu' fondamentale

SE la Dark Energy e' logata alla energia del vuoto, poiche' questa e' un fenomeno quantistico che diventa manifesto quando si accoppia alla gravita', la futura teoria fondamentale deve includere Gravita' e Meccanica Quantistica

POSSIBILI SCENARI

1) La gravita' diventa quantistica alla scala di energia di Plank (10^{16} TeV). Non direttamente sondabile da LHC, ma le proposte per tali teorie (es. stringhe) sono basate in genere su Supersimmetria (o alternative), che dovrebbe manifestarsi alle energie di LHC

2) La gravita' diventa quantistica a scale sondabili da LHC (scenari con Extra-Dimensioni). Effetti misurabili (interazioni con energia mancante..)

3) La accelerazione dell'Universo non e' dovuta ad energia del vuoto: modifiche essenziali al Modello Standard Cosmologico

4) Principio Antropico ...

NASA JPL

Specchio Pri

→ EUROPEAN SPACE AGENCY

ABOUT SCIENCE & TECHNOLOGY

FOR PUBLIC

euclid

ESA

SCIENCE & TECHNOLOGY

EUCLID

Missions

Show All Missions

Mission Home

Mission Status

Science

Science

Spacecraft

Spacecraft

Mission Operations

Mission Operations

Resources

News Archive

Multimedia Gallery

Publication Archive

MISSION SUMMARY

Euclid	
Mapping the geometry of the dark Universe	
Theme	How did the Universe originate and what is it made of?
Primary Goal	To understand the nature of dark energy and dark matter by accurate measurement of the accelerated expansion of the Universe through different independent methods.
Targets	Galaxies and clusters of galaxies out to $z \sim 2$, in a wide extragalactic survey covering 15 000 deg ² , plus a deep survey covering an area of 40 deg ²
Wavelength	Visible and near-infrared
Telescope	1.2 m Korsch
Orbit	Second Sun-Earth Lagrange point, L2
Lifetime	6 years
Type	M-class mission

ESO Extremely Large Telescope (ELT)

Specchio Primario 40 m



La Cosmologia puo' fornire ulteriori vincoli al tipo di
particelle
che costituiscono la Materia Oscura

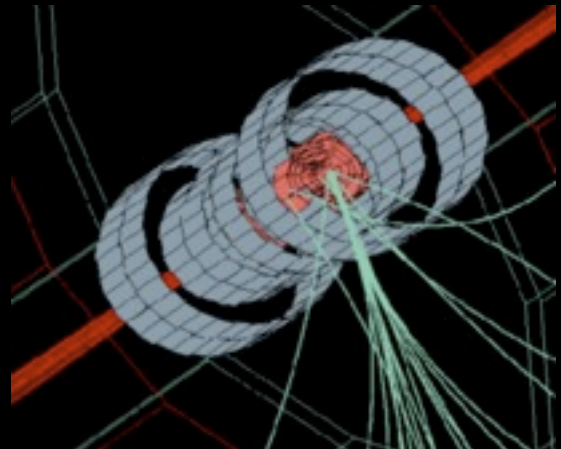
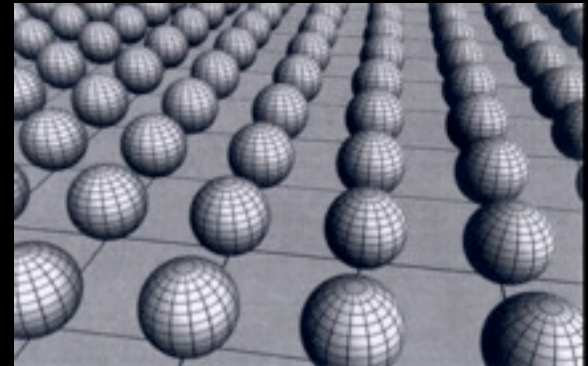
Es. Neutrini massivi. evidenze osservative di oscillazioni
tra stati diversi: sono possibili solo se i neutrini hanno
masse con differenze tra i vari stati dell'ordine di 10^{-3} eV

Particelle di Kaluza-Klein potrebbero essere candidati alla DM

Ipotesi: esistono dimensioni aggiuntive. Lo spazio ha 3 dimensioni (quelle che percepiamo) + dimensioni aggiuntive (estremamente “arrotolate”).

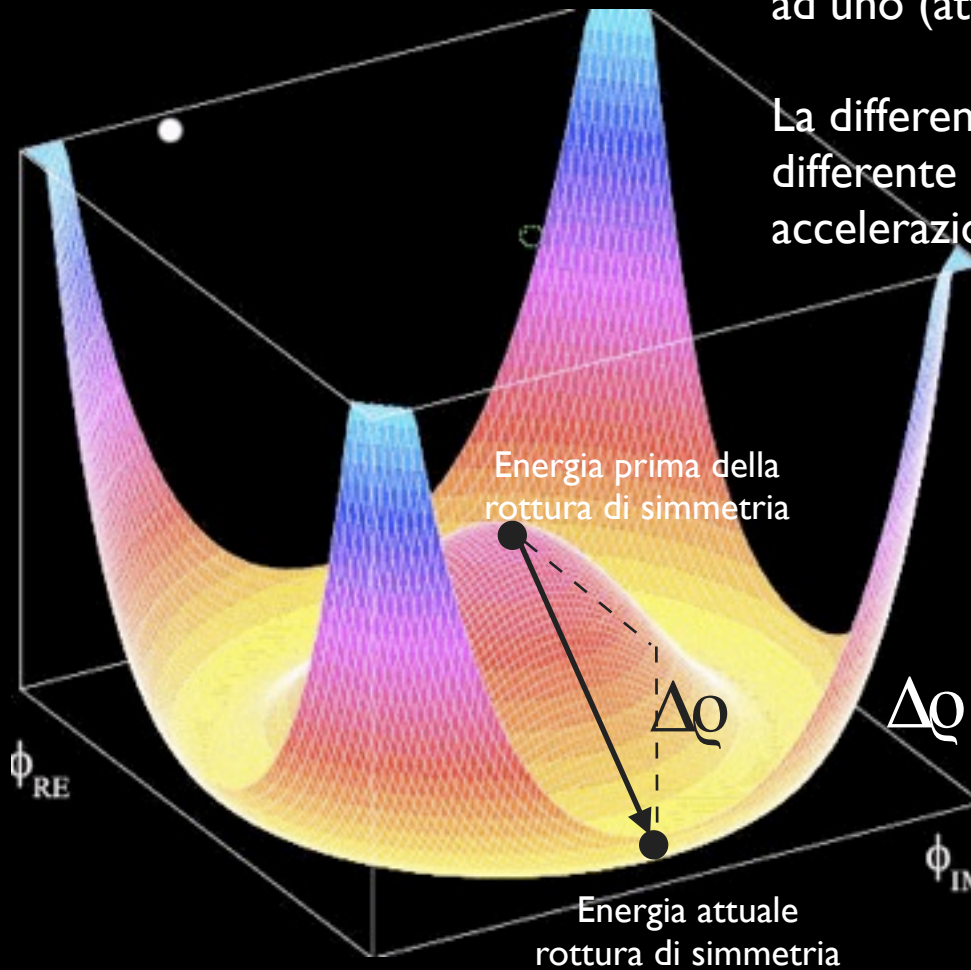
Le particelle che conosciamo possono entrare in queste dimensioni alternative, dove sono in grado di muoversi a differenti velocità. L'energia del movimento in queste dimensioni parallele si manifesta come massa. Quindi un (p.es.) elettrone che si muovesse in una dimensione “più alta”, apparirebbe nella nostra come una particella di Kaluza-Klein, cioè una particella ordinaria (un elettrone nell'esempio) ma molto più pesante.

Se le extra-dimensioni sono abbastanza “grandi (0.001 mm) la gravità potrebbe divenire abbastanza forte da manifestarsi negli acceleratori. Particelle KK dei gravitoni potrebbero apparire ad LHC come una energia mancante



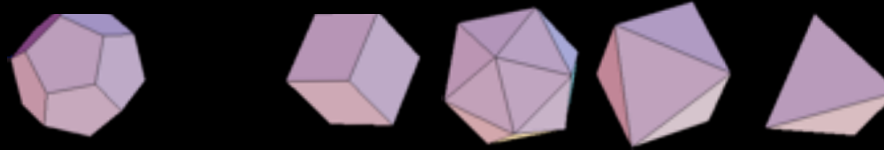
Il modello standard delle particelle prevede un campo di Higgs Φ diverso da 0 nel vuoto. Cio' si realizza attraverso la transizione da uno stato di vuoto originale ad uno (attuale) di diversa energia:

La differenza di energia tra i due stati e' enormemente differente dalla densita' del vuoto corrispondente alla accelerazione dell'Universo.



$$\Delta Q = 10^{49} \text{ erg/cm}^3 = 10^{59} \rho_\Lambda$$

“Quintessenza”



Alternativamente, si e' ipotizzato che l'energia del vuoto non si accoppi alla gravita' (a causa di un principio di simmetria ancora ignoto)

La Dark Energy puo' essere un fenomeno transiente che risulta dal potenziale di un campo scalare (diverso dal campo di Higgs).

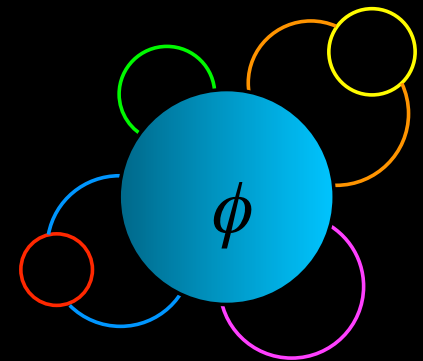
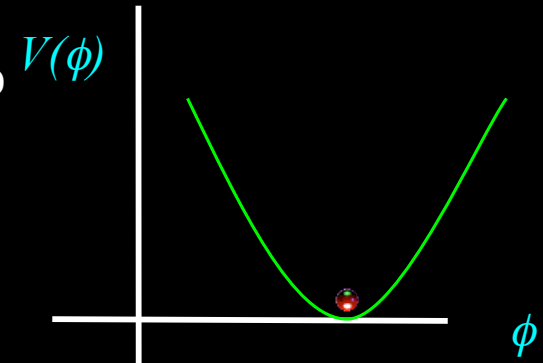
La aggiunta di energia potenziale del campo generata dall'espansione ha lo stesso effetto dell'energia del vuoto

Richiede: $m_\phi \approx 10^{-33} \text{ eV} \approx 10^{-60} M_{Pl}$

Massa della particella associata al campo estremamente piccola

(altrimenti il campo evolve rapidamente verso il fondo del potenziale). Il valore richiesto e' incredibilmente piccolo

L'effetto collettivo delle particelle virtuali e' di aumentare la massa della particella. Ottenere la massa richiesta richiede una incredibile compensazione dei contributi delle particelle virtuali



Siamo probabilmente alla vigilia di una rivoluzione nella nostra comprensione della fisica fondamentale

2 Modelli Standard ESTREMAMENTE in accordo con i dati ma che ASSUMONO valori “innaturali” per grandezze fondamentali, NON predette all’interno della teoria

Cio’ indica che entrambe i Modelli Standard sono la manifestazione di una teoria piu’ fondamentale

SE la Dark Energy e’ logata alla energia del vuoto, poiche’ questa e’ un fenomeno quantistico che diventa manifesto quando si accoppia alla gravita’, la futura teoria fondamentale deve includere Gravita’ e Meccanica Quantistica

POSSIBILI SCENARI

1) La gravita’ diventa quantistica alla scala di energia di Plank (10^{16} TeV). Non direttamente sondabile da LHC, ma le proposte per tali teorie (es. stringhe) sono basate in genere su Supersimmetria (o alternative), che dovrebbe manifestarsi alle energie di LHC

2) La gravita’ diventa quantistica a scale sondabili da LHC (scenari con Extra-Dimensioni). Effetti misurabili (interazioni con energia mancante..)

*3) La accelerazione dell’Universo non e’ dovuta ad energia del vuoto:
modifiche essenziali al Modello Standard Cosmologico*

4) Principio Antropico ...



Dryden Flight Research Center EC94-42816-2 '94 Photo
Hubble Space Telescope STS-61





VLT at Paranal

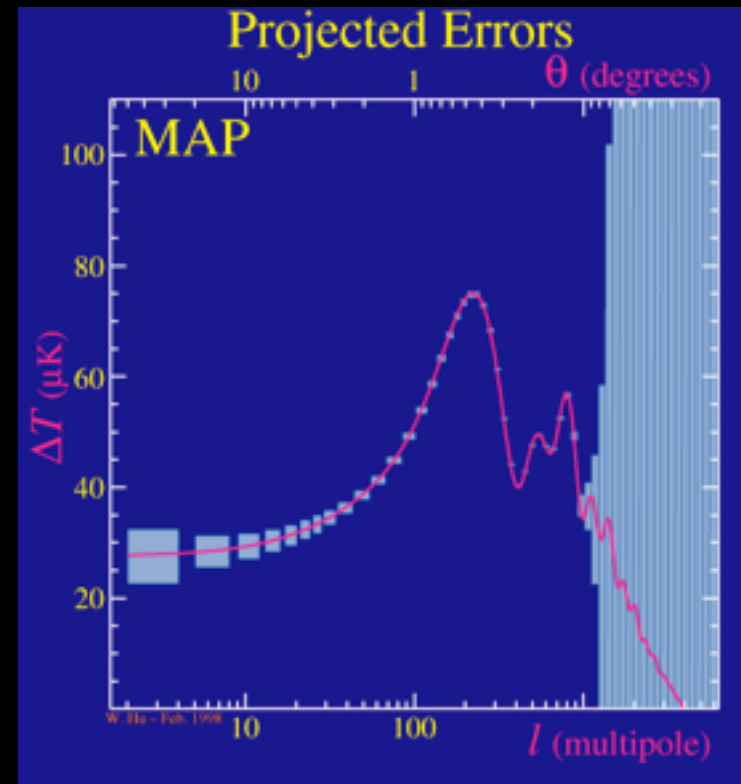
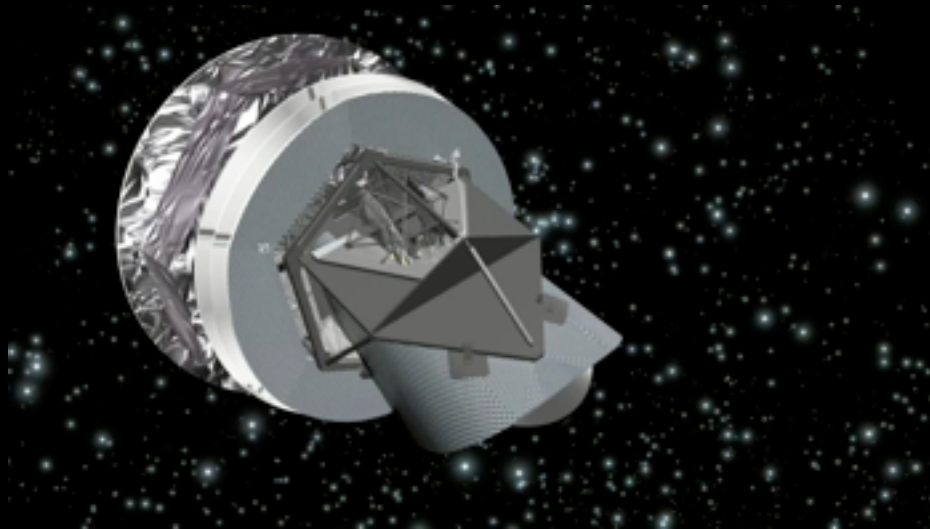
ESO PR Photo 43a/99 (8 December 1999)

© European Southern Observatory



La Missione Plank (ESA)

*Misure con accuratezza senza precedenti
del fondo cosmico a microonde
Caratterizzare Dark Energy
(en. vuoto o campo quantistico)*



ESO Extremely Large Telescope (ELT)

Specchio Primario 42 m



NASA JWST (Space Telescope)

Specchio Primario 6.5 m

