

Cosmologia

Nicola Menci

INAF - Osservatorio Astronomico di Roma

Cosmologia

Studio dell'Universo nel suo insieme

Quanto e' grande

Quale e' il suo futuro e il suo passato

Quali sono i processi guidano la sua evoluzione

Quale e' l'origine delle strutture cosmiche

La storia della cosmologia moderna inizia con la comprensione della nostra galassia e della sue relazione con il resto dell'Universo



Galileo *Sidereus Nuncius*

«Ma oltre alle stelle di sesta grandezza si vedrà col cannocchiale un così gran numero di altre, invisibili alla vista naturale, che appena è credibile: se ne possono vedere infatti più di quante ne comprendano le altre sei diverse grandezze...»

.«Quello che in terzo luogo osservammo, è l'essenza o materia della via Lattea, la quale attraverso il cannocchiale si può vedere così chiaramente che tutte le discussioni per tanti secoli cruccio dei filosofi, si dissipano con la certezza della sensata esperienza, e noi siamo liberati da sterili dispute. La Galassia infatti non è altro che un ammasso di innumerabili stelle disseminate a mucchi, che in qualunque parte di essa si diriga il cannocchiale, si offre subito alla vista un grandissimo numero di stelle, parecchie delle quali si vedono grandi e ben distinte, mentre la moltitudine delle piccole è affatto inesplorabile.»

Dante Alighieri *Convivio*
attribuisce ad Aristotele l'intuizione che

«la Galassia non è altro che moltitudine di stelle fisse in quella parte tanto picciole che distinguer di quaggiù non le potemo; ma di loro apparisce quello albore, il quale noi chiamiamo Galassia»



H. Shapley



H. Curtis

Riteneva questi oggetti fossero Universi Isola (come li chiamava Kant)
cioè galassie esterne alla Via Lattea

LA NATURA DELLE GALASSIE

1750 ca. Ipotesi di Kant sugli "universi isole"

1800 ca. Catalogo di Charles Messier degli oggetti nebulari

1845 ca. William Parsons (lord Rosse) riconosce strutture a spirale in alcune nebulose utilizzando il telescopio Leviatano (1.8 m) in Irlanda

1850 ca. Catalogo di Sir John Herschel, figlio di William

1900 ca. New General Catalog di J.L.E. Dreyer con 8000 oggetti, in parte riconducibili a emissione da nebulose stellari, in parte di origine ignota

1912 V.M. Slipher conferma la presenza di strutture a spirale in alcune nebulose e vi riconosce uno spostamento Doppler delle righe spettrali

1920 Il Grande Dibattito tra H.D. Curtis e H. Shapley sulla natura delle nebulose (riunione del 26 aprile alla National Academy of Sciences, Washington D.C.)

- Curtis: natura extragalattica
- Shapley: natura galattica
- argomenti in parte inficiati dalle imprecisioni nei dati, ma utili per indicare le linee di ricerca

1922 Edwin Hubble con il 100 inch di Mt. Wilson risolve alcuni oggetti come aggregati di stelle

1923 Osservazioni di variabili Cefeidi in M31 (Andromeda) e la relazione periodo-luminosità predice distanze 100 volte superiori alle dimensioni della Galassia ricavate da Shapley (ca. 28 kpc)

1926 Hubble pubblica *The Realm of the Nebulae* e propone una classificazione morfologica delle galassie: ellittiche (E), spirali (S) e irregolari (Ir)



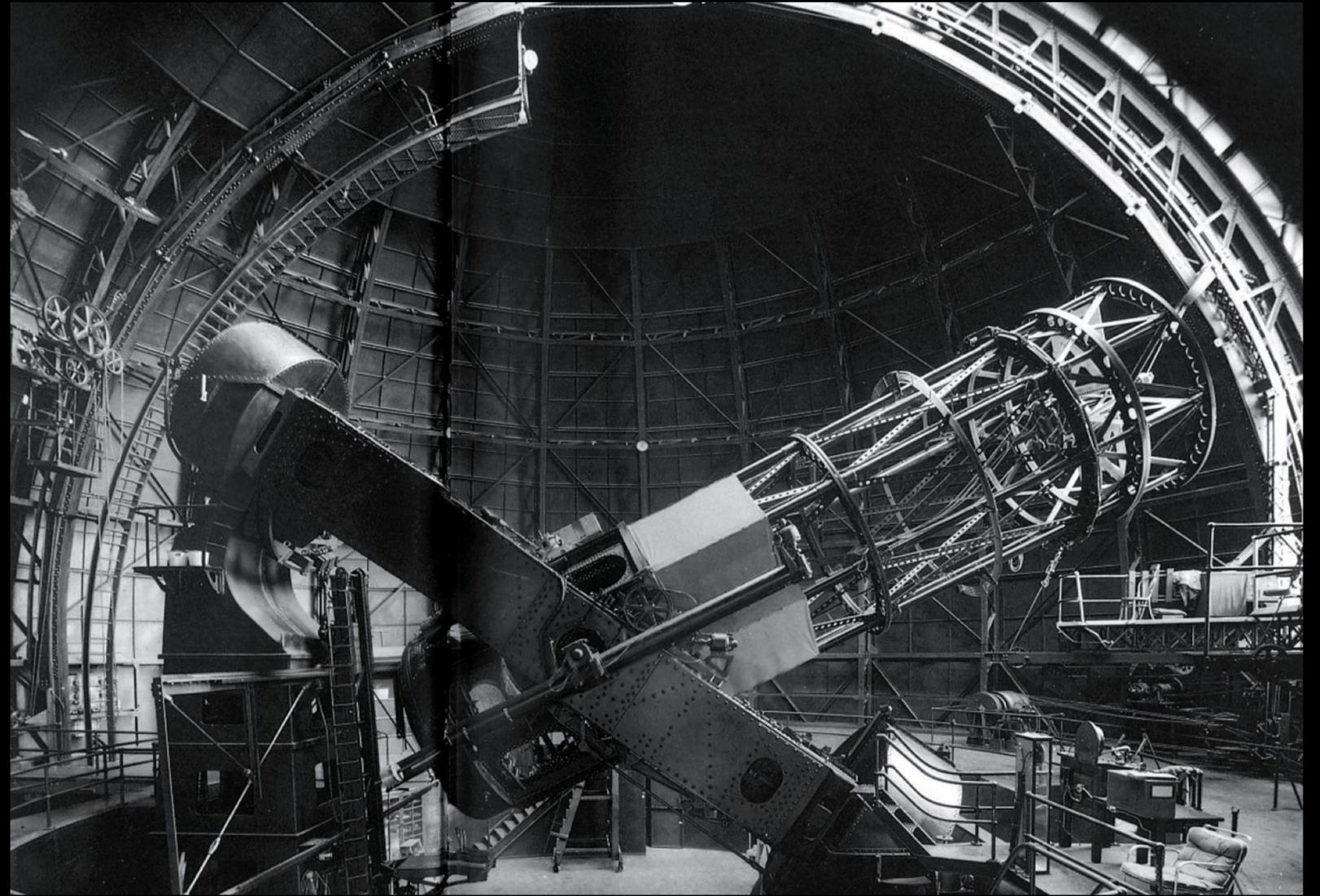
NATURA EXTRA-GALATTICA

**Hubbly nel 1926:
Identificò una Cefeide variabile in M31
con il telescopio da 2.5 m di Mount
Wilson**

**ha utilizzato la brillantezza apparente e la
relazione periodo-luminosità, calcolando
la distanza D di M31**

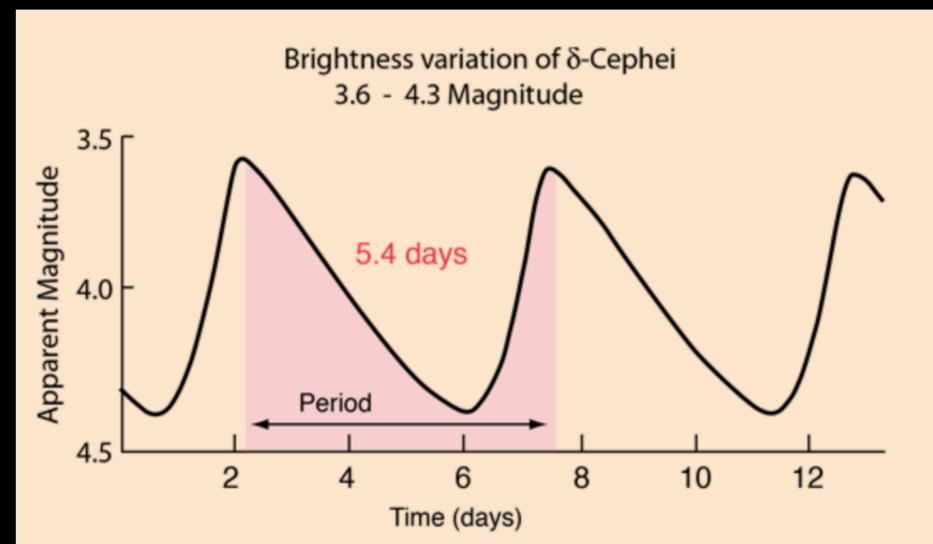
$$F = \frac{L}{4\pi D^2}$$

**$D = 2 \cdot 10^6$ LYs (...e M31 è solo la più
vicina!!!)**



2,5 metri di Mount Wilson

Edwin P. Hubble (1889-1953)





$D \approx 700$ kpc

La via Lattea e le Nubi di Magellano







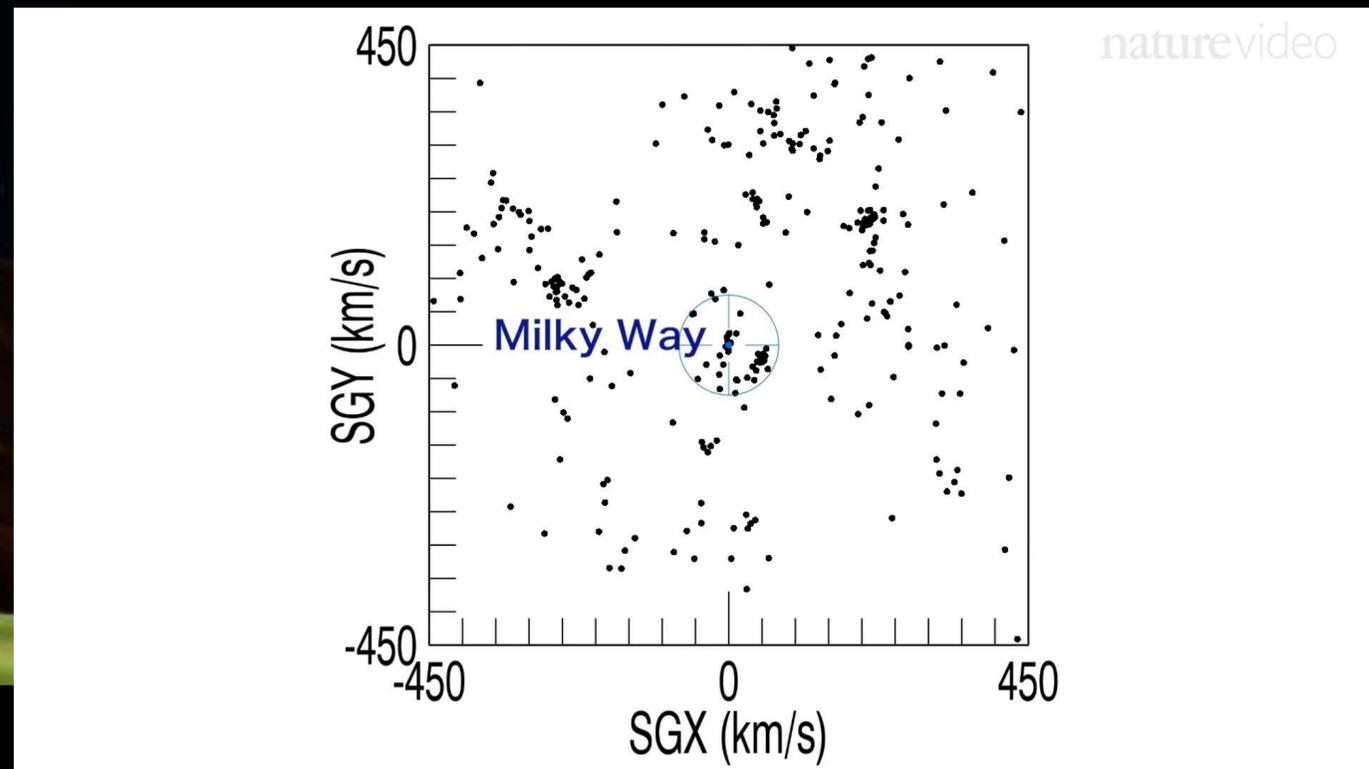
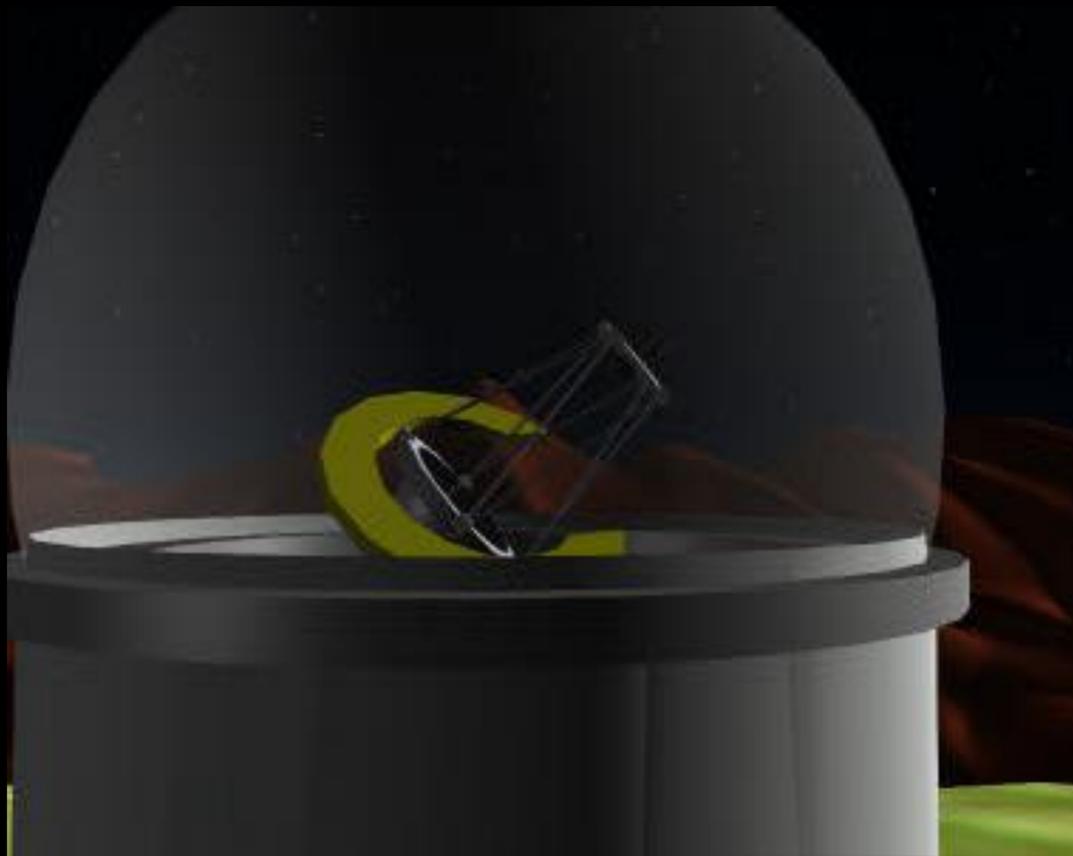
Proprieta' Osservative dell'Universo

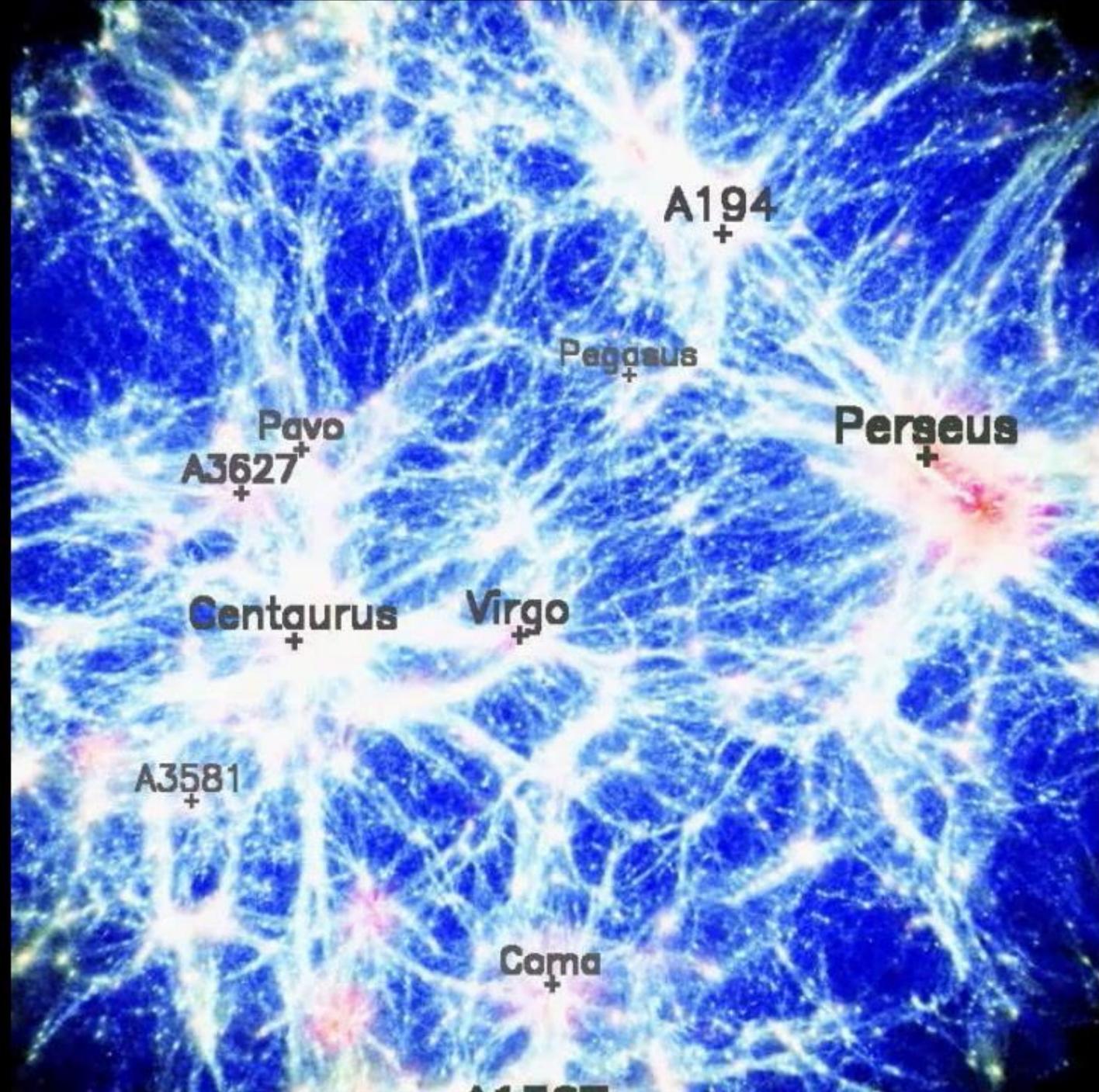
Proprieta' Osservative dell'Universo

1. Omogeneita' ed Isotropia

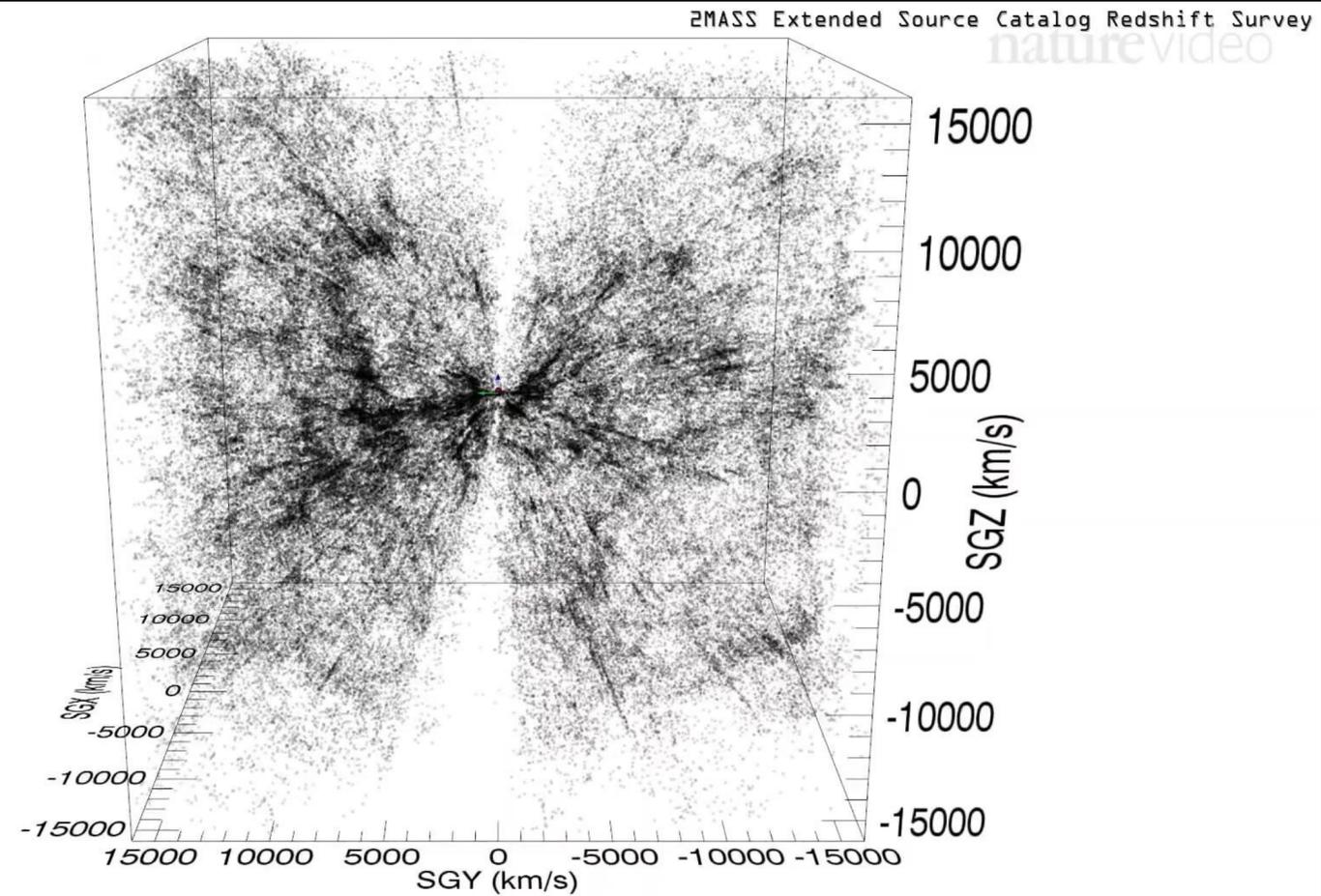
Survey of Galaxies Scale
si estende a una regione di circa 100 Mpc
gran numero di galassie
alle intersezioni dei filamenti ci sono
gruppi ed ammassi di galassie

2dF survey
~100000 galassie





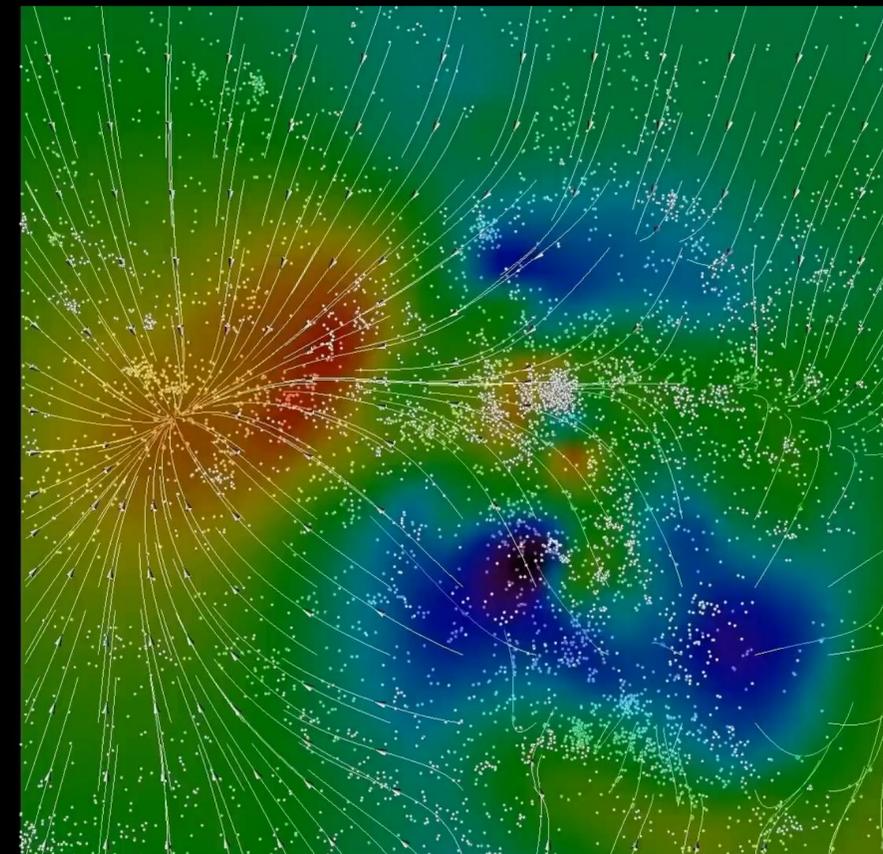
A1505



Nature video

Mediando su distanze molto grandi
le galassie si allontanano le une dalle altre.

Sovrapposto a questo moto globale ci sono moti
locali determinati dalla distribuzione di massa.



naturevideo

Dimensione Frattale della distribuzione di galassie

$N(h)$ = numero di celle di dimensione h necessarie per coprire distribuzione di punti

$$N(h) \sim \left(\frac{1}{h}\right)^D$$

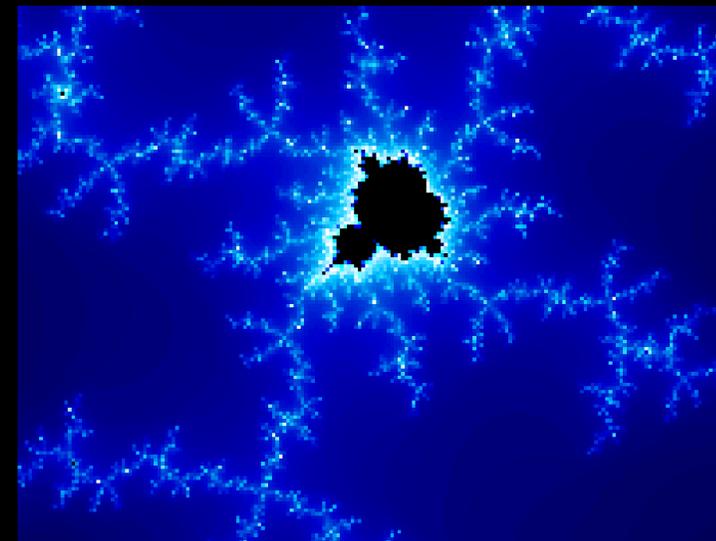
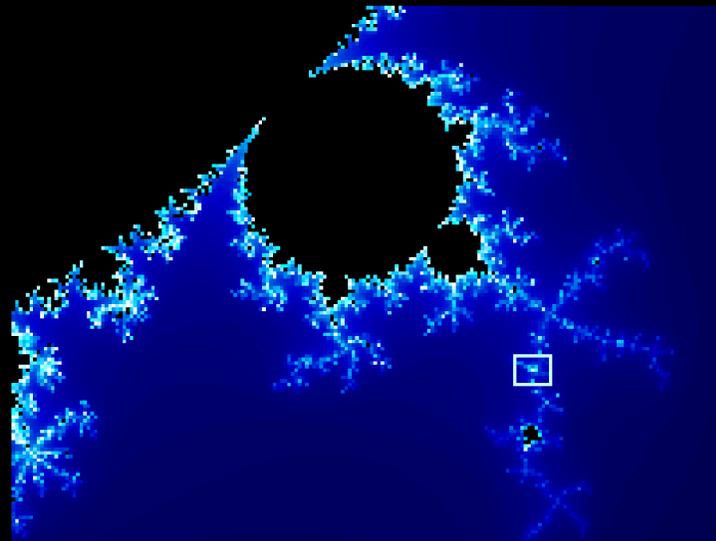
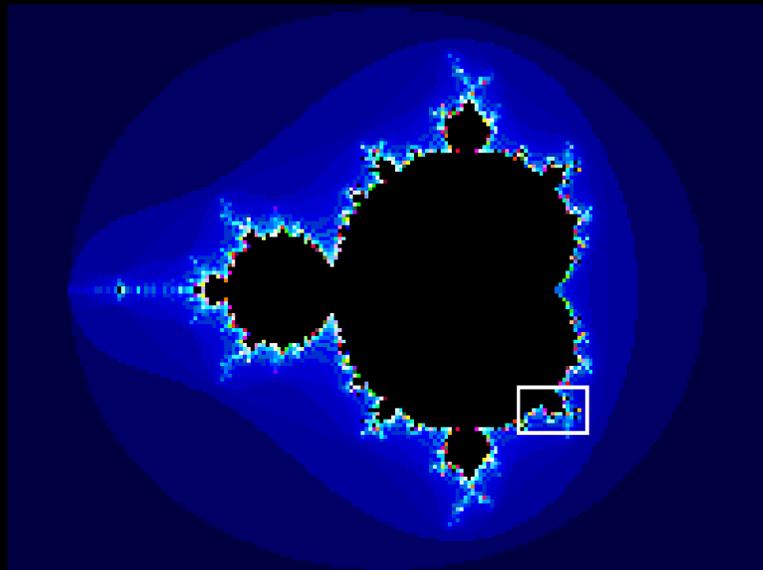
$$D = \lim_{h \rightarrow 0} \ln N(h) / \ln(1/h)$$



$$N(h) = 2^p \quad h = 3^{-p}$$

$$D(\text{Cantor}) = \ln 2^p / \ln 1/3^{(1-p)} = \ln 2 / \ln 3 = 0,6309$$

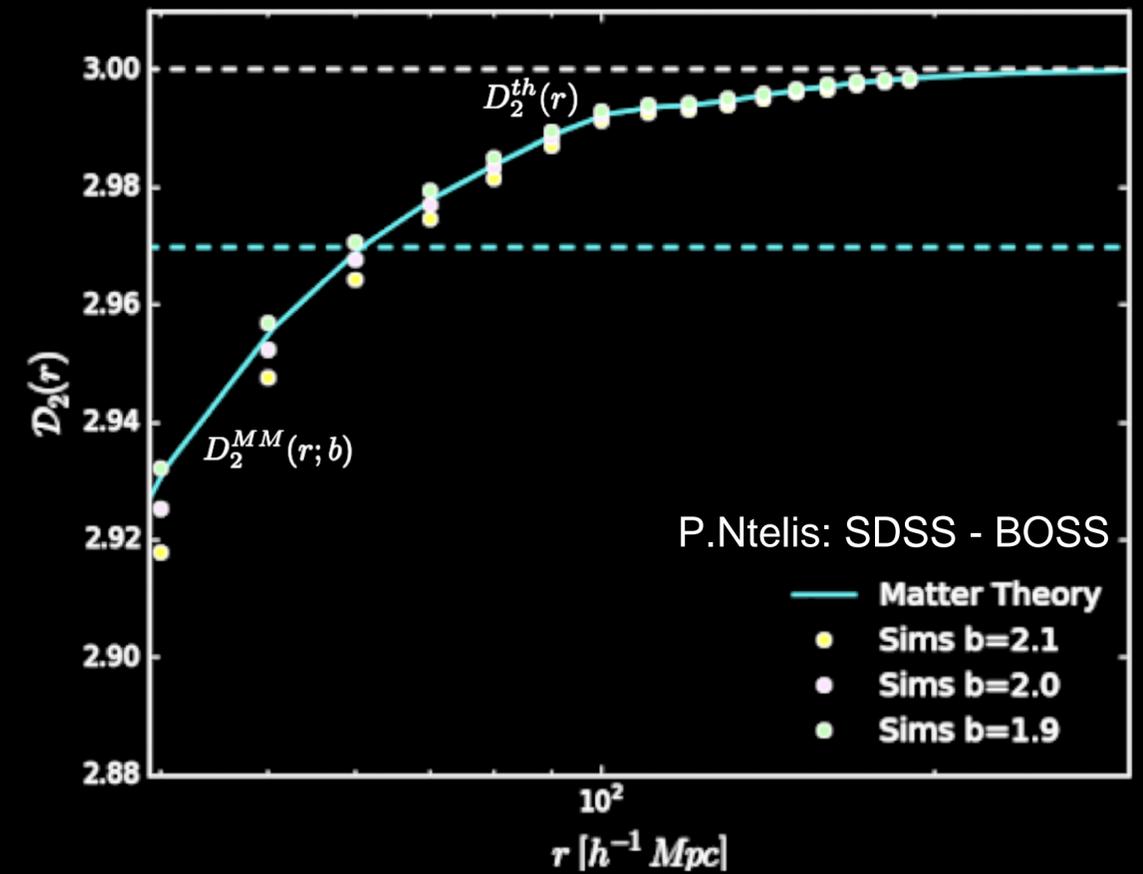
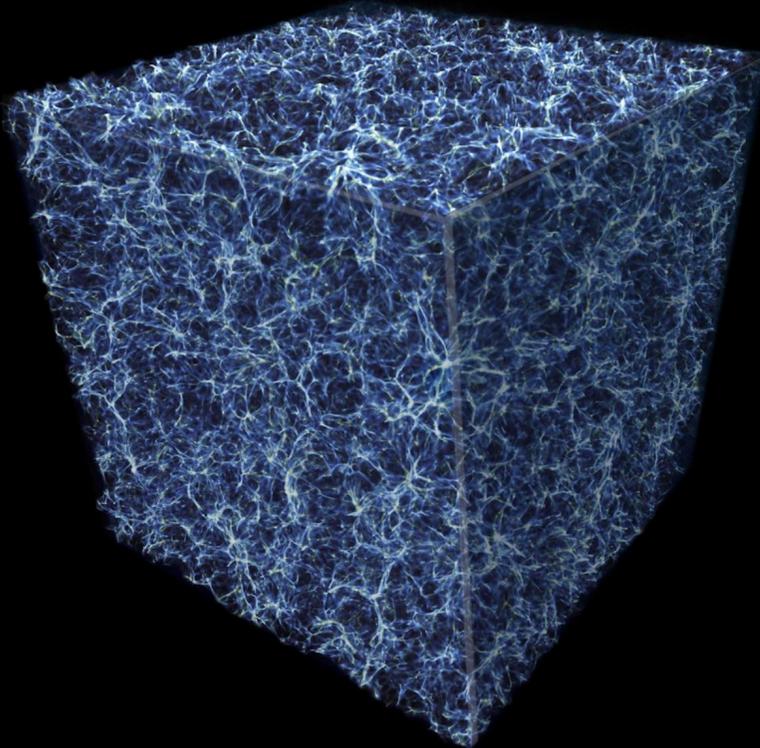
Una distribuzione frattale ha una densita' media che dipende dalla scala L



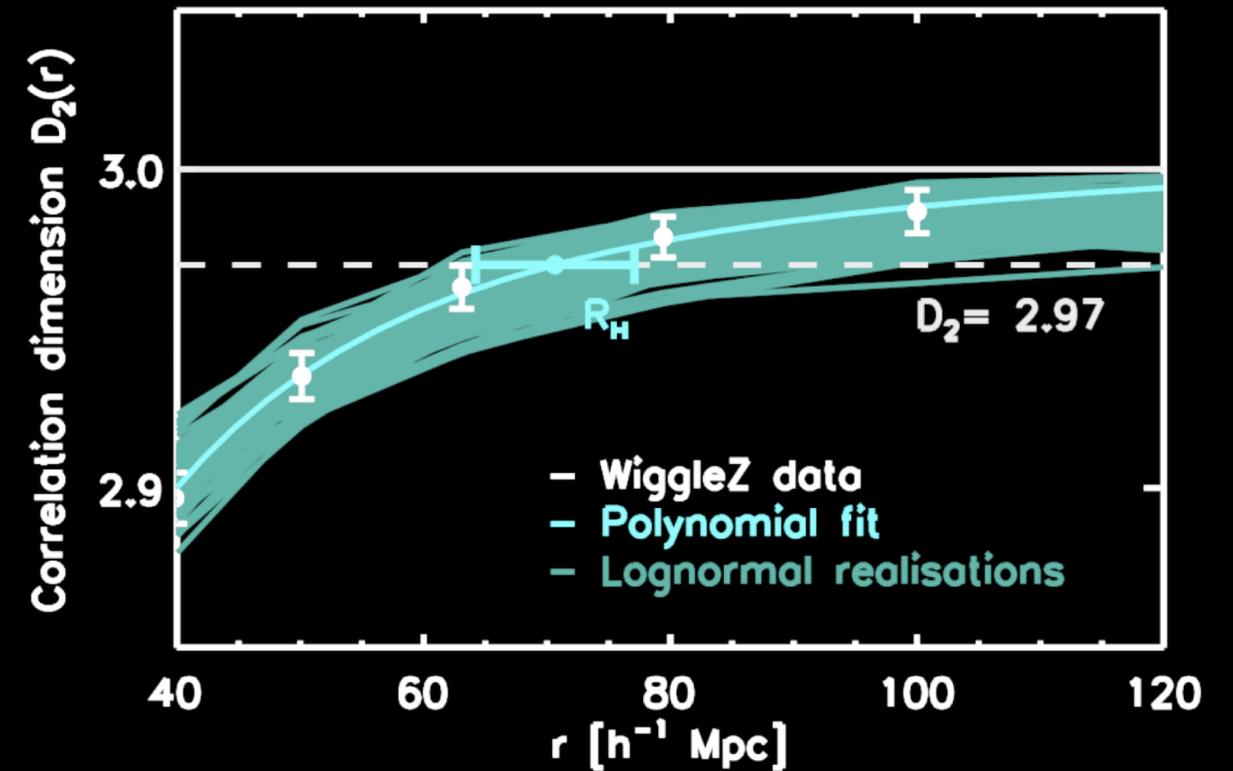
$N(h)$ = numero di celle di dimensione h necessarie per coprire distribuzione di punti

$$D = \lim_{h \rightarrow 0} \ln N(h) / \ln(1/h)$$

La omogeneita' e' raggiunta su scale $\gtrsim 100 Mpc$



WiggleZ spectroscopic survey of over 200000 galaxies in a cosmic volume of $\sim 1 h^{-3} Gpc^3$.



Proprieta' Osservative dell'Universo

2. Espansione dell' Universo

Legge di Hubble $v = H_0 r$



Hubble 1929

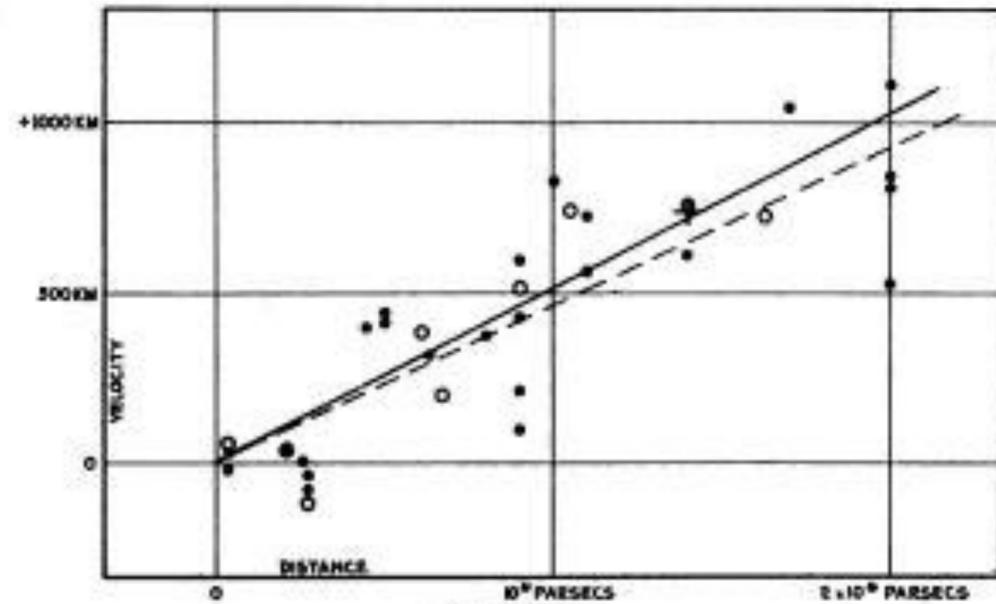
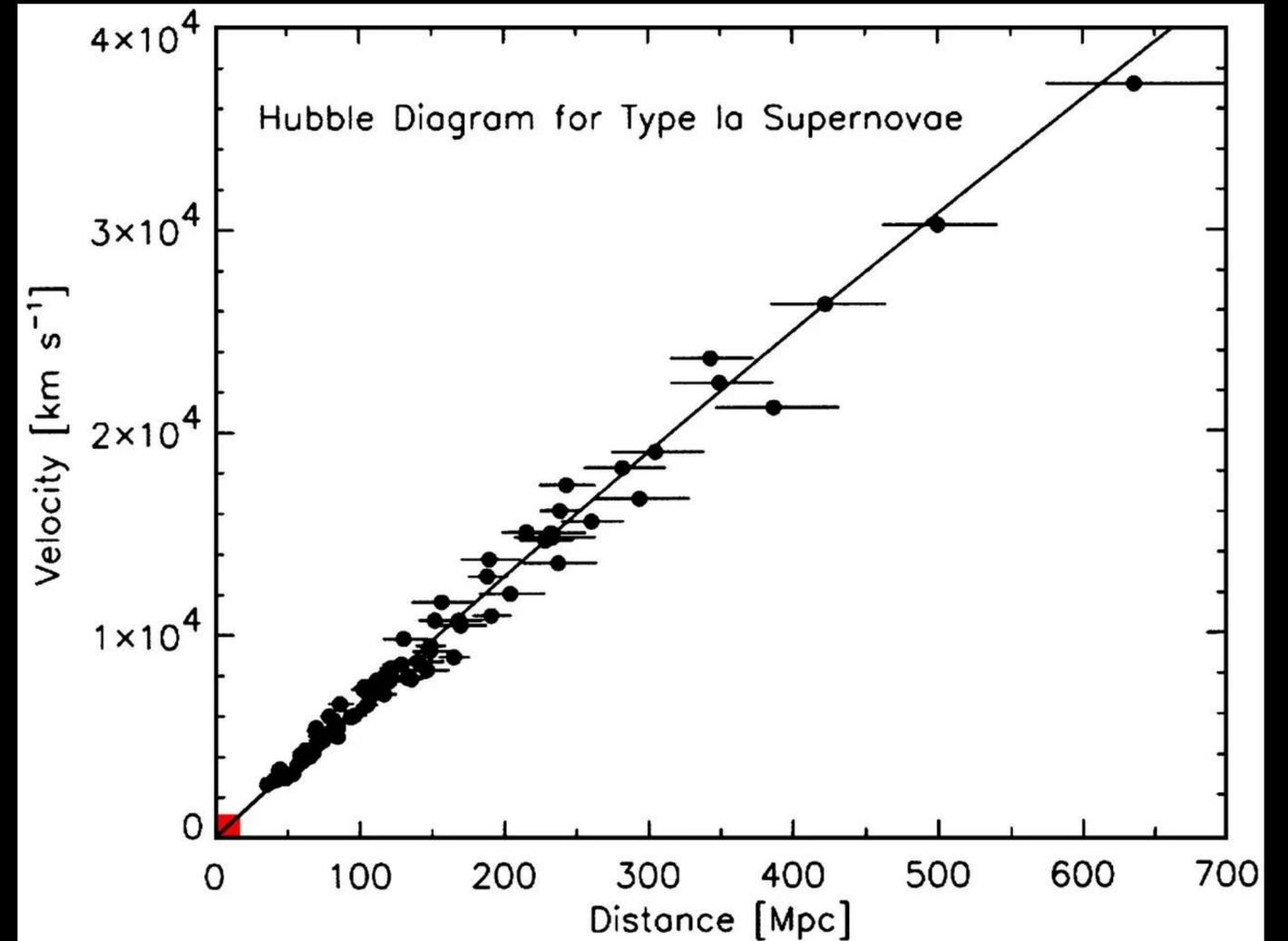


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

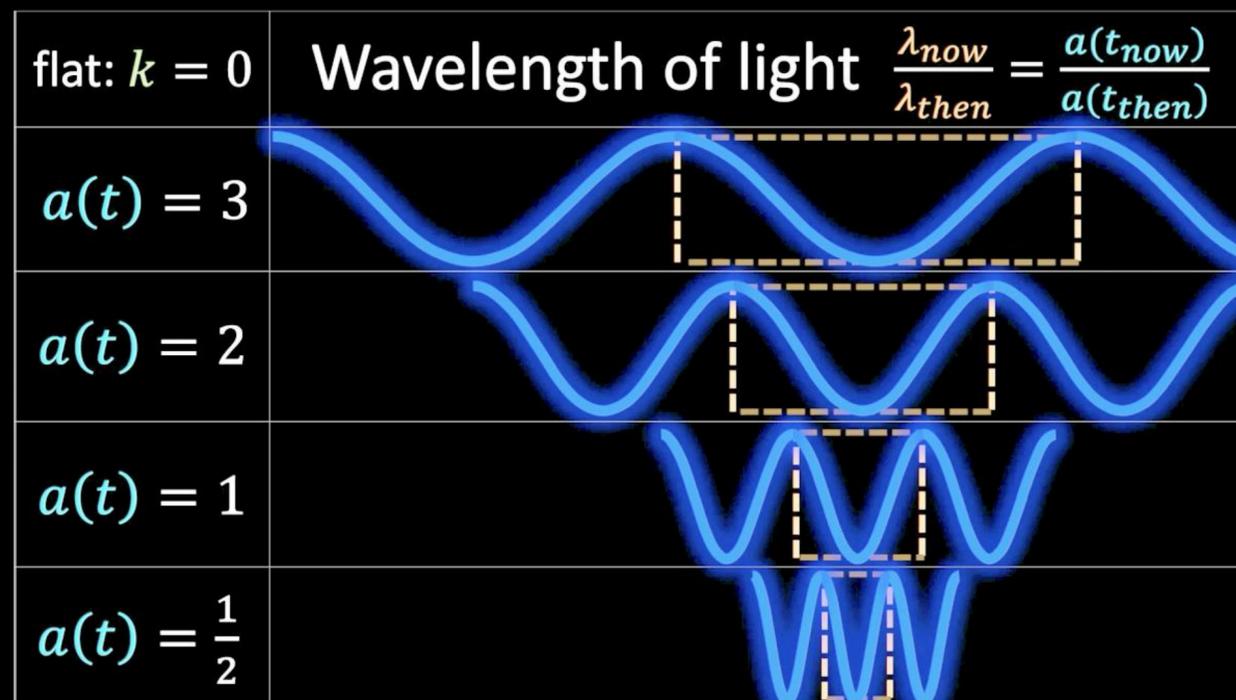
Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.



Misure piu' recenti da Supernovae Ia
 $H_0 \approx 73 \text{ kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$

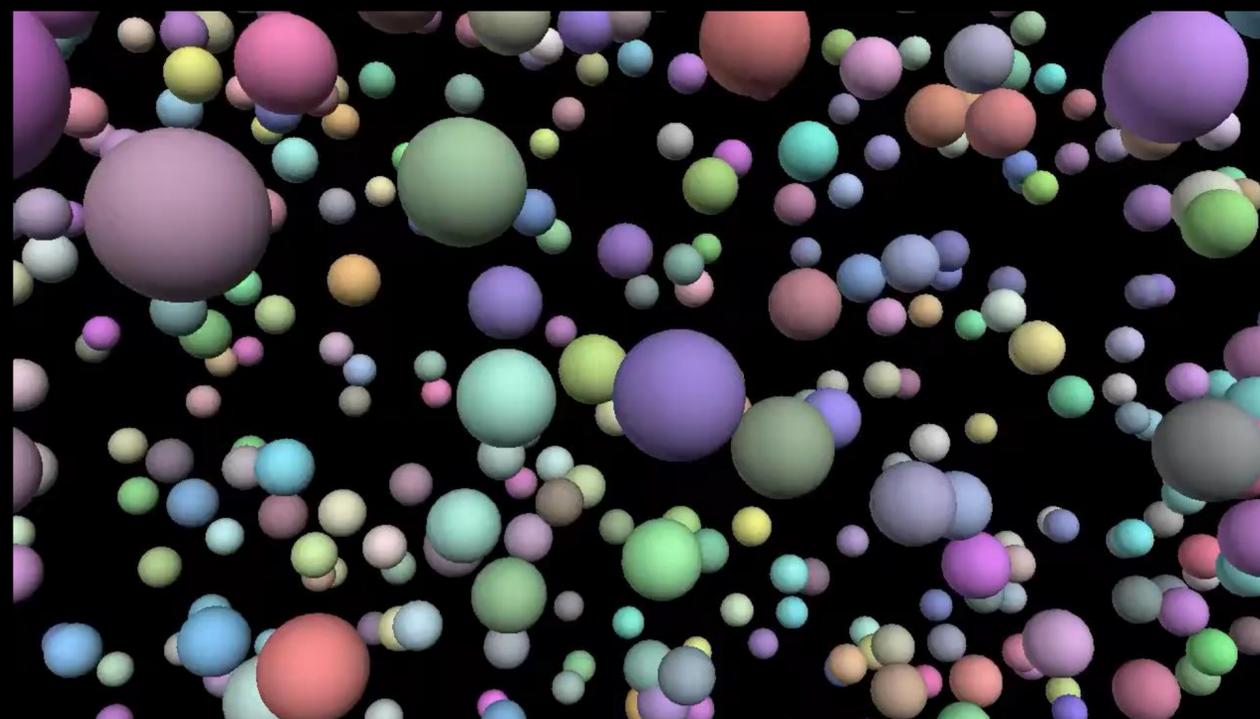
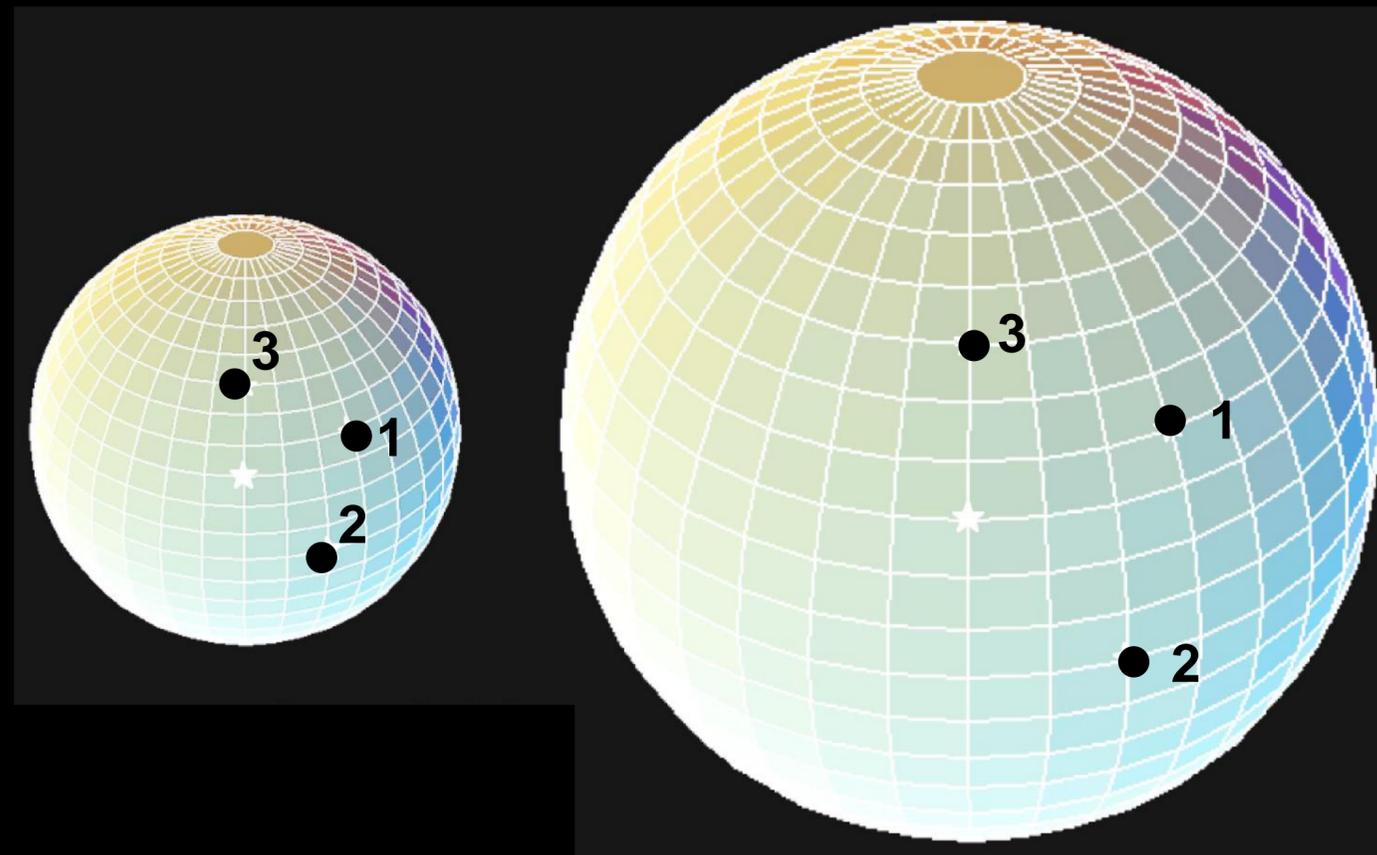
Legge di Hubble

Redshift: $z \equiv \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} \longrightarrow z = \frac{1}{a} - 1$



Legge di Hubble

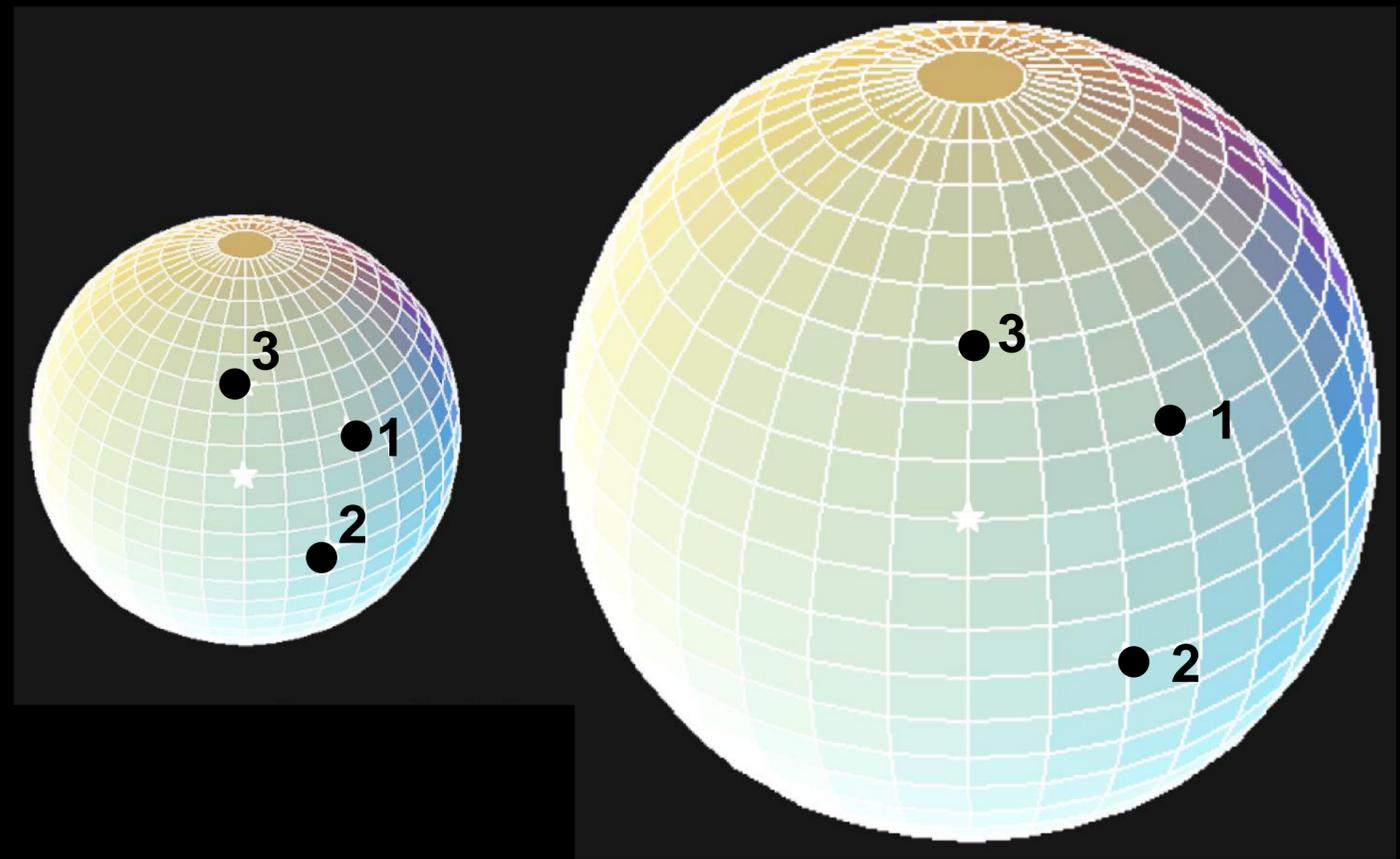
$z = \frac{H_0}{c} r$ Hubble interpreto' z come effetto Doppler
 non relativistico $z \approx v/c$ da cui $v = H_0 r$



$$z + 1 = \frac{1}{a}$$

$$v = Hr$$

E' consistente con un Universo in espansione omogenea ed isotropa. Consideriamo 3 punti con distanze relative r_{12} r_{23} r_{31}



Un osservatore in 1 vedra' le altre galassie allontanarsi con velocita'

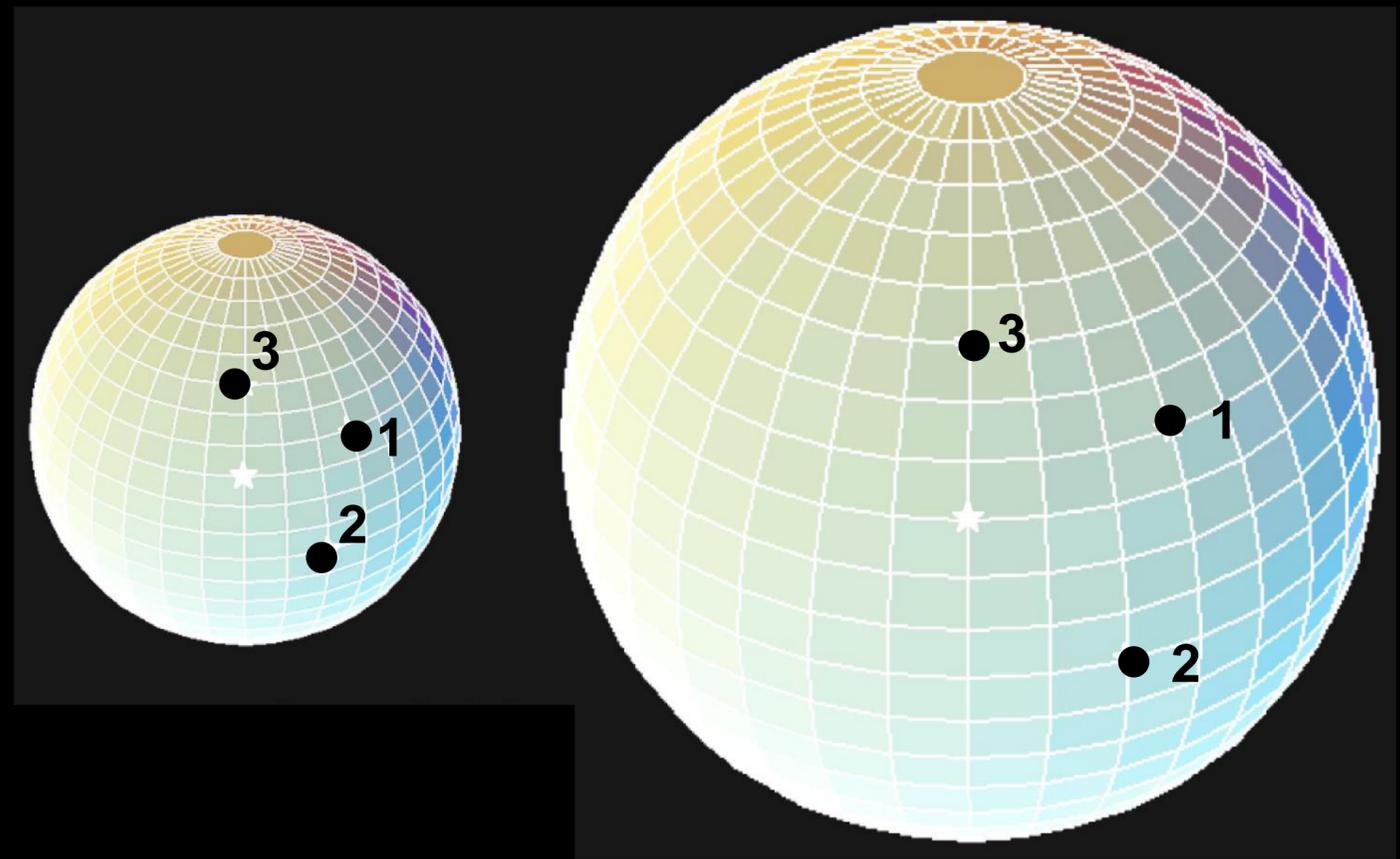
$$v_{12}(t) = \frac{dr_{12}(t)}{dt} = \frac{d}{dt} a(t)r_{12}(t_0) = \dot{a}r_{12} = \frac{\dot{a}}{a}r_{12}(t)$$

$$v_{31}(t) = \frac{dr_{31}(t)}{dt} = \frac{d}{dt} a(t)r_{31}(t_0) = \dot{a}r_{31} = \frac{\dot{a}}{a}r_{31}(t)$$

$$z + 1 = \frac{1}{a}$$

$$v = Hr$$

E' consistente con un Universo in espansione omogenea ed isotropa. Consideriamo 3 punti con distanze relative r_{12} r_{23} r_{31}



Un osservatore in 1 vedrà le altre galassie allontanarsi con velocità

$$v_{12}(t) = \frac{dr_{12}(t)}{dt} = \frac{d}{dt} a(t)r_{12}(t_0) = \dot{a}r_{12} = \frac{\dot{a}}{a}r_{12}(t)$$

$$v_{31}(t) = \frac{dr_{31}(t)}{dt} = \frac{d}{dt} a(t)r_{31}(t_0) = \dot{a}r_{31} = \frac{\dot{a}}{a}r_{31}(t)$$

$$v = Hr$$

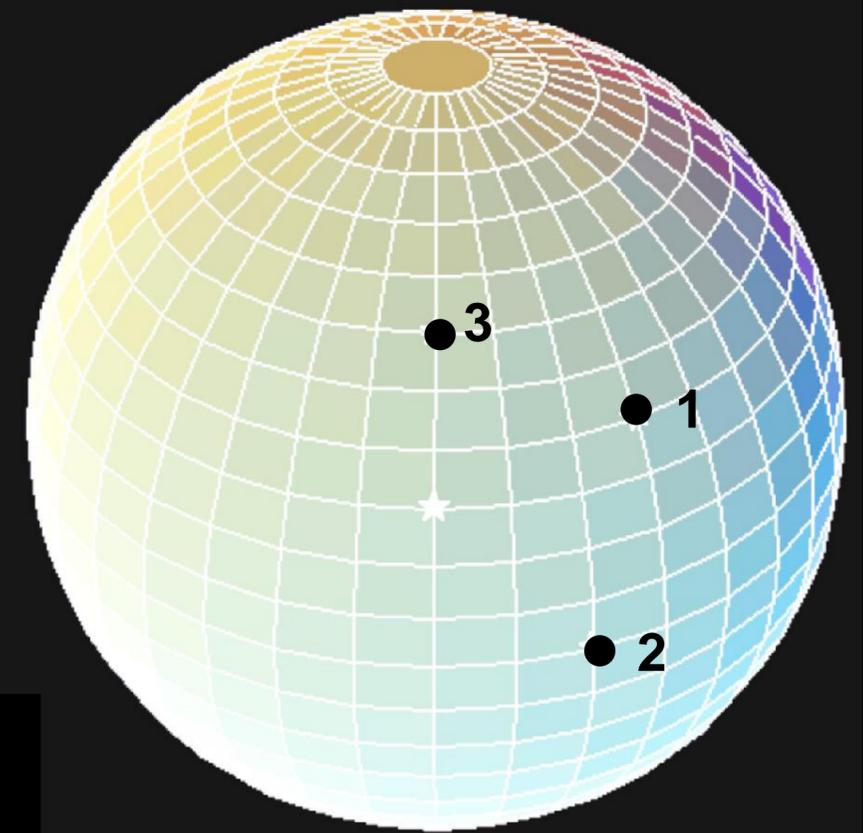
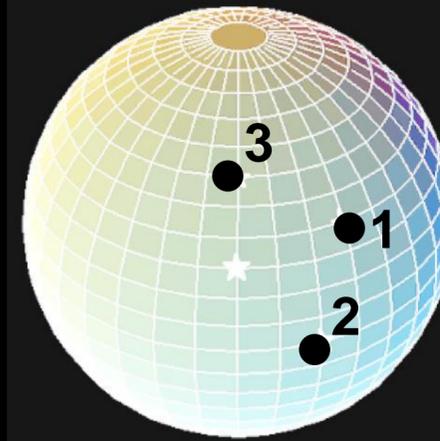
$$H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$$

Ogni altro osservatore vedrà la stessa cosa

$$z + 1 = \frac{1}{a}$$

$$v = Hr$$

$$H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$$



$H = \dot{a}/a$ dipende dal tempo cosmico t

Hubble derivò la legge usando galassie “vicine” per le quali $H \approx H_0$

Se l'espansione avesse proceduto con $H = \text{costante}$, il tempo trascorso da quando i punti erano in contatto è

$$t_H = \frac{r}{v} = \frac{1}{H_0} \text{ tempo di Hubble } \approx 14 \text{ Gyr}$$

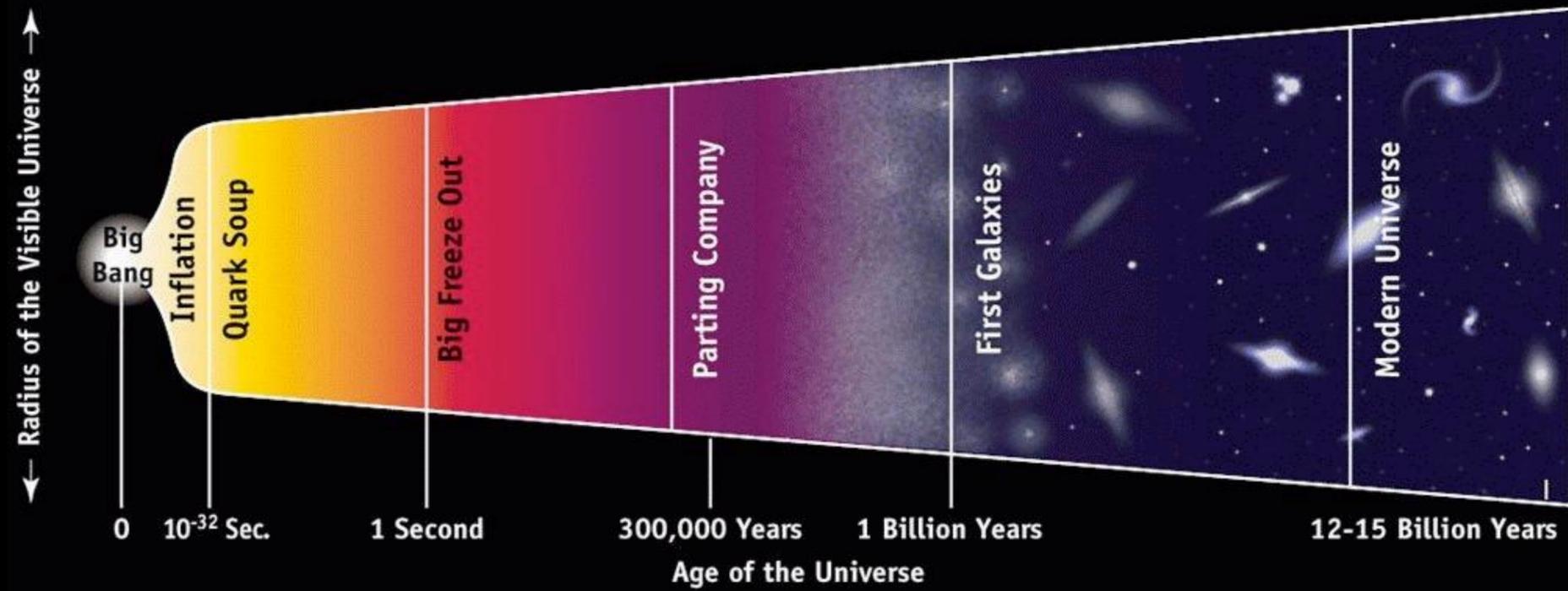
$$R_H = ct_H \approx \frac{c}{H_0} \approx 4400 \text{ Mpc}$$

Esiste una distanza max percorsa dalla luce in t_0 Cf Paradosso di Olbert

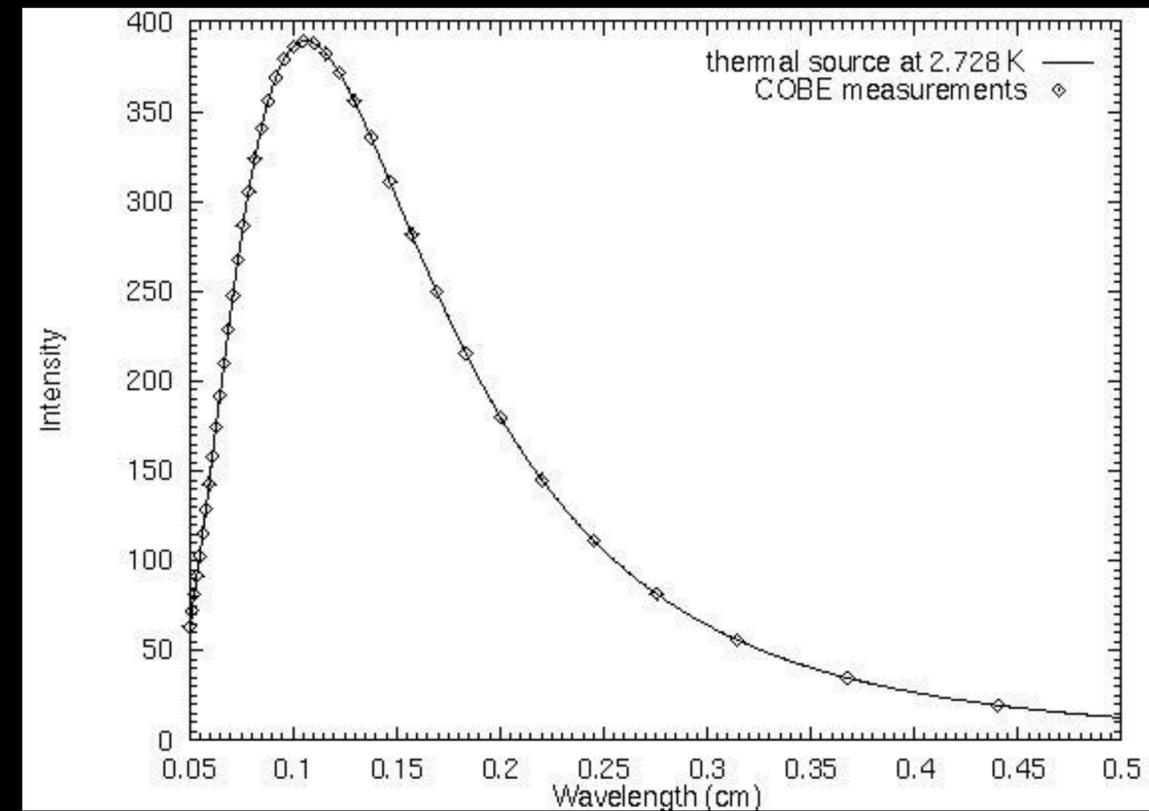
Proprieta' Osservative dell'Universo

3. Radiazione Cosmica di Fondo

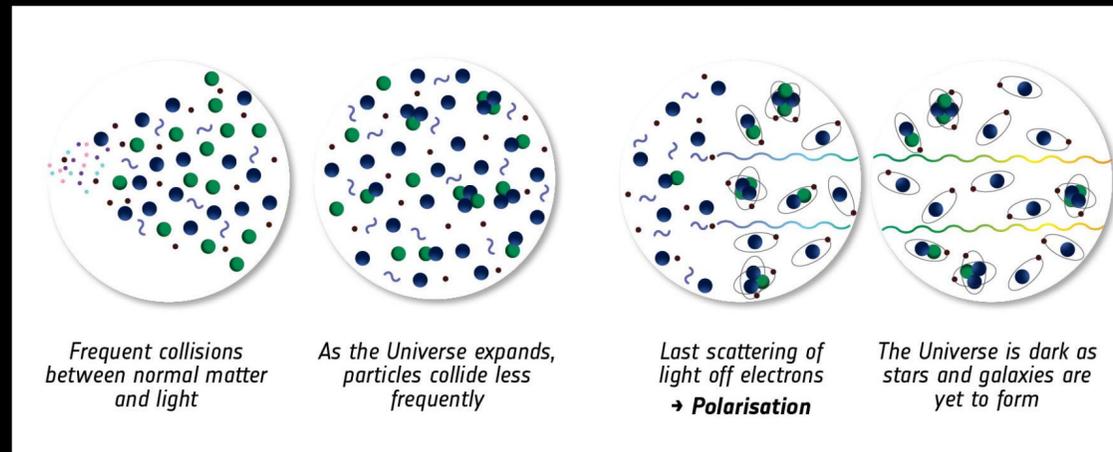
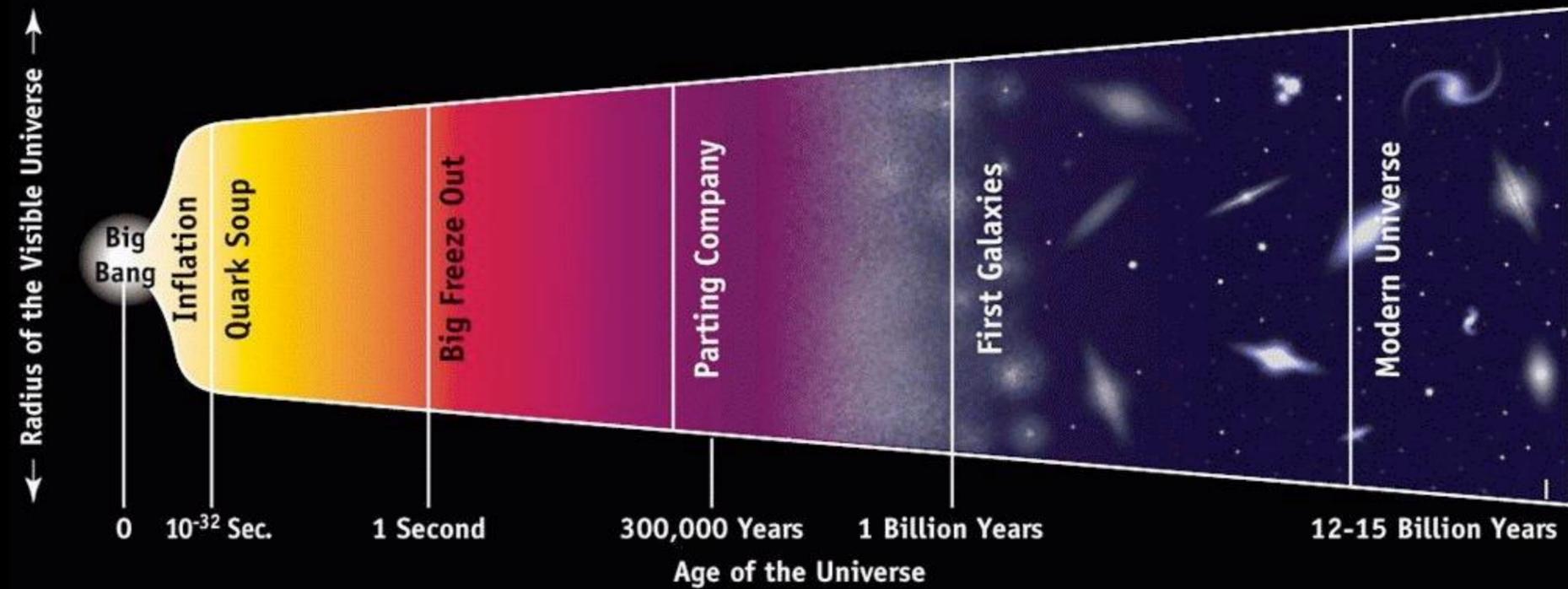
Fondo Cosmico a Microonde



Discovered by
Penzias & Wilson 1964 (Nobel 1978)

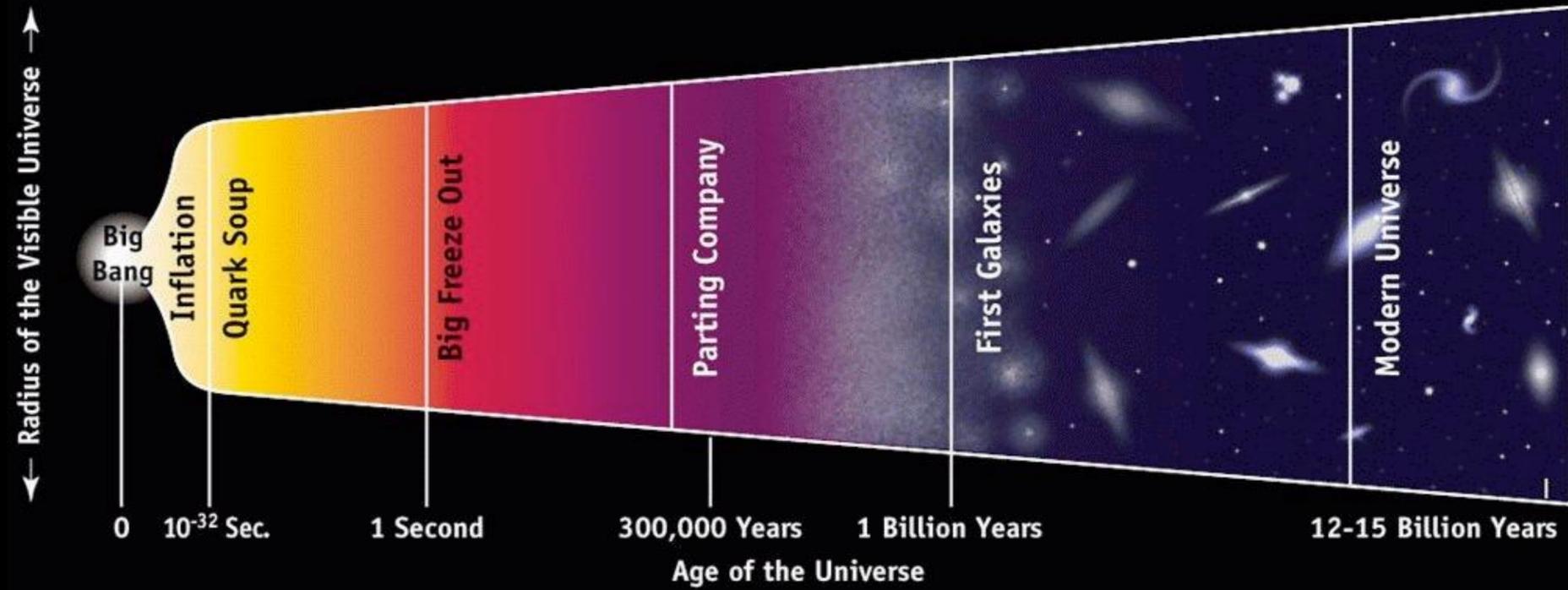


Fondo Cosmico a Microonde

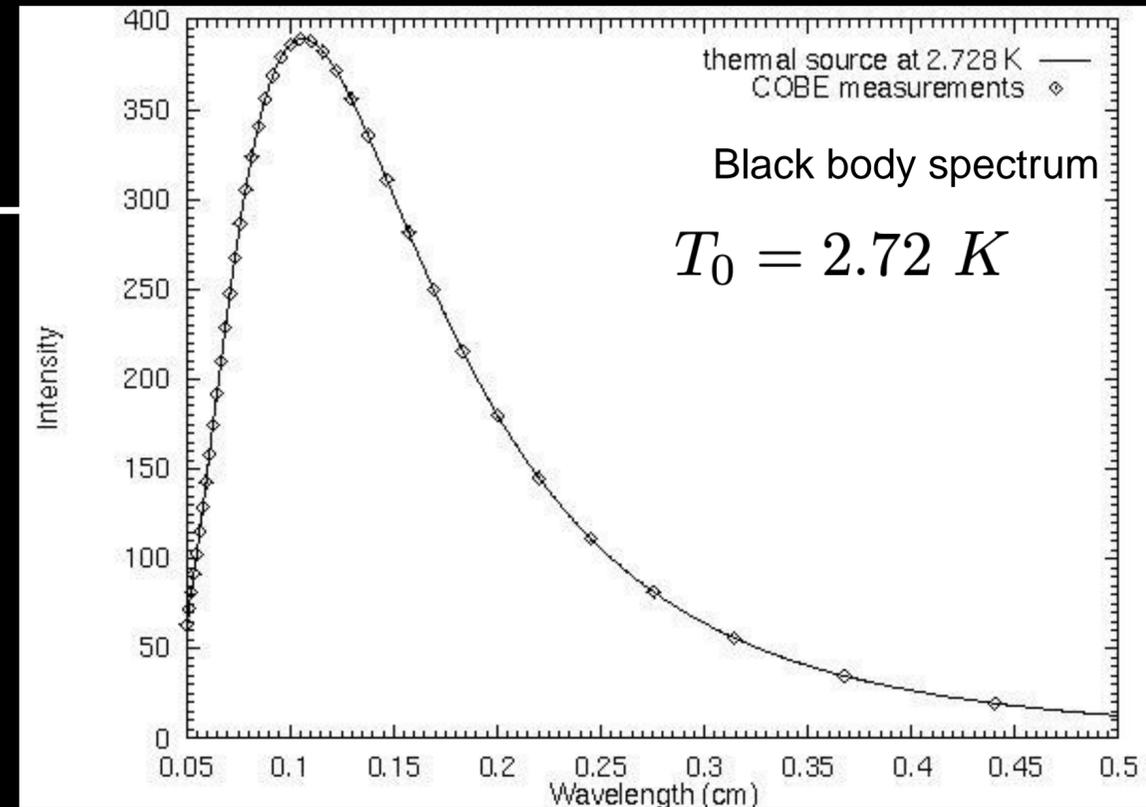
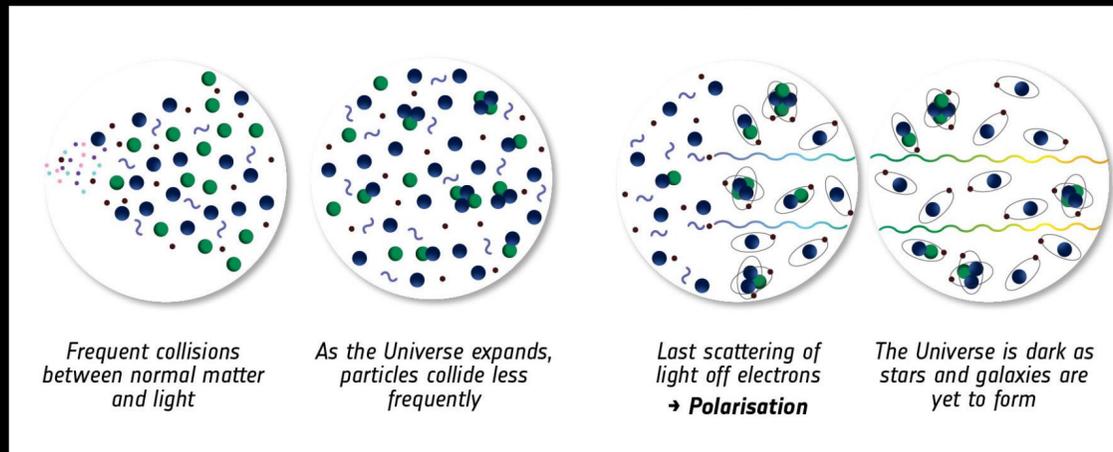


- $T \sim 10^{15}$ K, $t \sim 10^{-12}$ sec: Primordial soup of fundamental particles.
- $T \sim 10^{13}$ K, $t \sim 10^{-6}$ sec: Protons and neutrons form.
- $T \sim 10^{10}$ K, $t \sim 3$ min: Nucleosynthesis: nuclei form.
- $T \sim 3000$ K, $t \sim 300,000$ years: Atoms form.
- $T \sim 3$ K, $t \sim 10^{10}$ years: Today.

Fondo Cosmico a Microonde



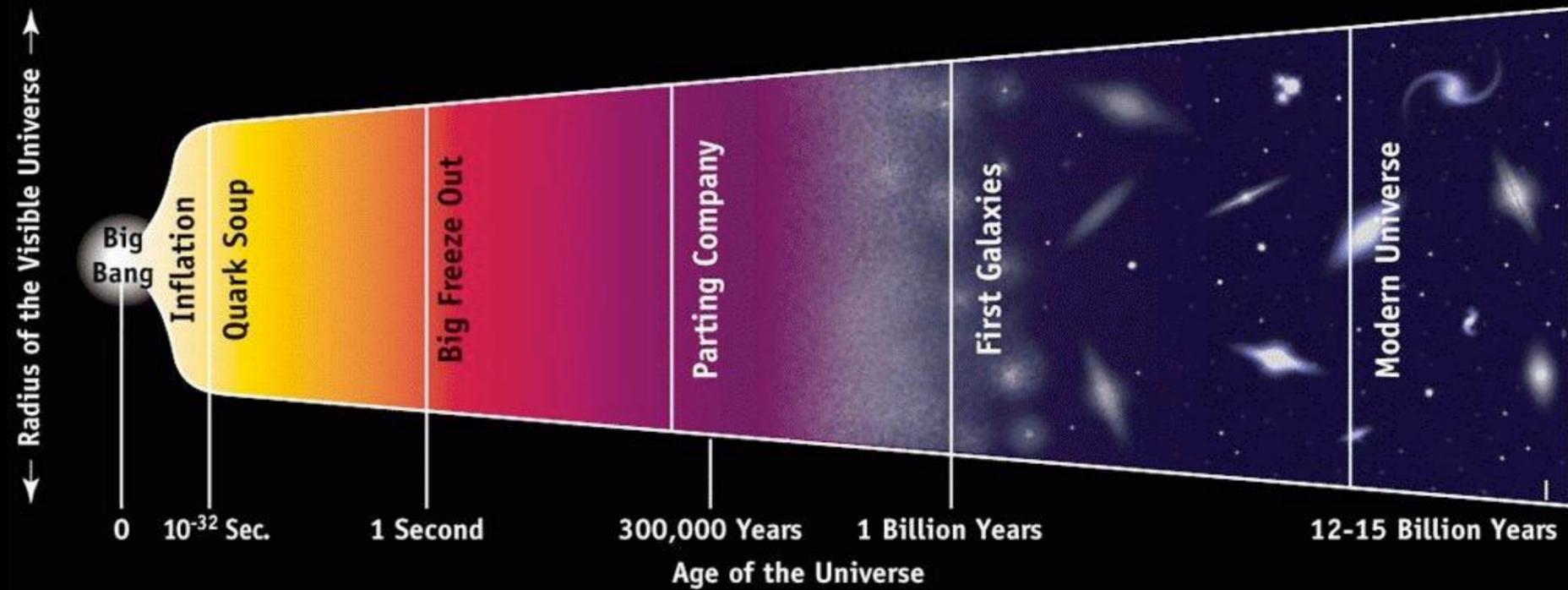
Fondo Cosmico a Microonde. Radiazione di corpo nero



$$\rho_E = AT^4$$

$$A = \frac{\pi^2 k^4}{15 \hbar^3 c^3}$$

Fondo Cosmico a Microonde



La densita' di Energia nella radiazione e' quella corrispondente ad un corpo nero $\rho_E = AT^4$

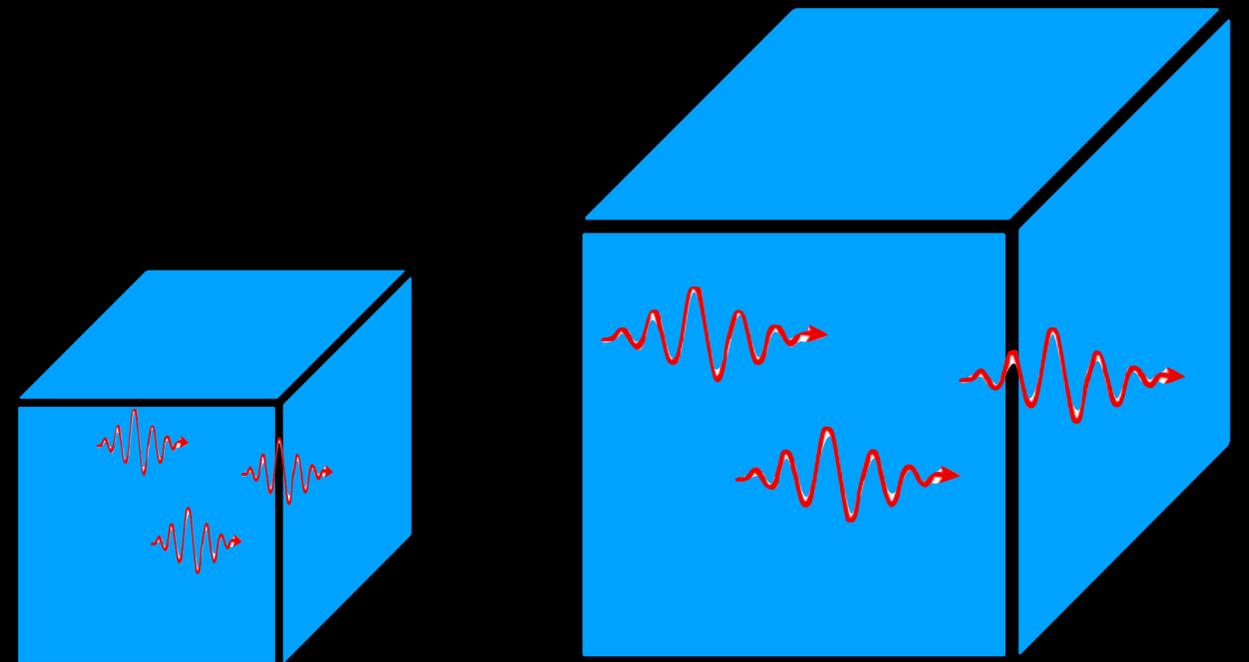
All'Aumentare del volume (con l'espansione dell'Universo)

la density' di energia della radiazione cala come $\frac{1}{a^3} \cdot \frac{1}{a} \rightarrow \rho_E \propto a^{-4}$

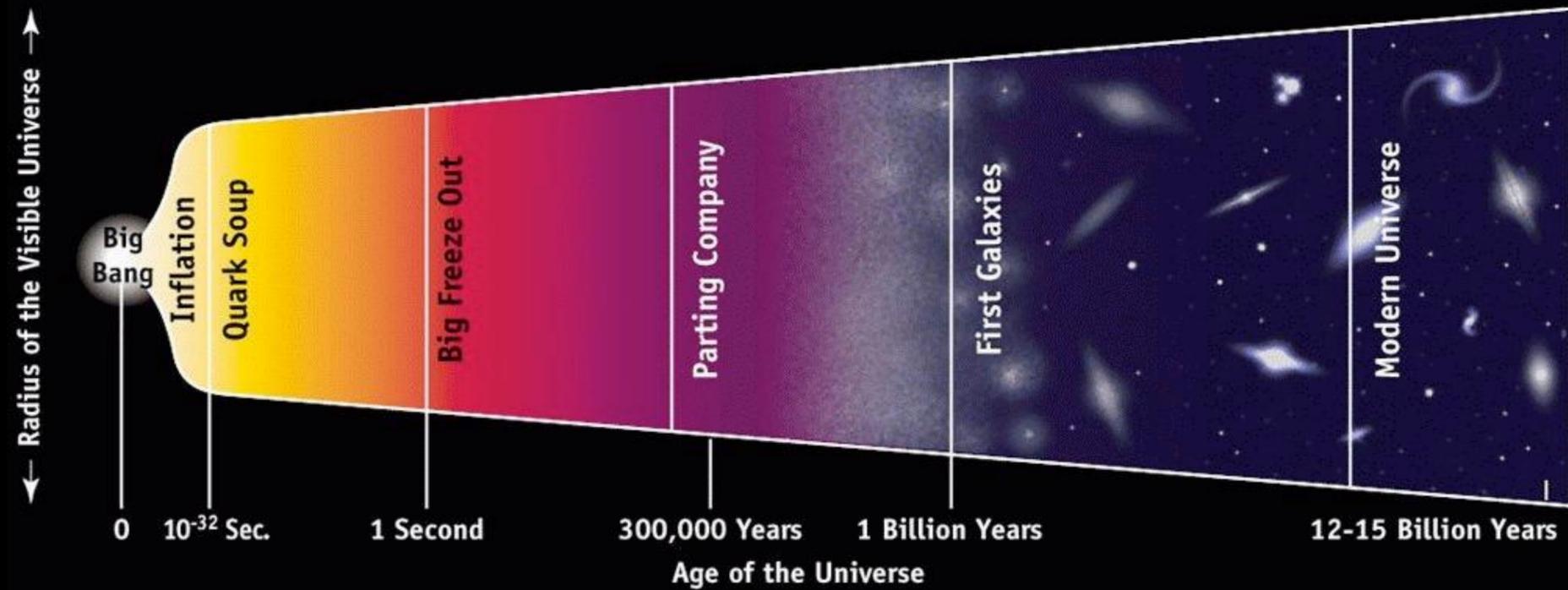
Aumento del volume con a

Diminuzione della en. Dei fotoni

$$E_\nu = h\nu \propto \frac{1}{\lambda} \sim \frac{1}{a}$$



Fondo Cosmico a Microonde



La densita' di Energia nella radiazione e' quella corrispondente ad un corpo nero $\rho_E = AT^4$

All'Aumentare del volume (con l'espansione dell'Universo)

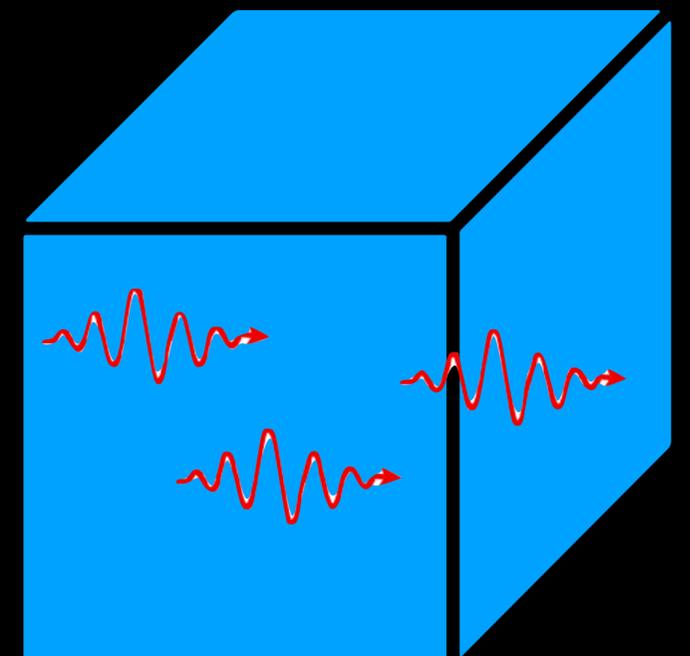
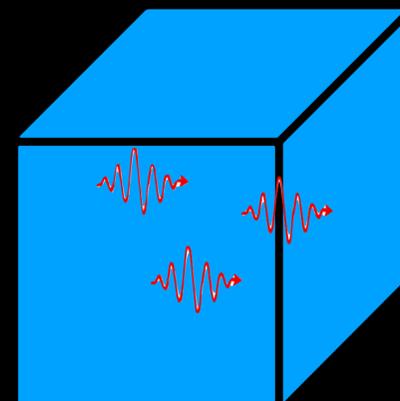
la density' di energia della radiazione cala come $\frac{1}{a^3} \cdot \frac{1}{a} \rightarrow \rho_E \propto a^{-4}$

Aumento del volume con a

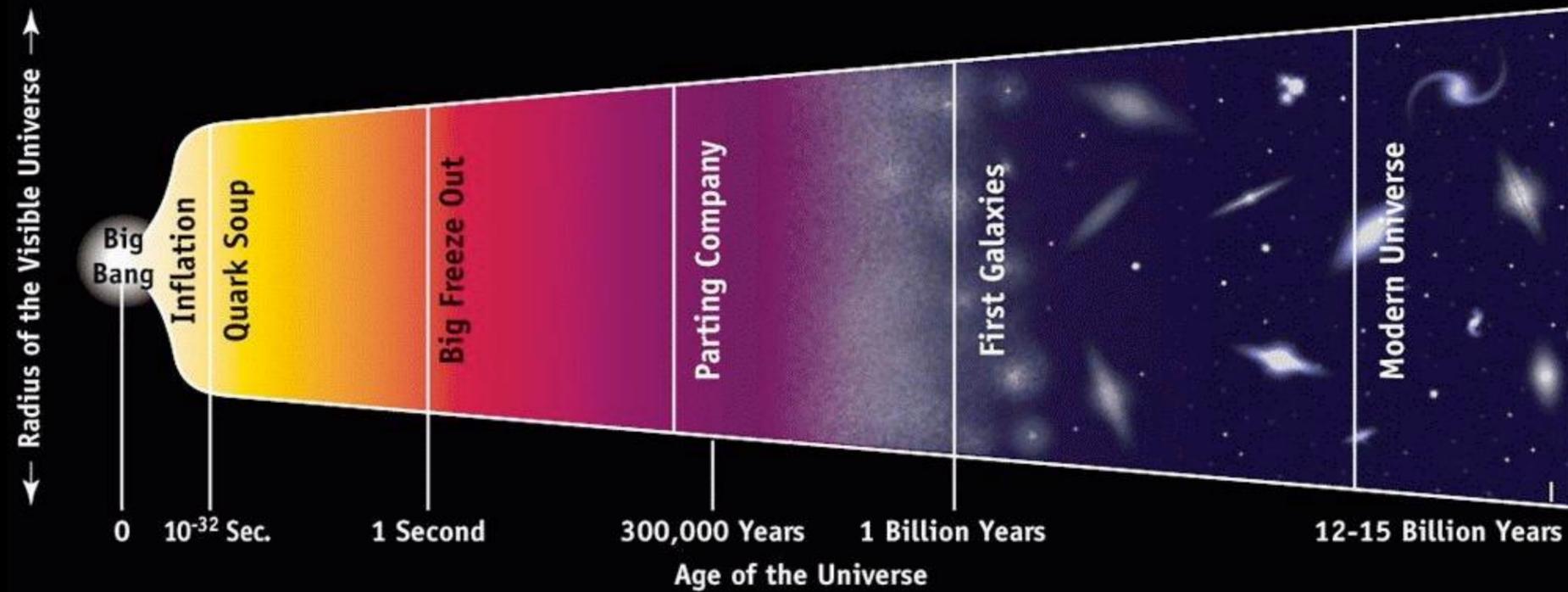
Diminuzione della en. Dei fotoni

$$E_\nu = h\nu \propto \frac{1}{\lambda} \sim \frac{1}{a}$$

$$\rho_E = AT^4 \propto a^{-4}$$



Fondo Cosmico a Microonde



$$\rho_E = AT^4$$
$$\propto a^{-4}$$

Data la temperatura necessaria per dissociare l'atomo di H e data la temperatura attuale $T(a = 0) = 2.7K$

E' possibile calcolare il fattore di scala a cui si e' stato emesso il fondo cosmico

$$a \approx 1/1350$$

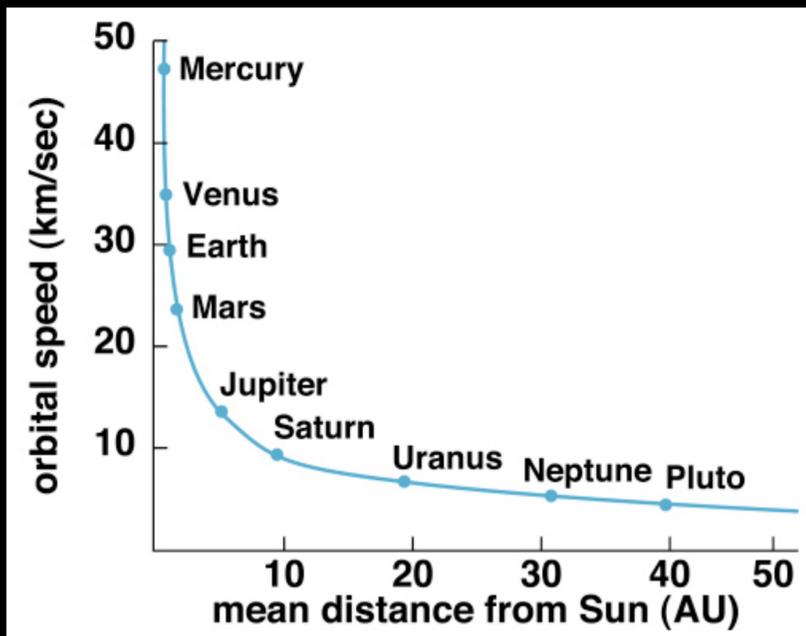
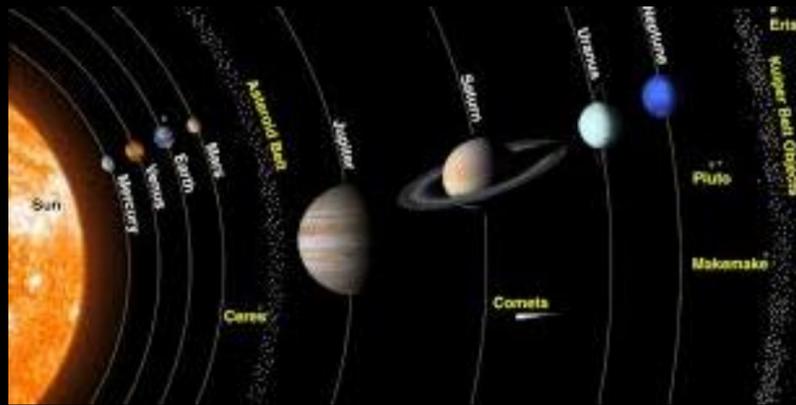
Corrispondente a redshift

$$z \approx 1350$$

Composizione dell'Universo: La Componente Oscura

La componente oscura

$$v^2 = \frac{GM(r)}{r}$$

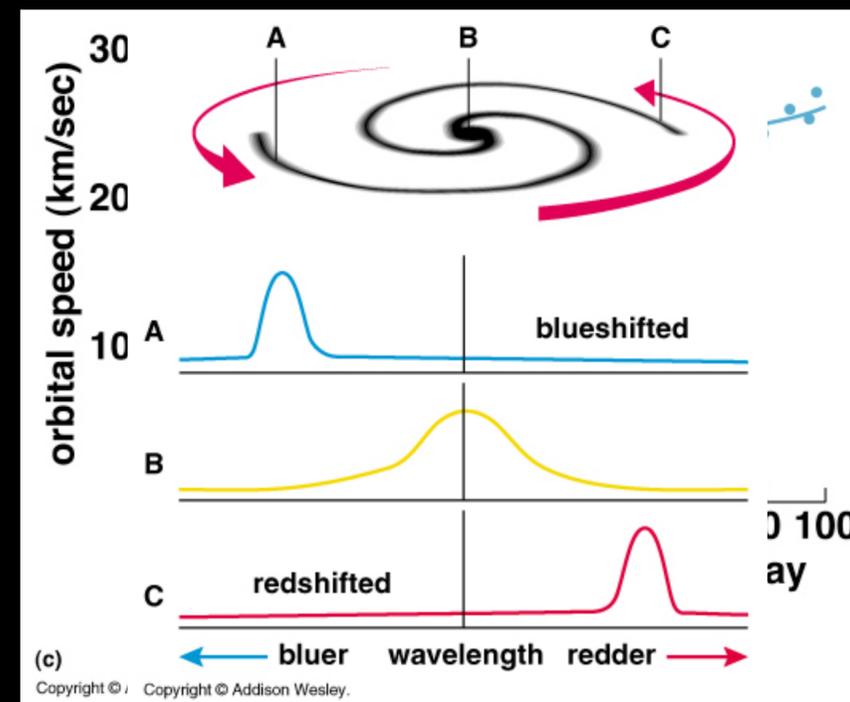
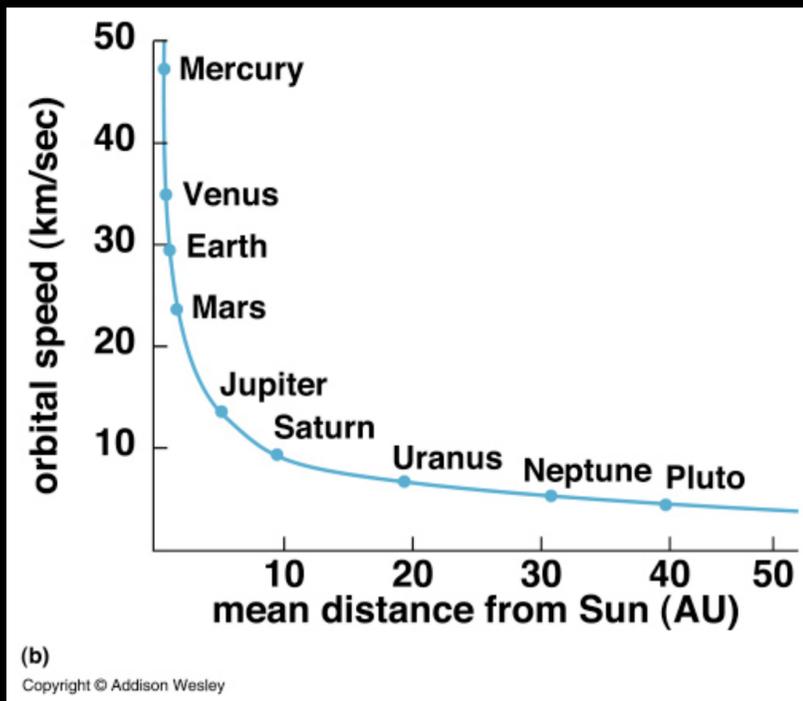
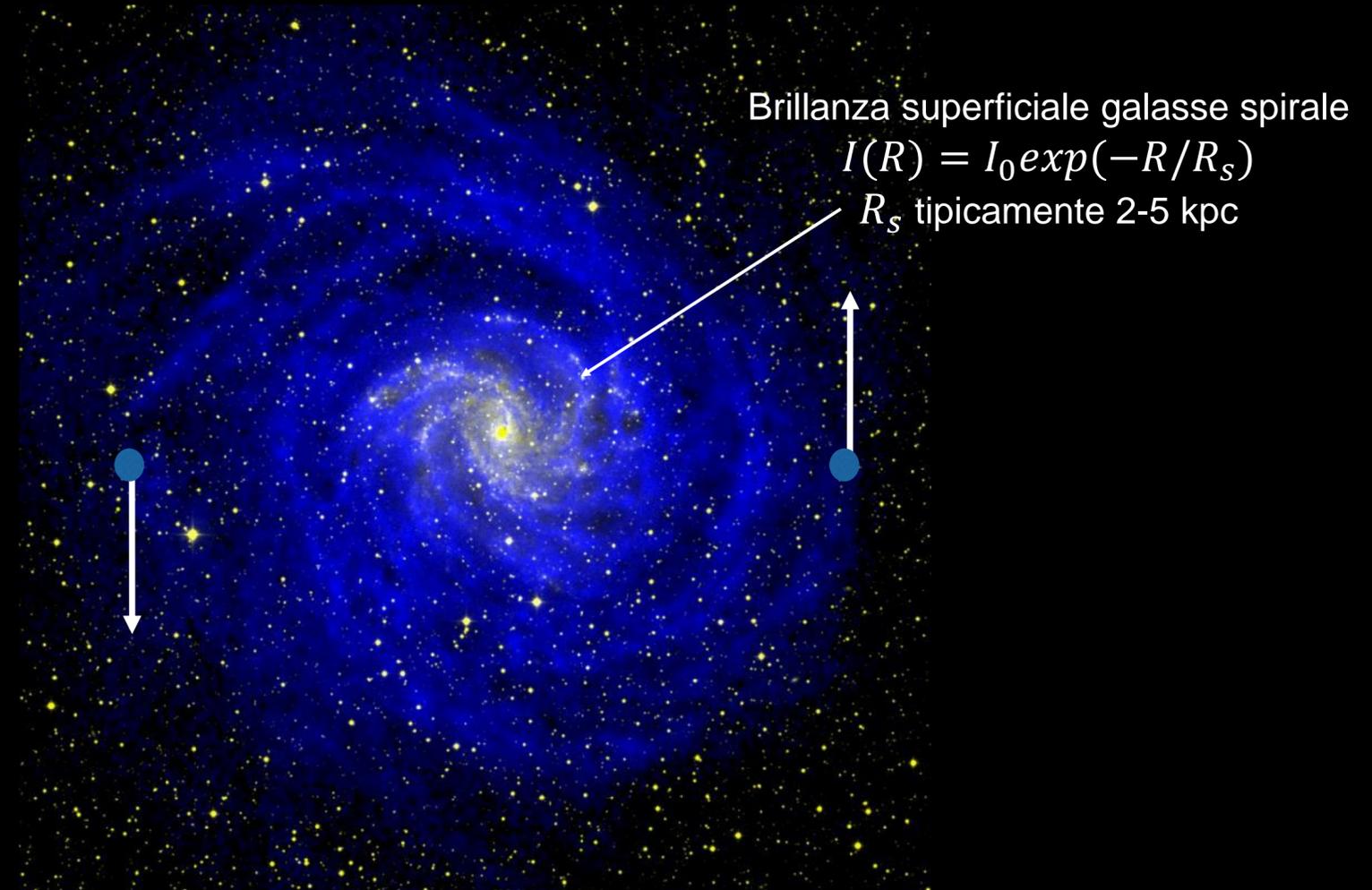


(b)

Copyright © Addison Wesley

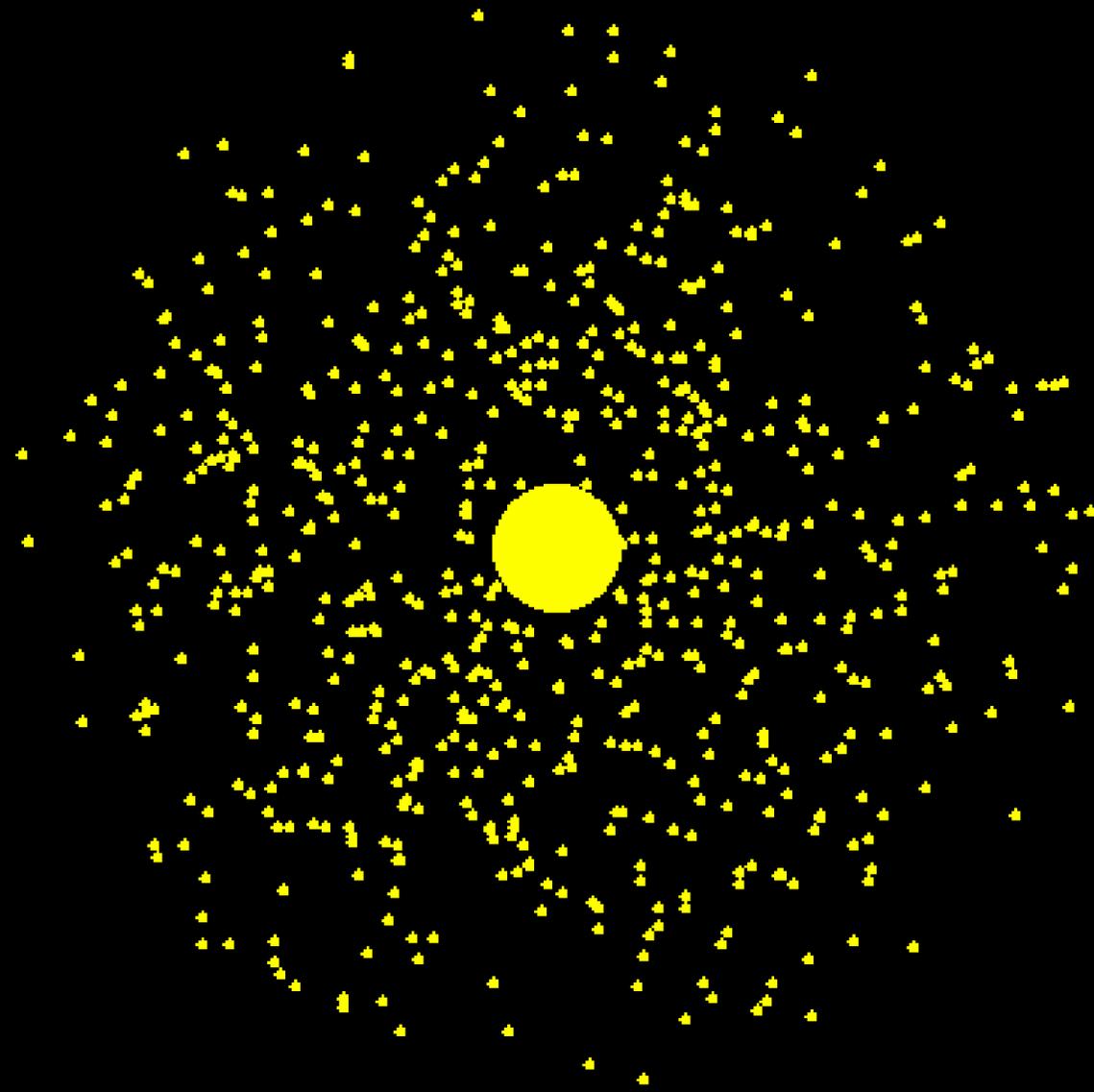
La componente oscura

$$v^2 = \frac{GM(r)}{r}$$

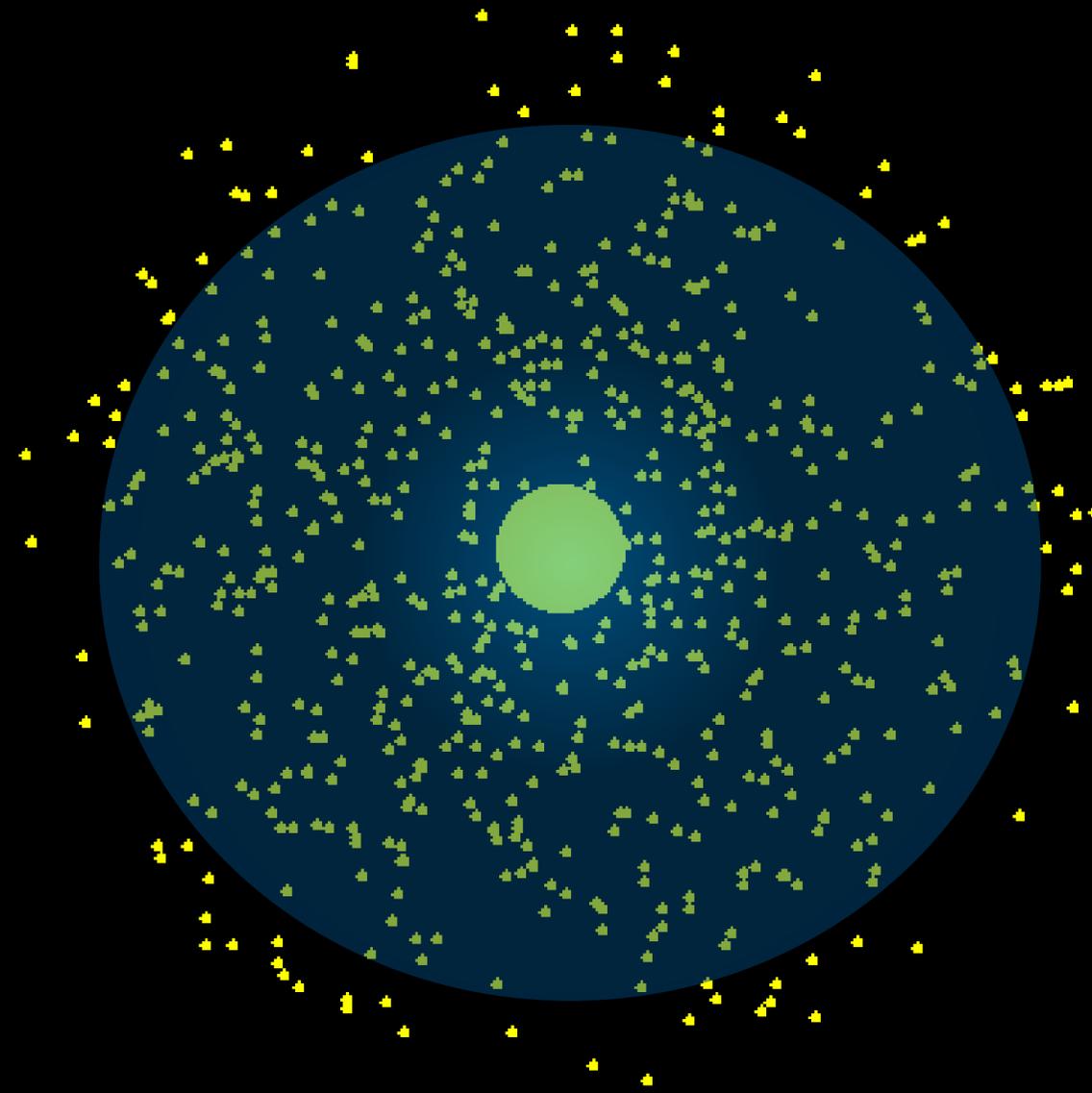


1970 V. Rubin & K. Ford
 Misura rotazione gas HII a $R = 4R_s$ in M31
 Nessuna decrescita Kepleriana

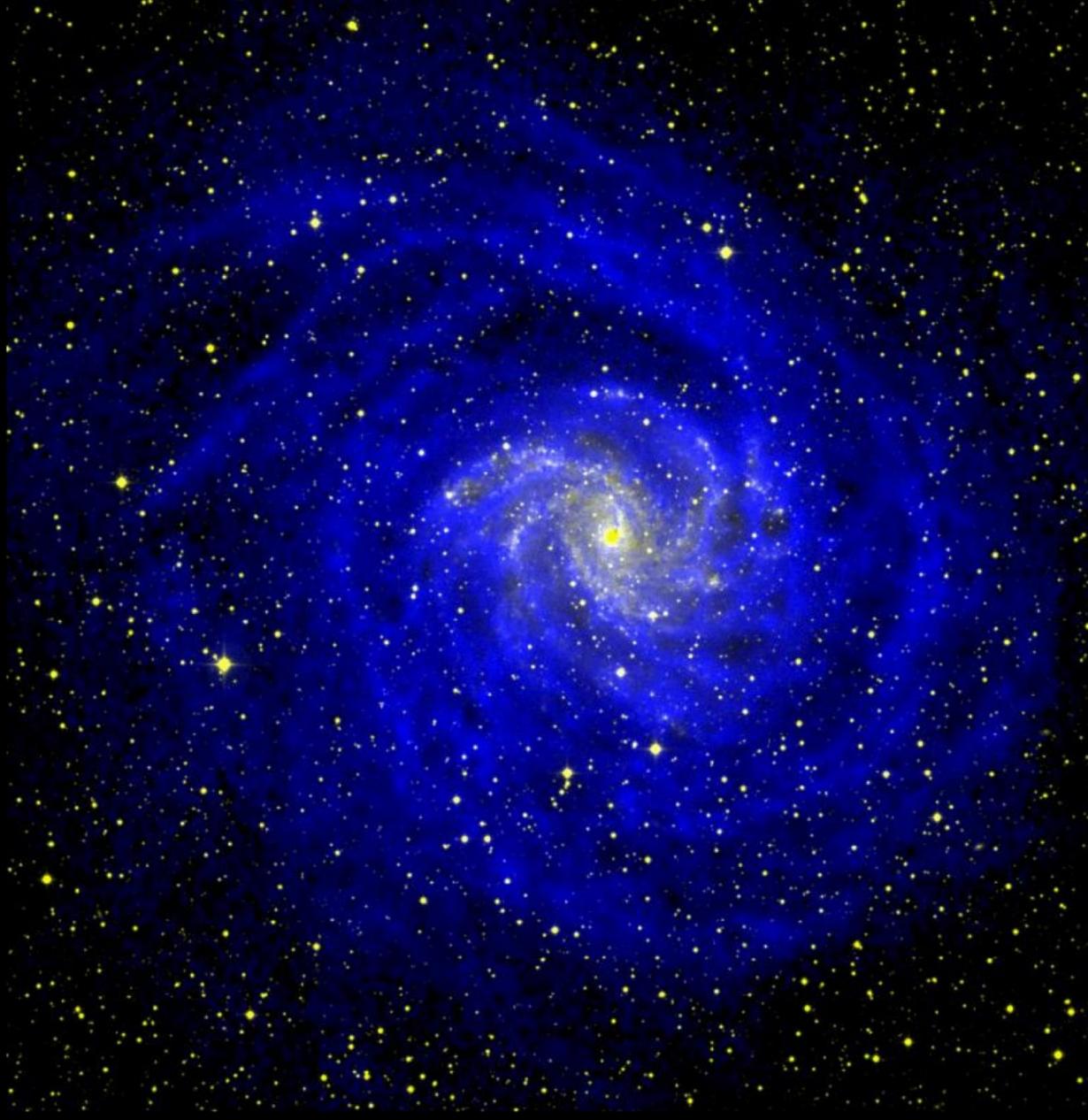
Fino al 90 % della massa delle galassie e' oscura



No Mat. Osc.



Mat. Osc.

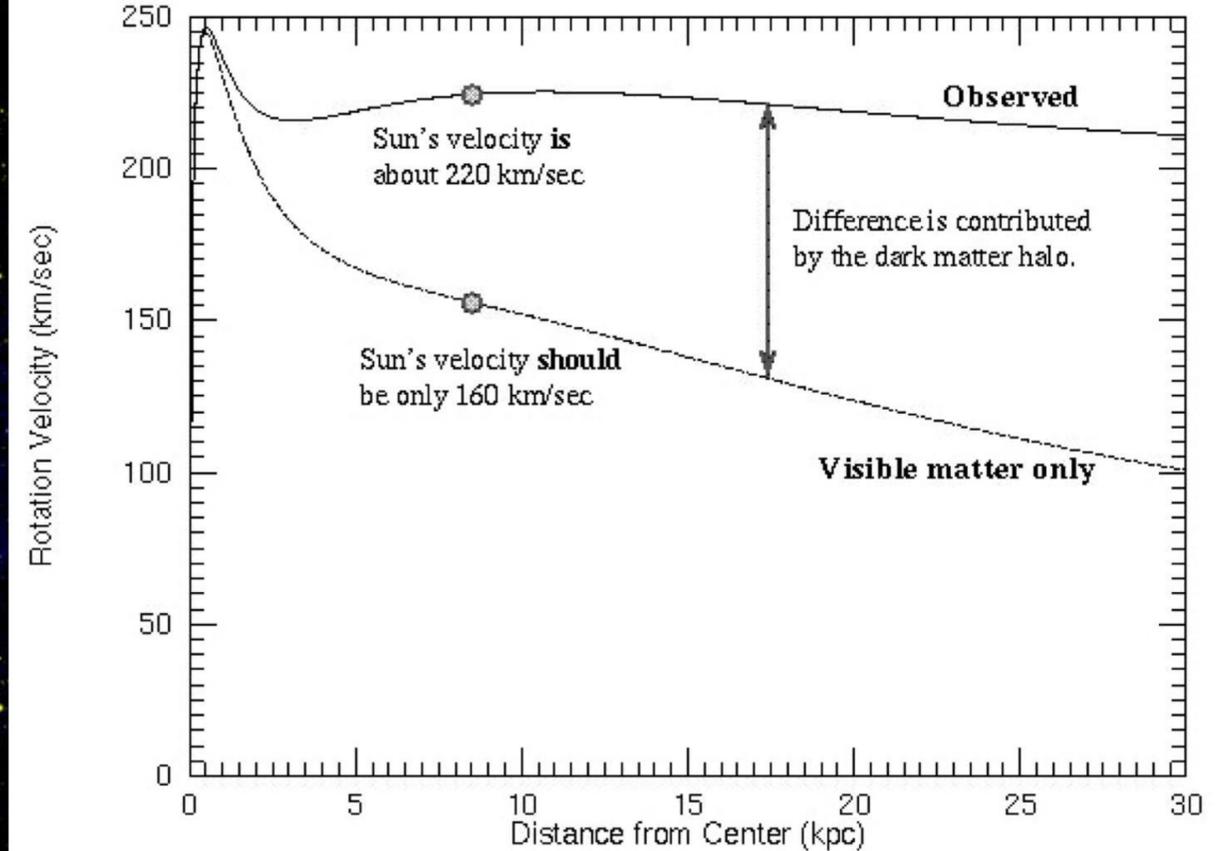


NGC 6946 from Digital Sky Survey

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

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

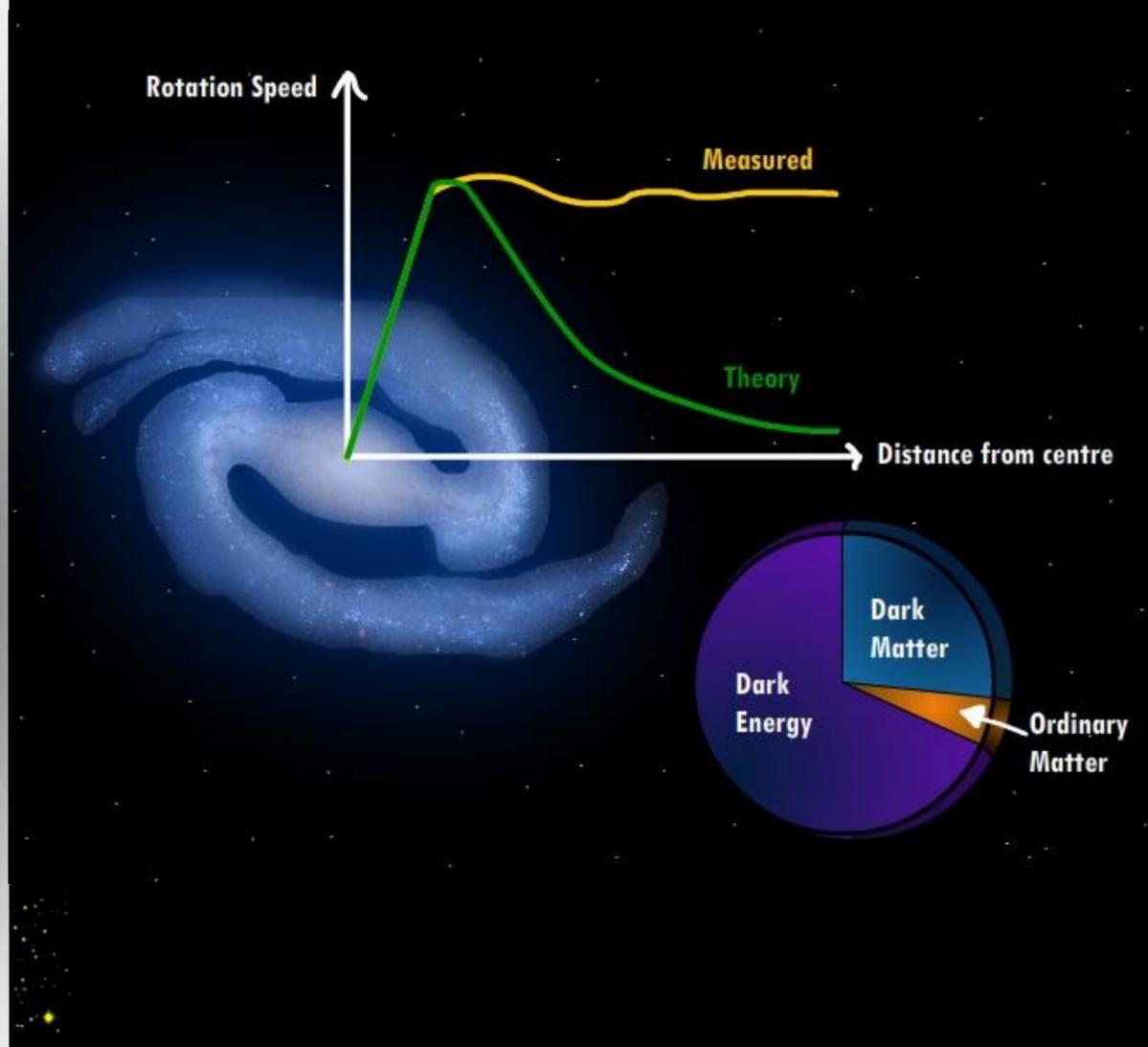
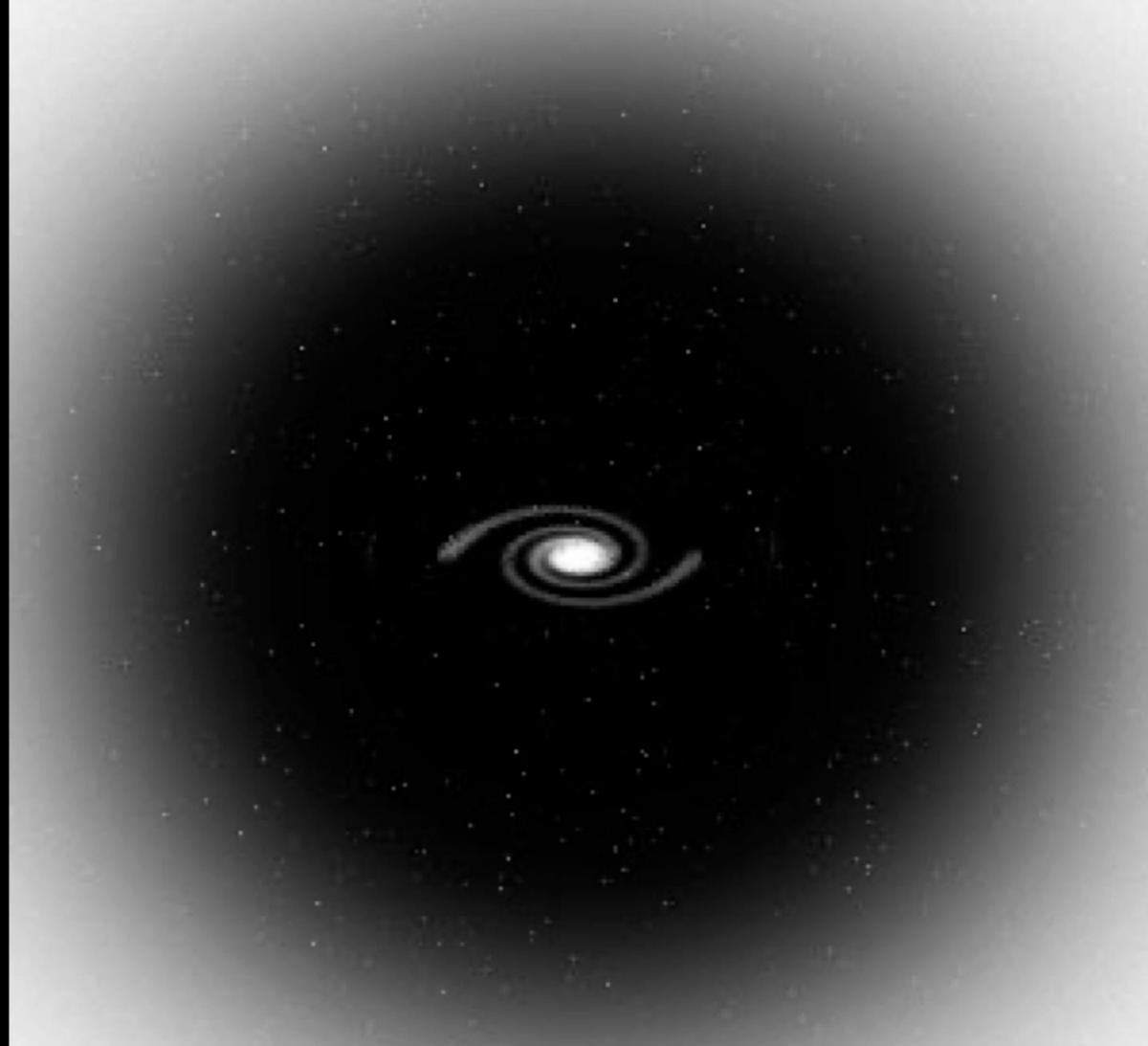
HI molto piu' esteso del disco stellare



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.

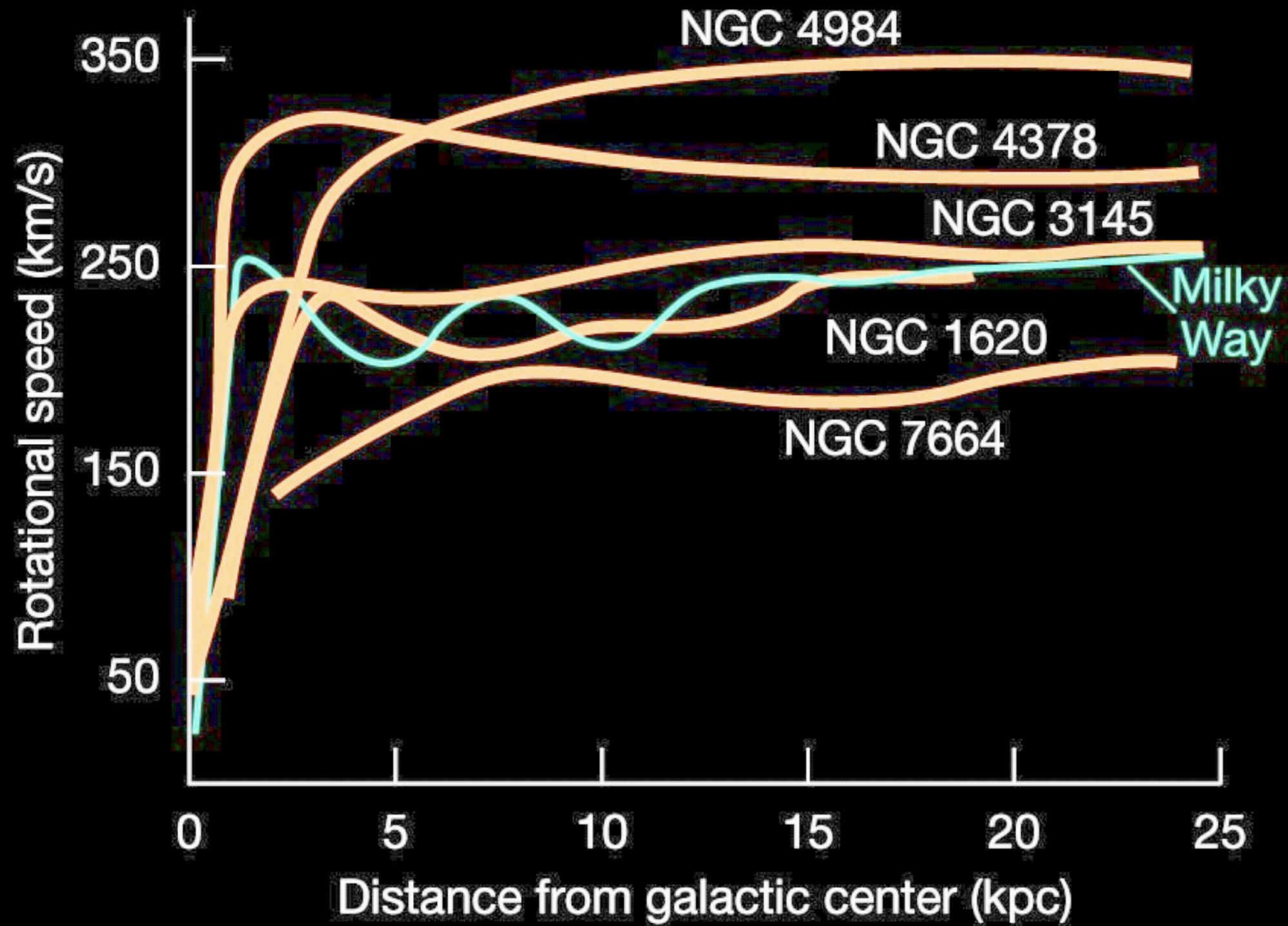


Massa Oscura \approx 7-10 volte Massa Luminosa (stelle +gas).

Per la nostra galassia , per una v costante con R si ha

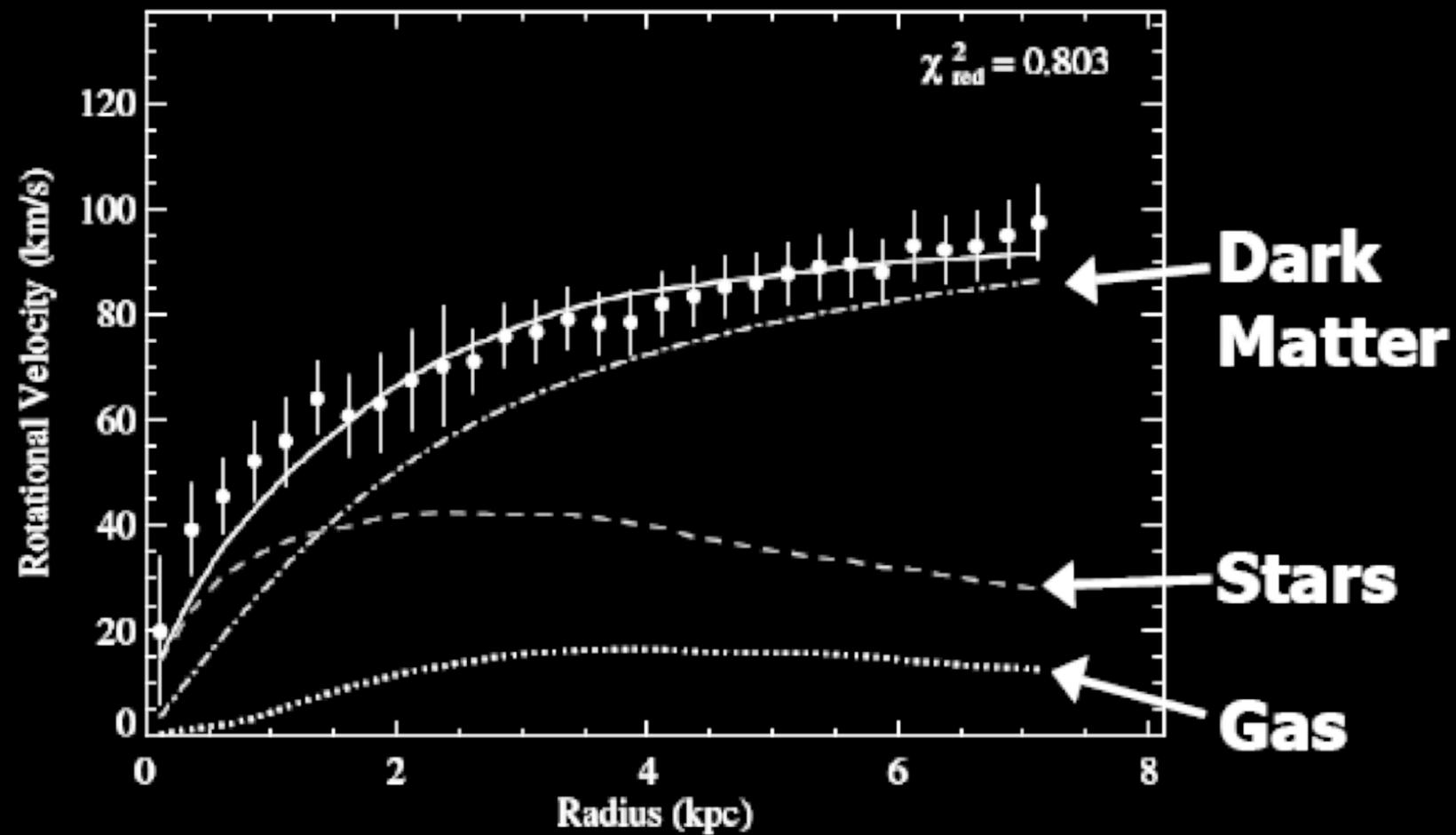
$$\frac{M}{L_V} \approx 64 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot,V}} \left(\frac{R_{halo}}{100kpc} \right)$$

Tipico $M/L_V \approx 5$ per le stelle



(b)

Stima densità' di materia oscura



$$v_c^2 = \frac{G}{R} \int_0^R \rho(r) r^2 dr$$

Zona interna: $\rho \sim \text{const}$
 v_c cresce linearmente
 (rotazione rigida, densità costante)

Zona esterna: $\rho \sim 1/r^2$
 Profilo isoterma
 $v_c \sim \text{const}$

Stima della Densità' della DM

$$\rho \approx 0.7 M_{\text{solar}} / \text{pc}^3 \times \left[\frac{\text{kpc}}{r} \right]^2 \times \left[\frac{V_c}{200 \text{ km/s}} \right]^2$$

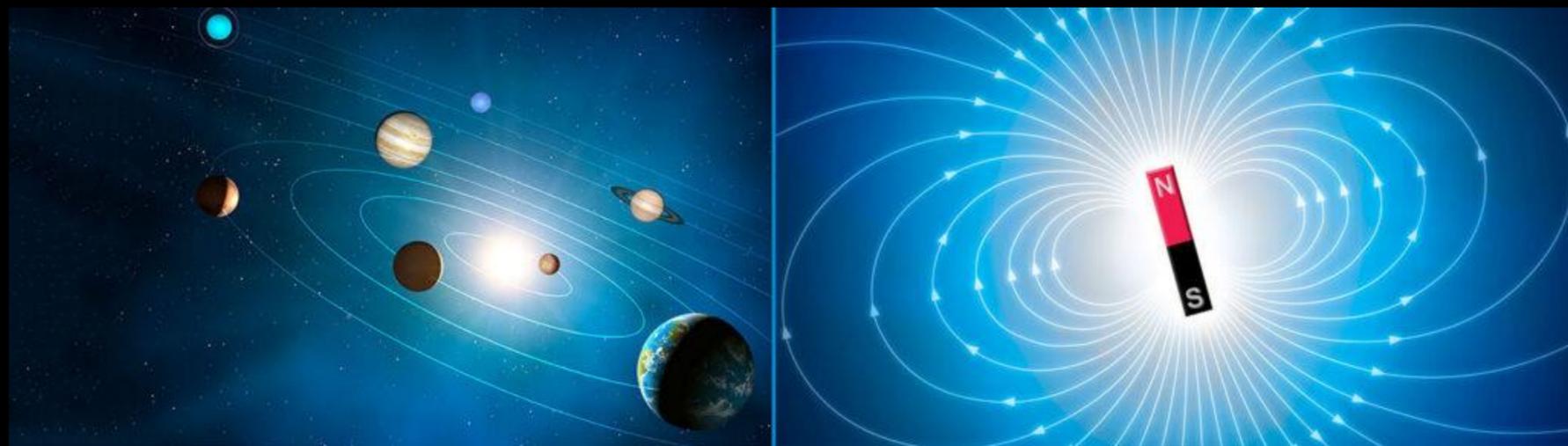
$$\rho \approx 29 \text{ H-atoms/cm}^3 \times \left[\frac{\text{kpc}}{r} \right]^2 \times \left[\frac{V_c}{200 \text{ km/s}} \right]^2$$

Per r e v_c solari, 1 massa del protone per cm^3

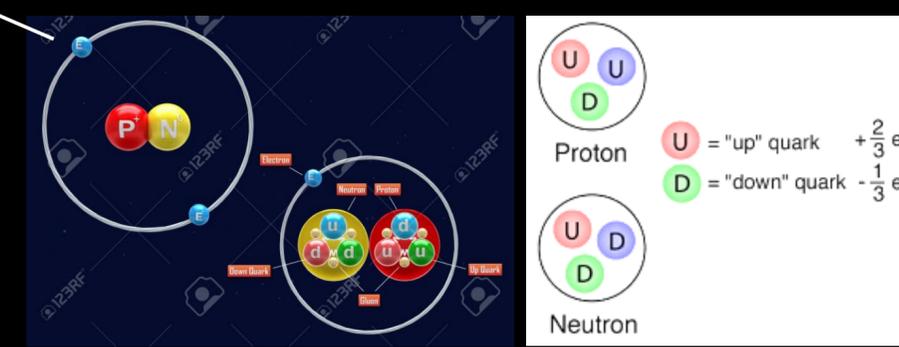
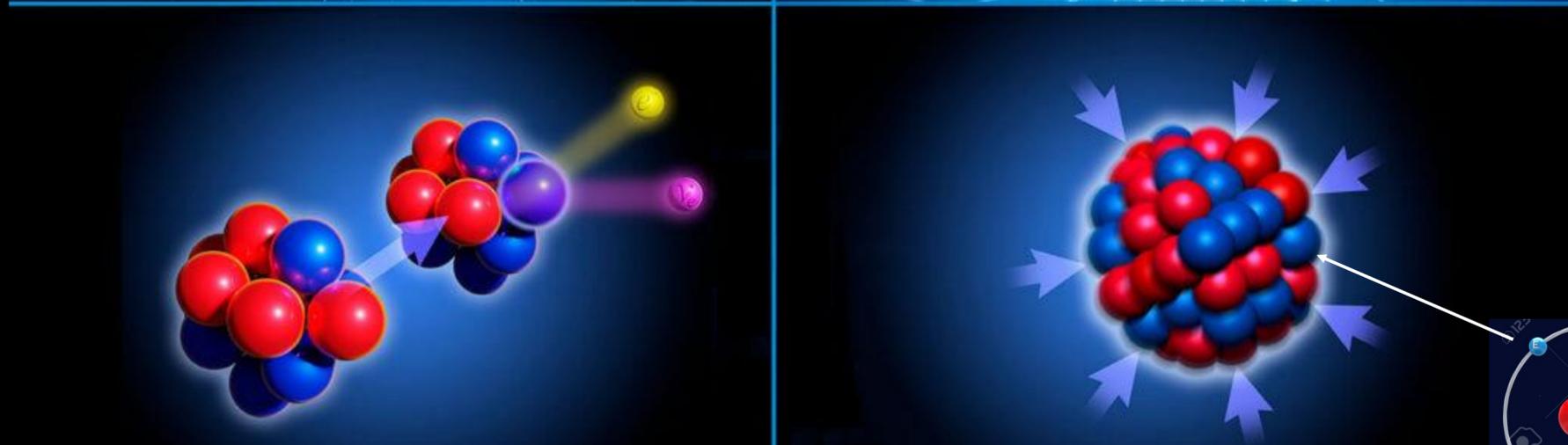
$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + (r/r_c)^2}$$

Formula approssimativa che ingloba i due andamenti sopra descritti

Le quattro interazioni fondamentali



Force	Property	Range	Relative strength
Gravitational	Attracts matter to other matter	Long	6×10^{-39}
Electromagnetic	Holds electrons in orbit about the nuclei of atoms	Short and long	$\frac{1}{137}$
Strong nuclear	Holds protons and neutrons inside the nuclei of atoms	Short (10^{-15} m)	1
Weak nuclear	Involved in radioactive beta decay, when a quark changes from one variety to another. Neutrinos respond only to the weak force.	Short (10^{-17} m)	10^{-5}



Materia Oscura

Interazione con materia ordinaria e' principalmente gravitazionale

Se interagisce con la materia ordinaria lo fa molto debolmente

Deve essere elettricamente neutra e non avere carica di colore

Materia Oscura in Ammassi di Galassie

Migliaia di galassie, in una regione di pochi Mpc.

Velocita' medie delle galassie ~ 1000 km/s

velocita' $\langle v^2 \rangle \sim 1000$ km/s \rightarrow Masse $10^{15} M_{\odot}$
(100-300 volte la massa in stelle e gas
data dalla somma delle galassie)

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



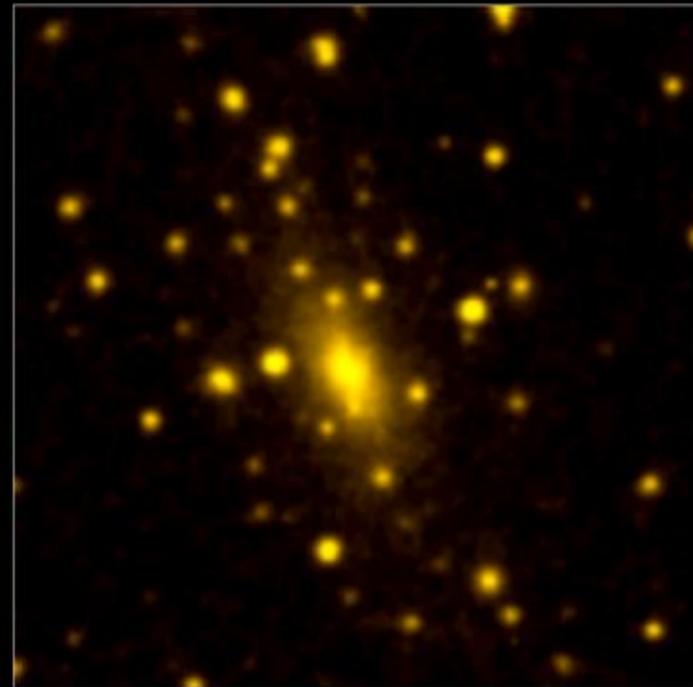
Lo spazio intergalattico negli ammassi e' permeato di gas tenue che emette in raggi X La temperatura del gas corrisponde alla velocita' quadratica media delle particelle di gas

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

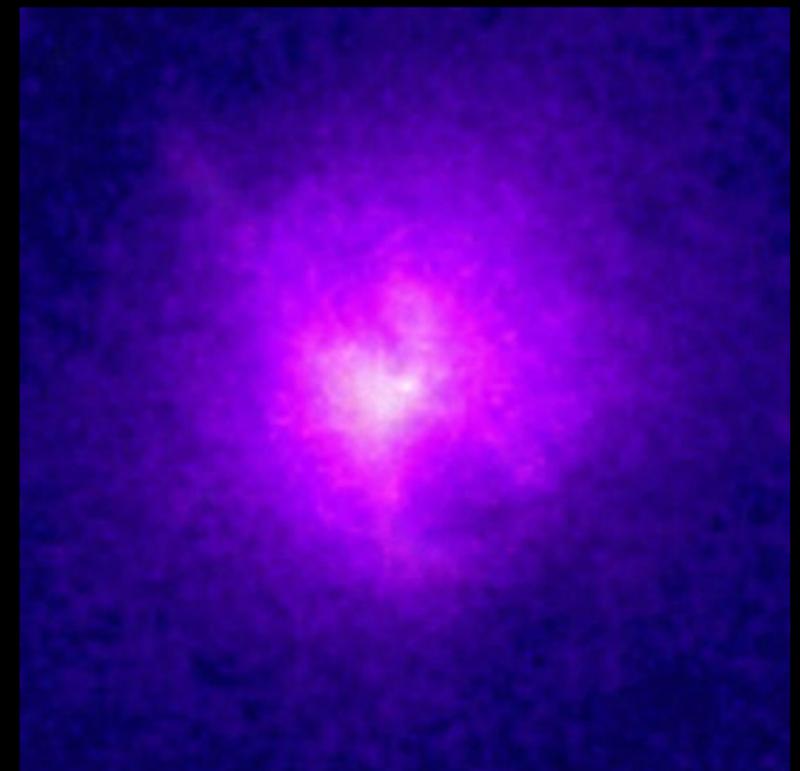
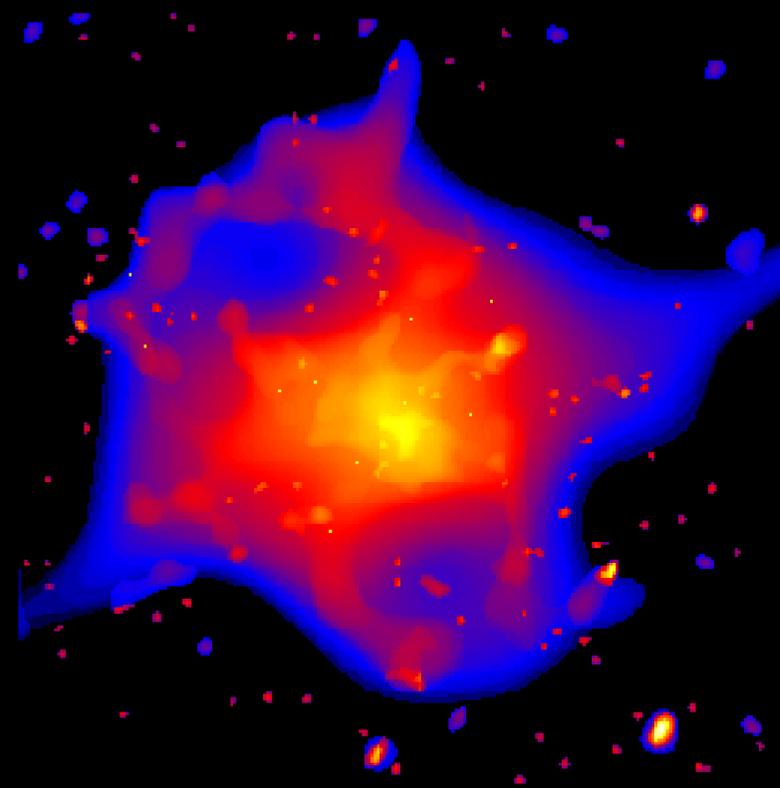
Temperature $\sim 10^7$ - 10^8 K \rightarrow Masse $10^{15} M_{\odot}$



CHANDRA X-RAY



DSS OPTICAL



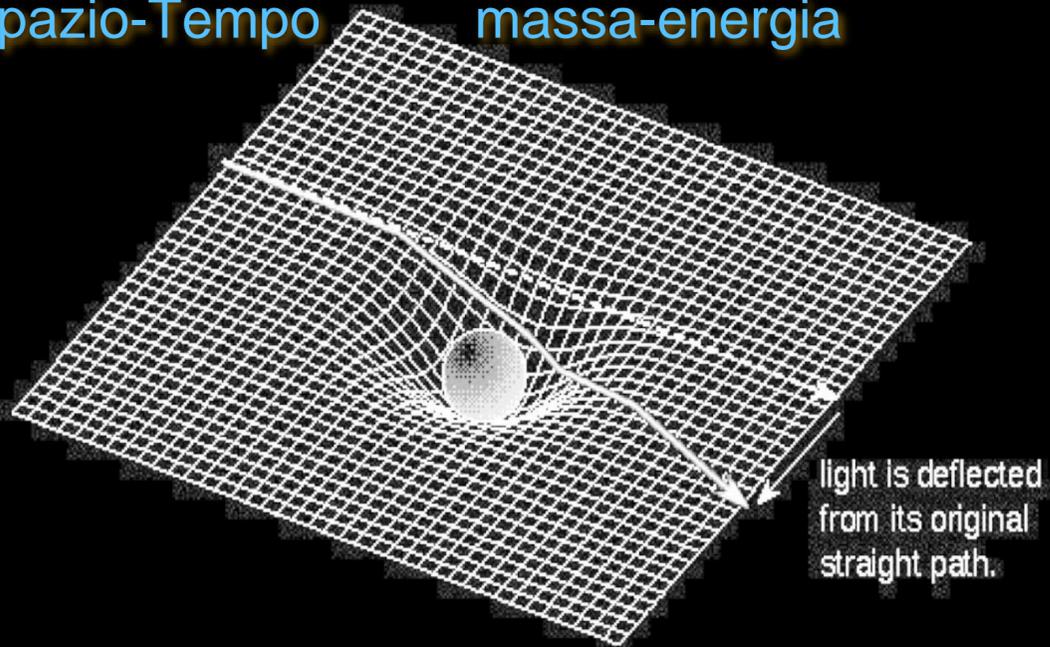


THE EINSTEIN FIELD EQUATION

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

Geometria
Spazio-Tempo

Contenuto di
massa-energia



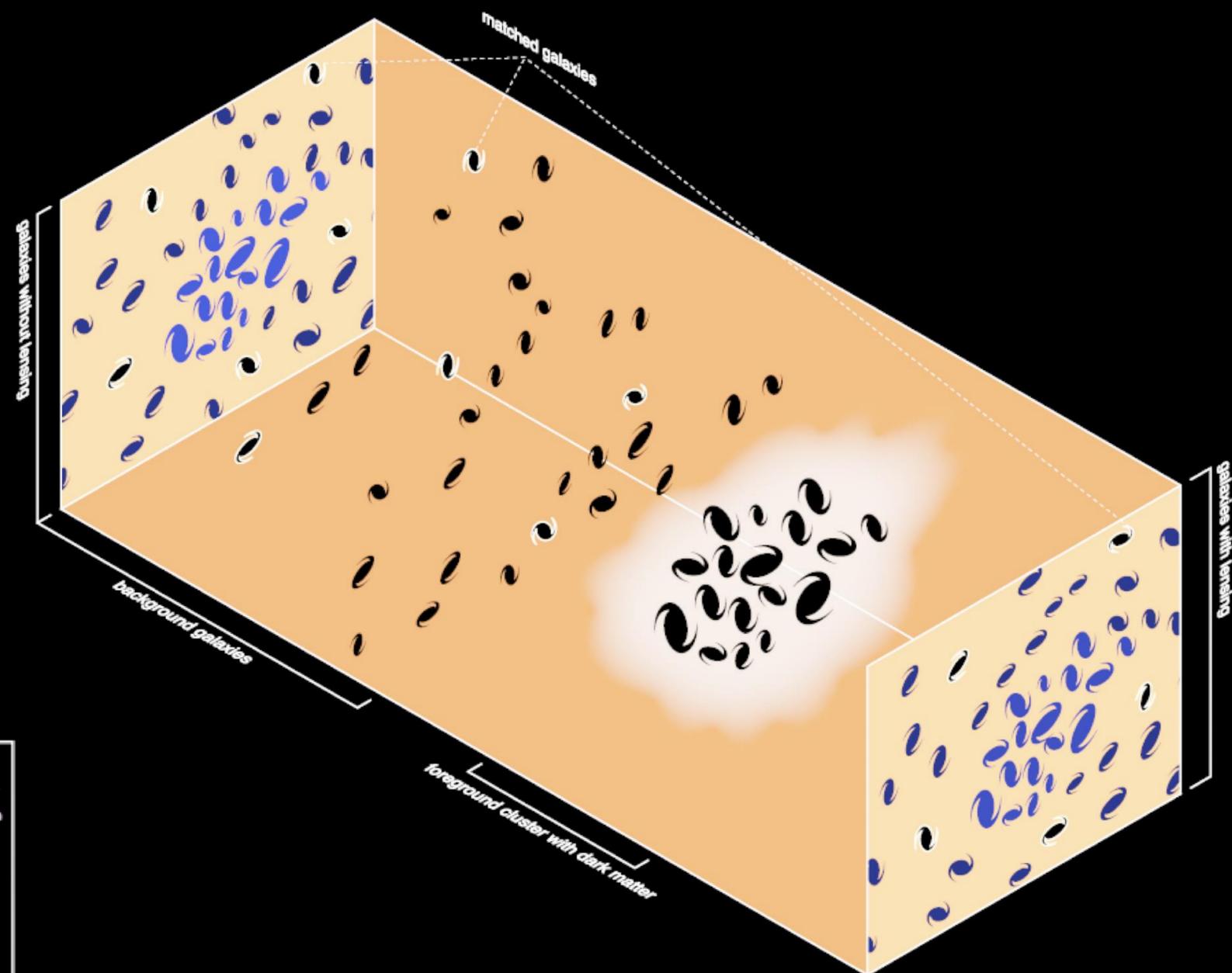
Gravitational Lens Galaxy Cluster 0024+1654

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

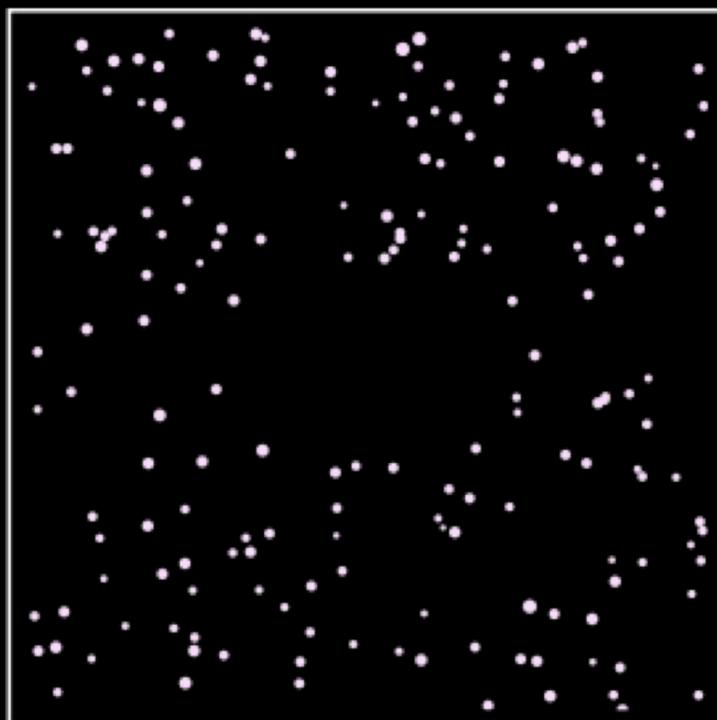
Weak Lensing

Misura della distribuzione di massa dell'ammasso dalla distorsione della forma delle galassie retrostanti

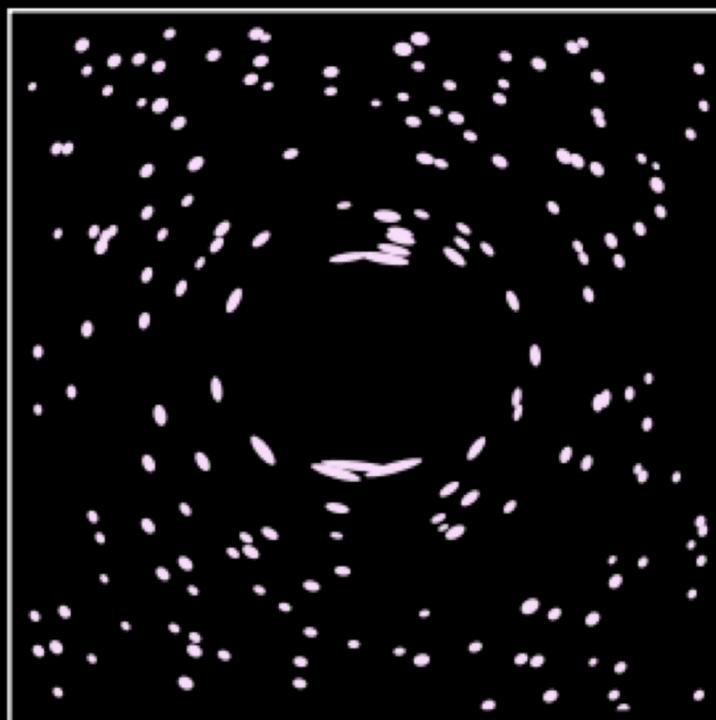


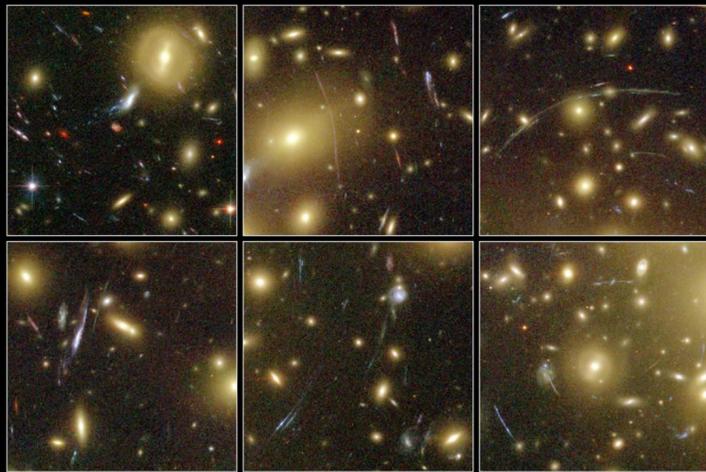
Without Shape Noise

Unlensed



Lensed





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

NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA • STScI-PRC03-01b

Dark Matter Map in Galaxy Cluster Abell 1689

HST ACS/WFC

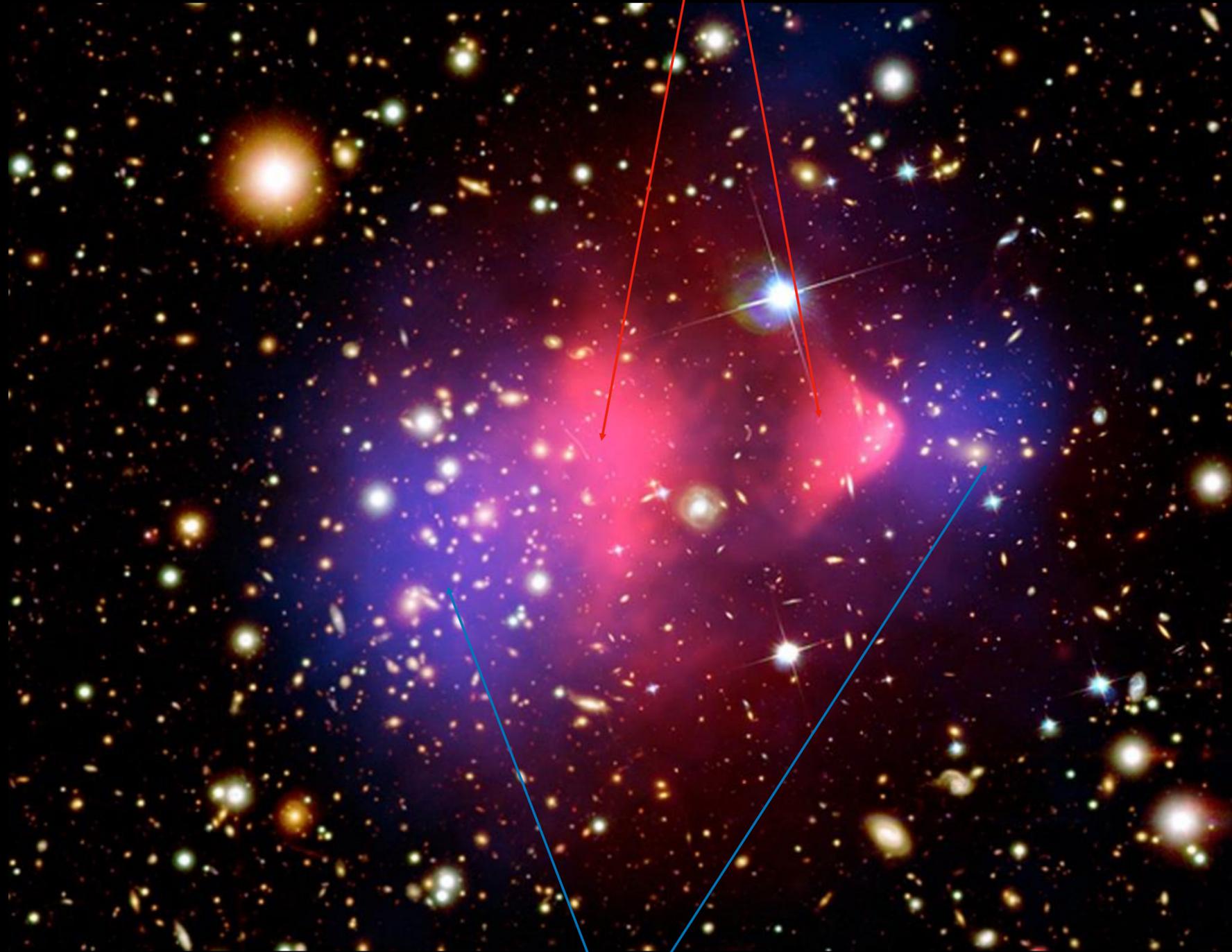


NASA, ESA, and D. Coe (JPL/Caltech and STScI)

STScI-PRC10-37

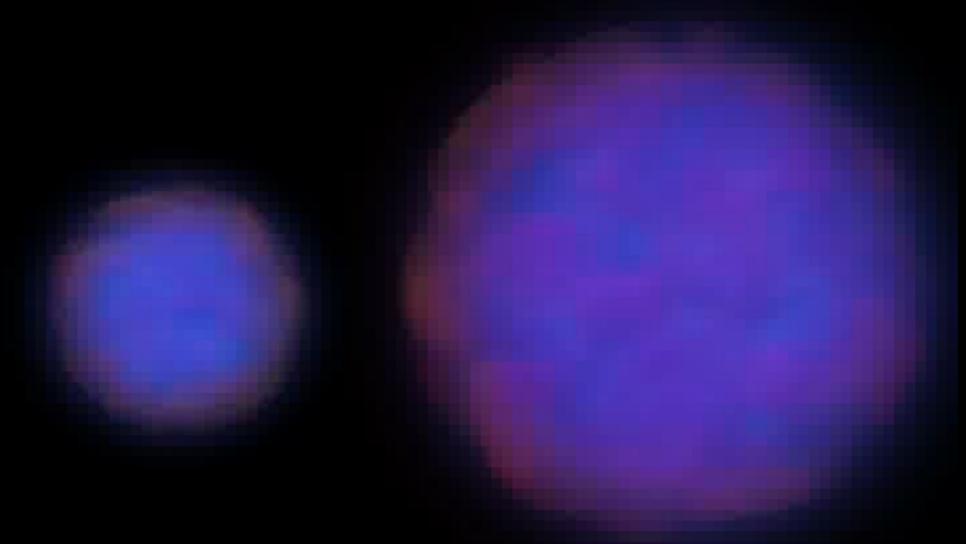
Bullet Cluster

Gas (emissione raggi X)



gravita' (lensing gravitazionale)

L'intensita' del campo gravitazionale non e' centrata sulla materia ordinaria (gas)



Proprieta' Osservative dell'Universo

- Struttura Universo: galassie, gruppi, ammassi strutture su grande scala: quantità' e scale rilevanti
- Scala di omogeneita' $\approx 100\text{Mpc}$, velocità' peculiari
- Osservazione espansione:
 - legge di Hubble. Fattore si scala. $H = \dot{a}/a$. Valore numerico $H_0 \approx 70\text{kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$
 - Tempo di Hubble $t_H \approx 14\text{Gyr}$ Raggio di Hubble $R_H \approx 4400\text{Mpc}$
- Radiazione fondo cosmico a Microonde
 - Fondo cosmici: densita' di fotoni e densita' di energia fotoni. Temperatura attuale $T_0 = 2.7\text{K}$;
 - Evoluzione temperatura $T \propto 1/a$
 - Ricombinazione: epoca $a \approx 1350$ quando $T \approx 3500\text{K}$
- Componenti: Radiazione (fotoni), materia ordinaria (barioni), materia oscura
 - Densita' numerica barioni \ll Densita' numerica fotoni ($\sim 10^{-9}$) rapporto $\eta = n_B/n_R \approx 10^{-9}$
 - Materia oscura: rapporti M/L crescenti con scala: $M/L \sim 10 \rightarrow M/L \sim 100$