

# *Materia Oscura*

*la chiave di lettura dell'infinitamente  
grande e dell'infinitamente piccolo*

*F. Di Pompeo*

*(Laboratori Nazionali del Gran Sasso)*

# Outline

## ★ Evidenze dell'esistenza di Materia Oscura

- Galassie
- Dinamica degli Ammassi
- Lenti Gravitazionali
- Scontri tra ammassi

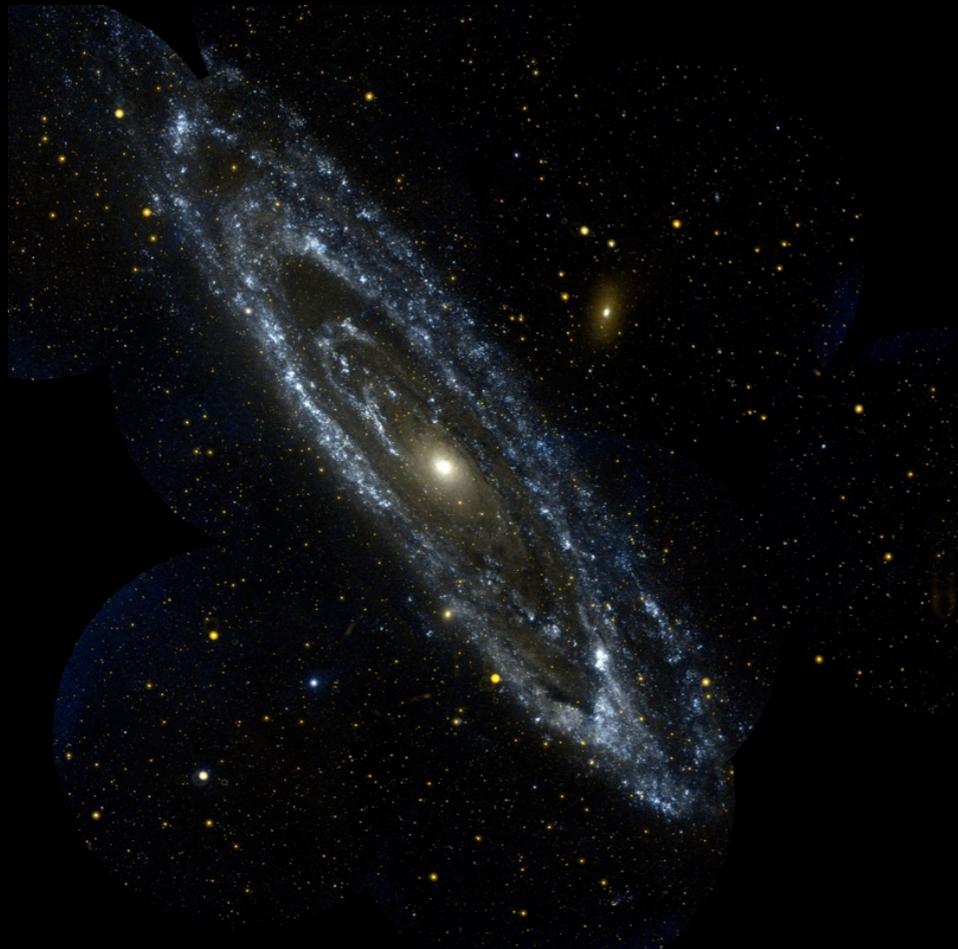
## ★ Rivelazione diretta di Materia Oscura

- Generalità
- Un esempio: l'esperimento WArP

*Galassie*

# Galassie

Con il termine galassia ci si riferisce a un sistema legato gravitazionalmente costituito da stelle, gas interstellare, polveri e, probabilmente, materia oscura.



Tipicamente le galassie hanno

**massa** -->  $10^6$  (nane) e le  $10^{12}$  (ellittiche giganti)  
masse solari

**luminosità**  $10^5 - 10^{11}$  luminosità solari

**diametri** dell'ordine **1-100** kiloparsec (kpc)

Classificazione delle galassie

forma (ellittiche, spirali o irregolari)

massa totale (giganti o nane)

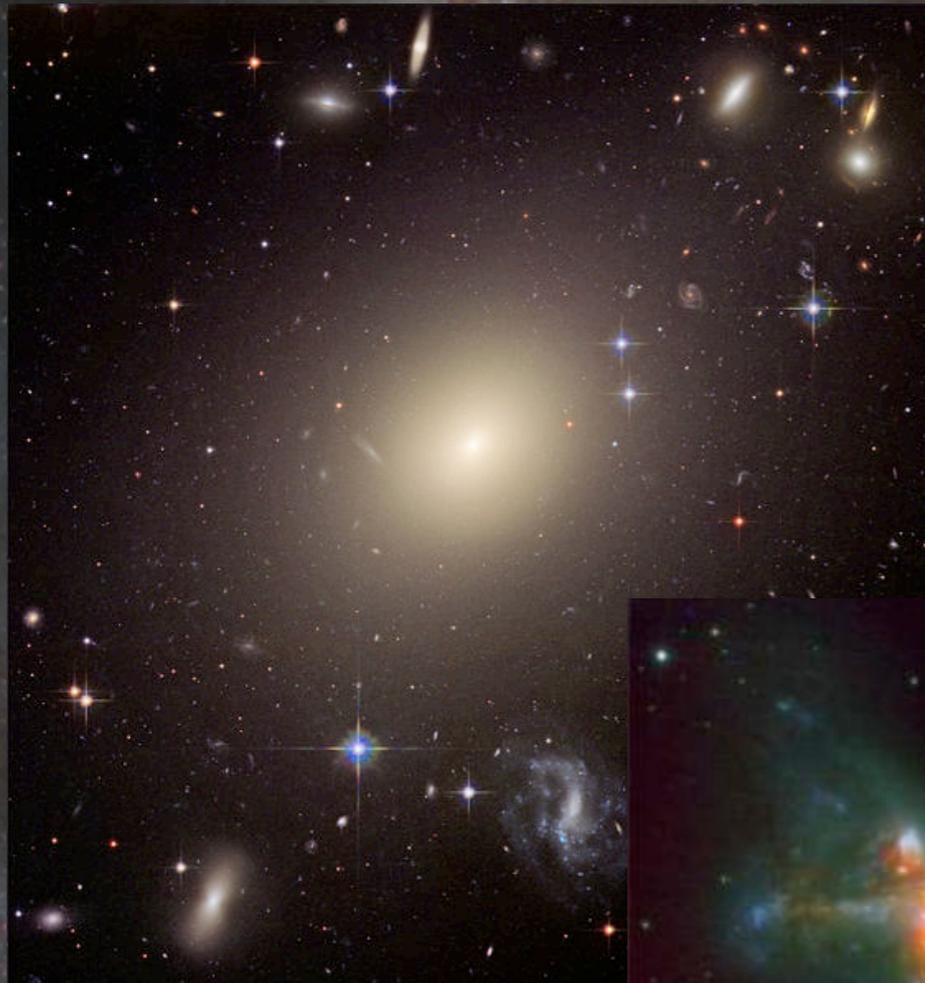
contenuto stellare (in inglese early o late type)

attività nucleare (radiogalassie, quasar ecc.)

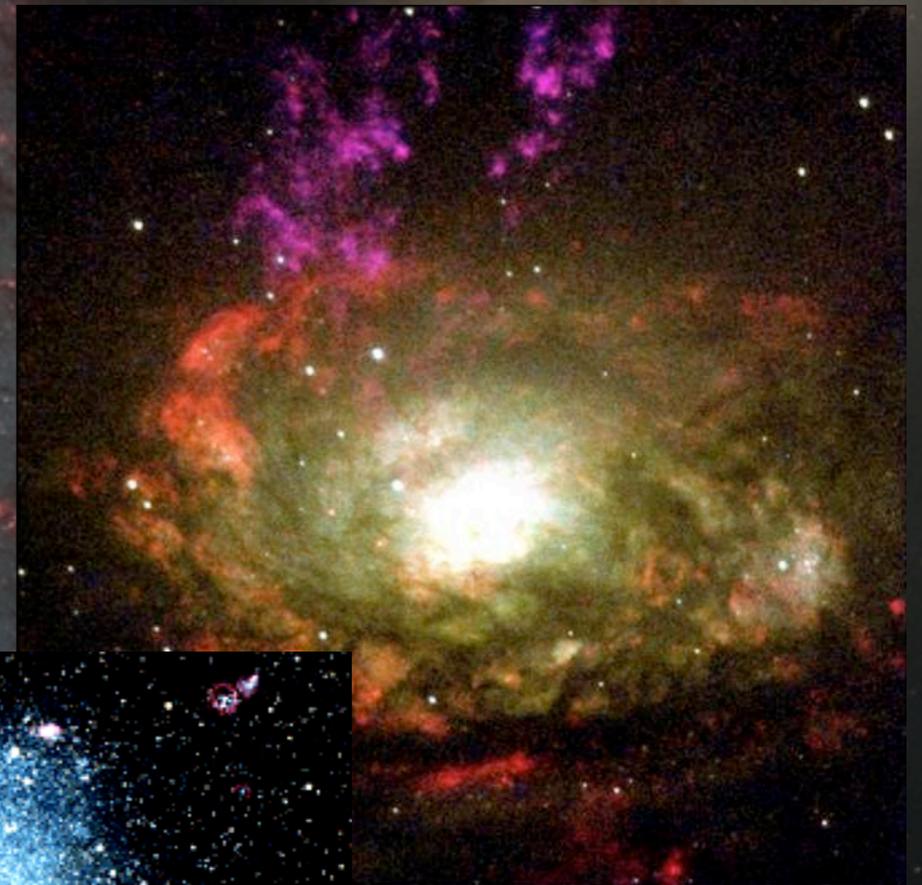


# L'Universo Osservabile: galassie

Galassie Ellittiche: da 10 milioni a 10000 miliardi di masse solari



Galassie Nane: fino a qualche miliardo di stelle



Galassie Irregolari



Scontri tra galassie

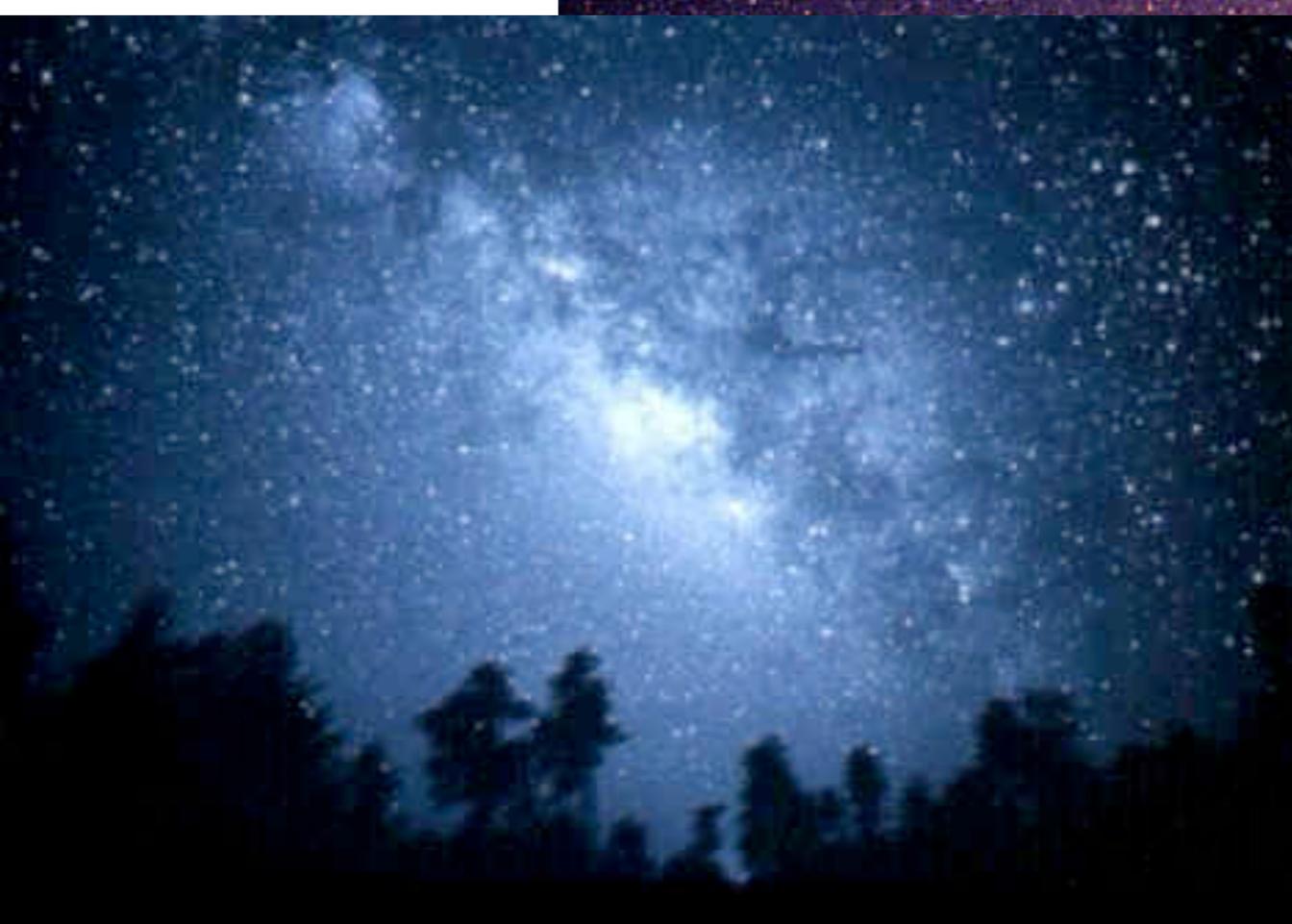


# The Milky Way



La nostra galassia è una spirale a bracci.

Guardando il cielo è possibile vedere le stelle appartenenti al disco.



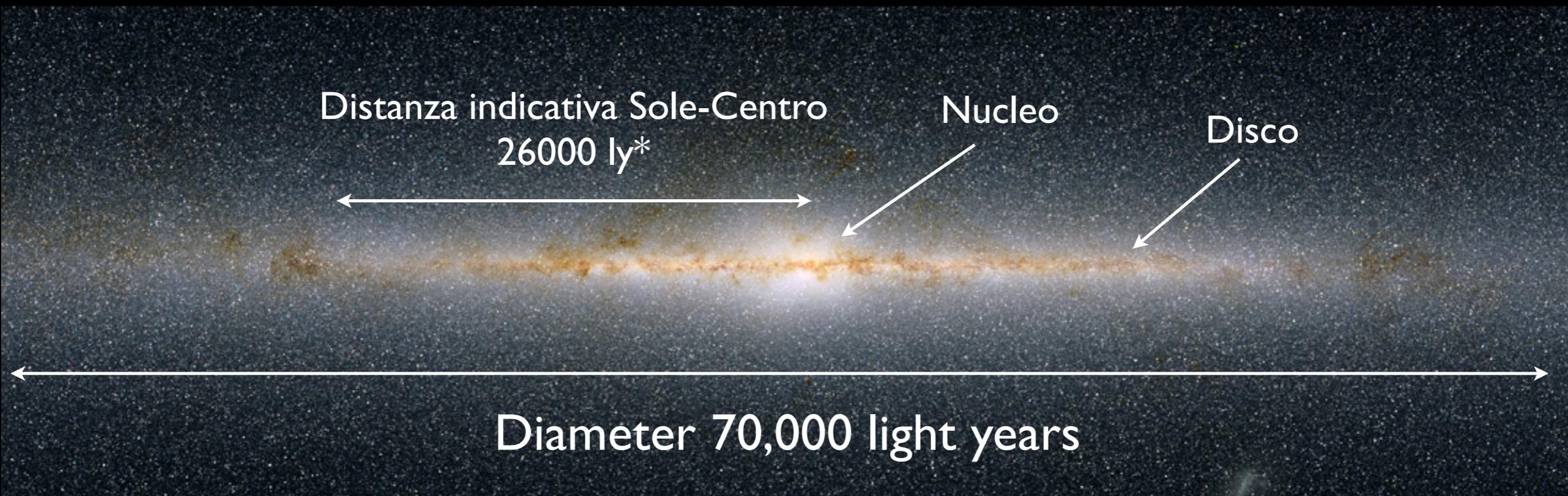
Il disco è più intenso nella direzione del sagittario, verso il centro galattico e contiene tra le 200 e 400 miliardi di stelle

# *The Milky Way*



# La Via Lattea

La nostra galassa è chiamata “Via Lattea” ed è una galassia spirale barrata.



- ✓ Tra 200 e 400 Miliardi di stelle
- ✓ Nel Nucleo galattico si sospetta l'esistenza di un Buco Nero supermassivo

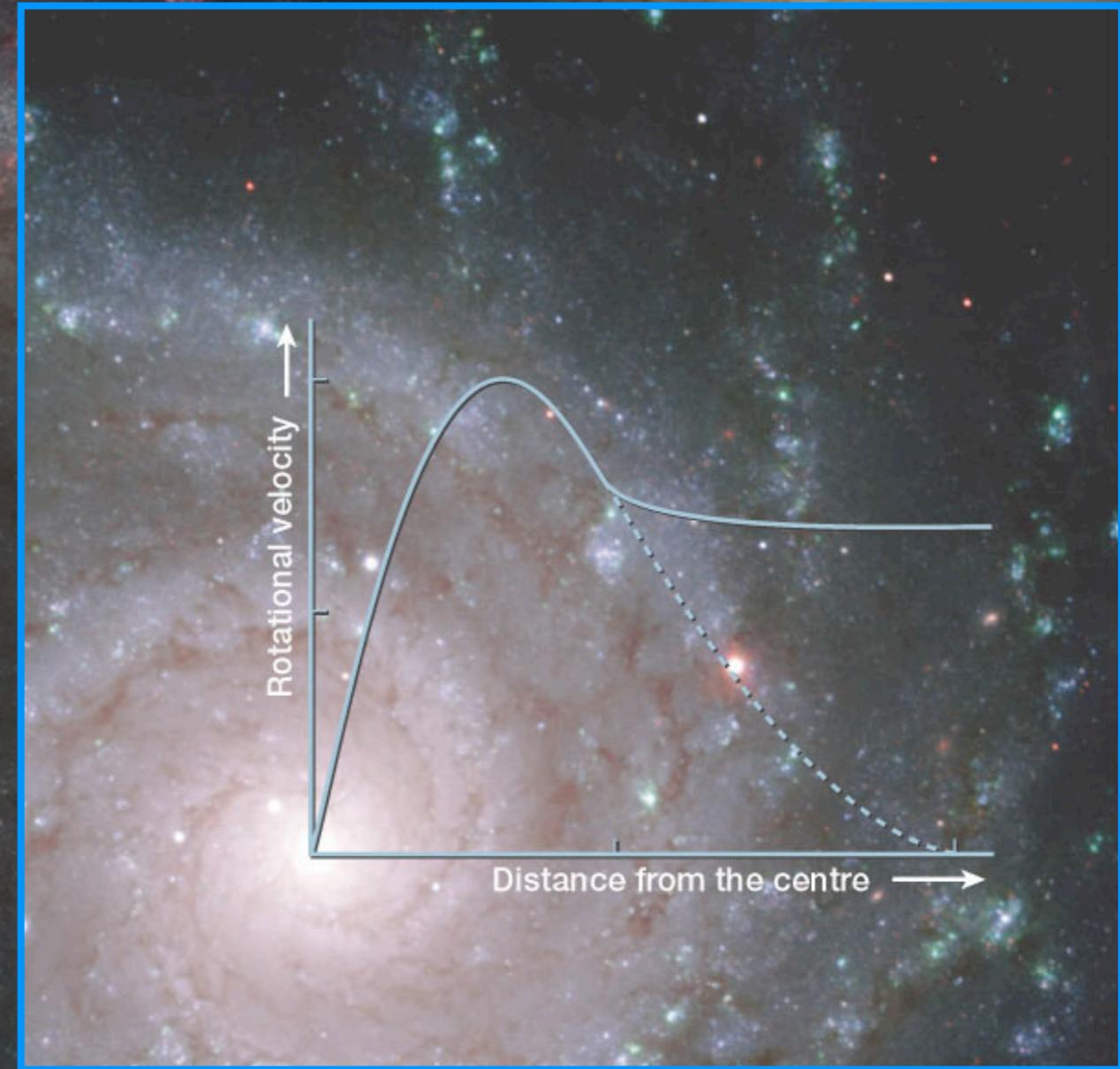
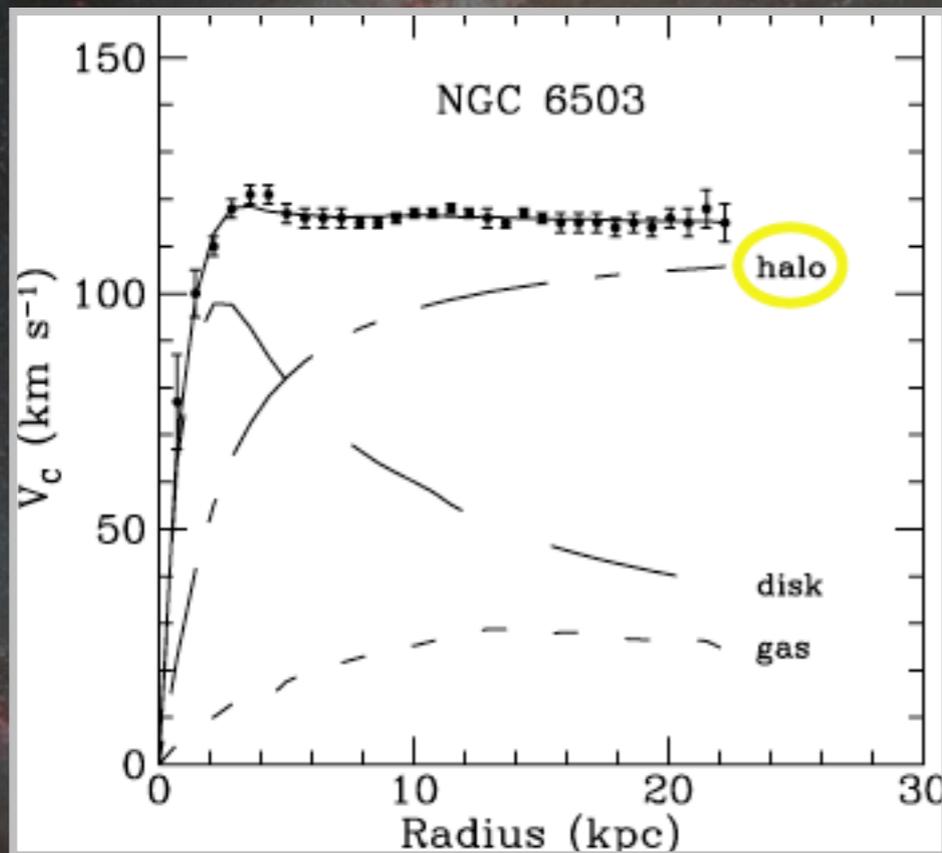
\*ovviamente il sole in realtà si trova perpendicolarmente al foglio, perchè la misura è fatta dalla terra

# L'Universo Osservabile: galassie - Curve di Rotazione

- La velocità che può possedere una stella senza sfuggire è

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

- Si misurano le velocità di rotazione delle stelle o dei gas di galassie a spirale



L'andamento piatto a grandi raggi non può essere spiegato con la materia ordinaria



presenza di una grande quantità di **materia non visibile** o **modifica della legge di gravità**

*Ammassi di Galassie*

# L'Universo Osservabile: ammassi di galassie

Le galassie si raggruppano in sistemi gravitazionalmente legati detti “ammassi”

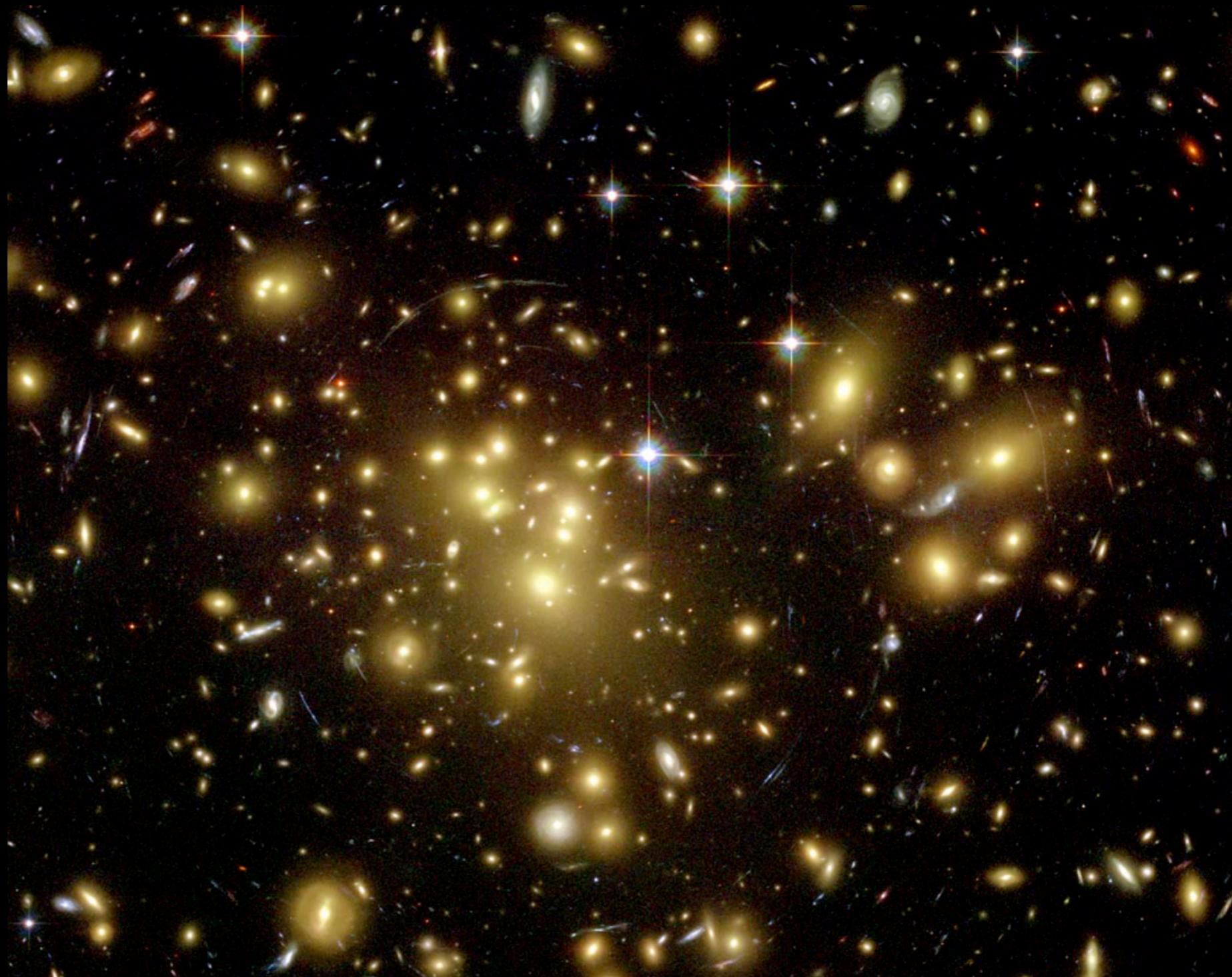
## Contenuto

- i. da decine\* a migliaia di galassie
- ii. Gas emettente raggi-x
- iii. Grande quantità di Materia Oscura

Diametri da 2 a 10 Mpc

Velocità delle galassie tra 800-1000 km/s.

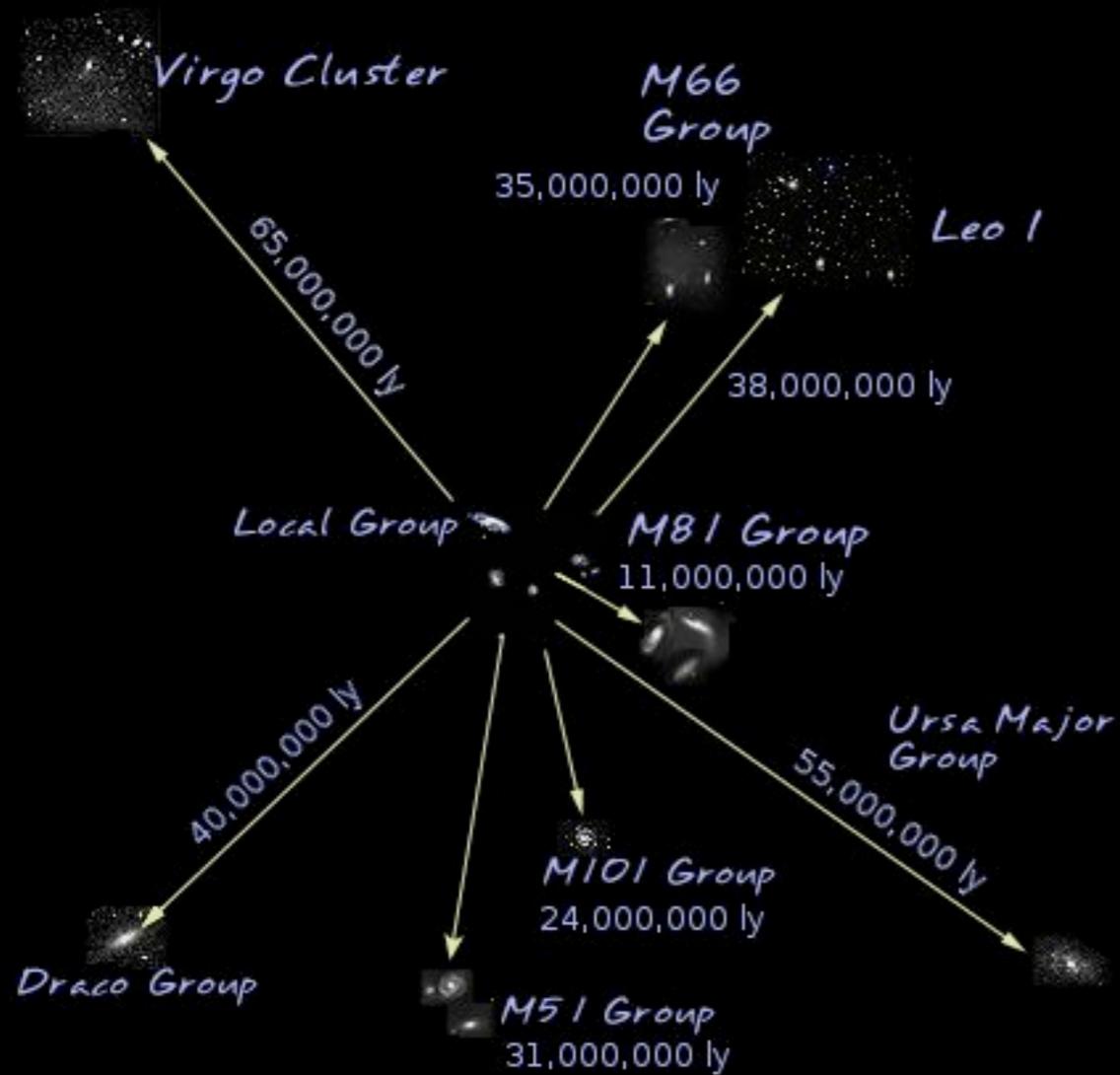
\* sotto 50 spesso si parla di gruppi



# Il Gruppo Locale

La via lattea domina il cosiddetto Gruppo Locale assieme ad Andromeda anch'essa galassia a spirale gigante.

L'ammasso più numeroso tra i nostri vicini è Virgo, situato ad una distanza di 60 milioni di anni luce, contenente circa 2500 galassie.



Il nostro Gruppo Locale fa parte di un Super Ammasso del quale Virgo è il membro dominante



# L'Universo Osservabile: ammassi-misure di massa

La massa di un ammasso si può stimare misurando le velocità delle galassie che lo compongono.

Approssimativamente l'energia cinetica media dell'ammasso deve essere metà energia gravitazionale.

Le misure indicano la presenza di una massa circa 10 volte maggiore di quella visibile.

## Coma Cluster



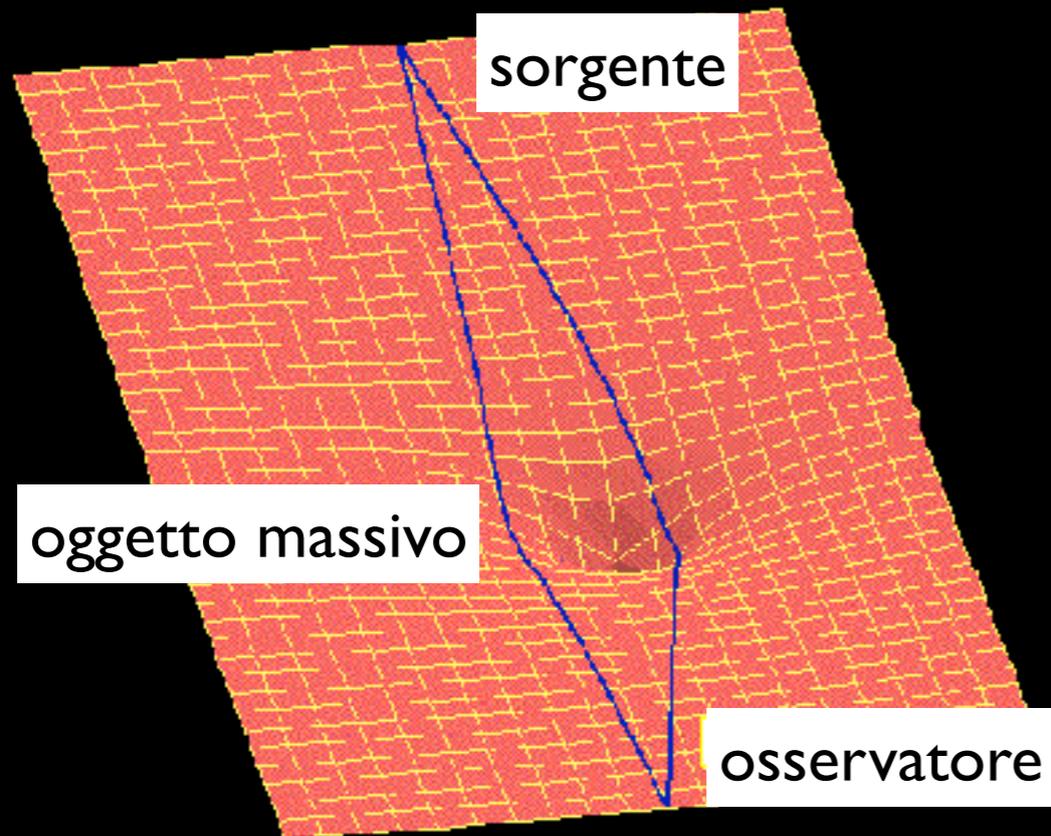
$M/L \sim 300$

Total Mass =  $1.6 \times 10^{15} M_{\odot}$  (Geller et al. 1999)

Total mass of galaxies  $\sim 7 \times 10^{13} M_{\odot}$

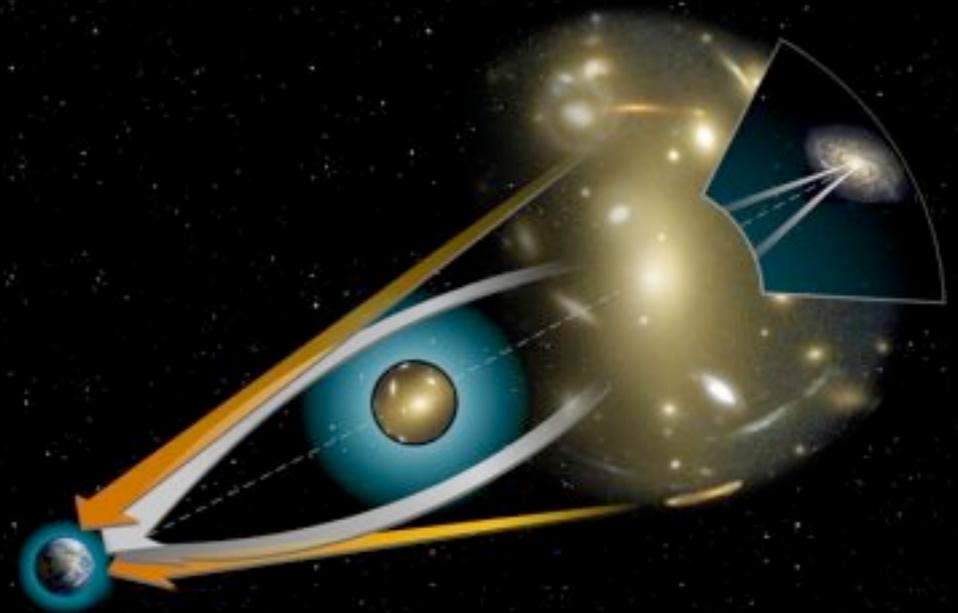
*Lenti Gravitazionali*

# L'Universo Osservabile: lenti gravitazionali

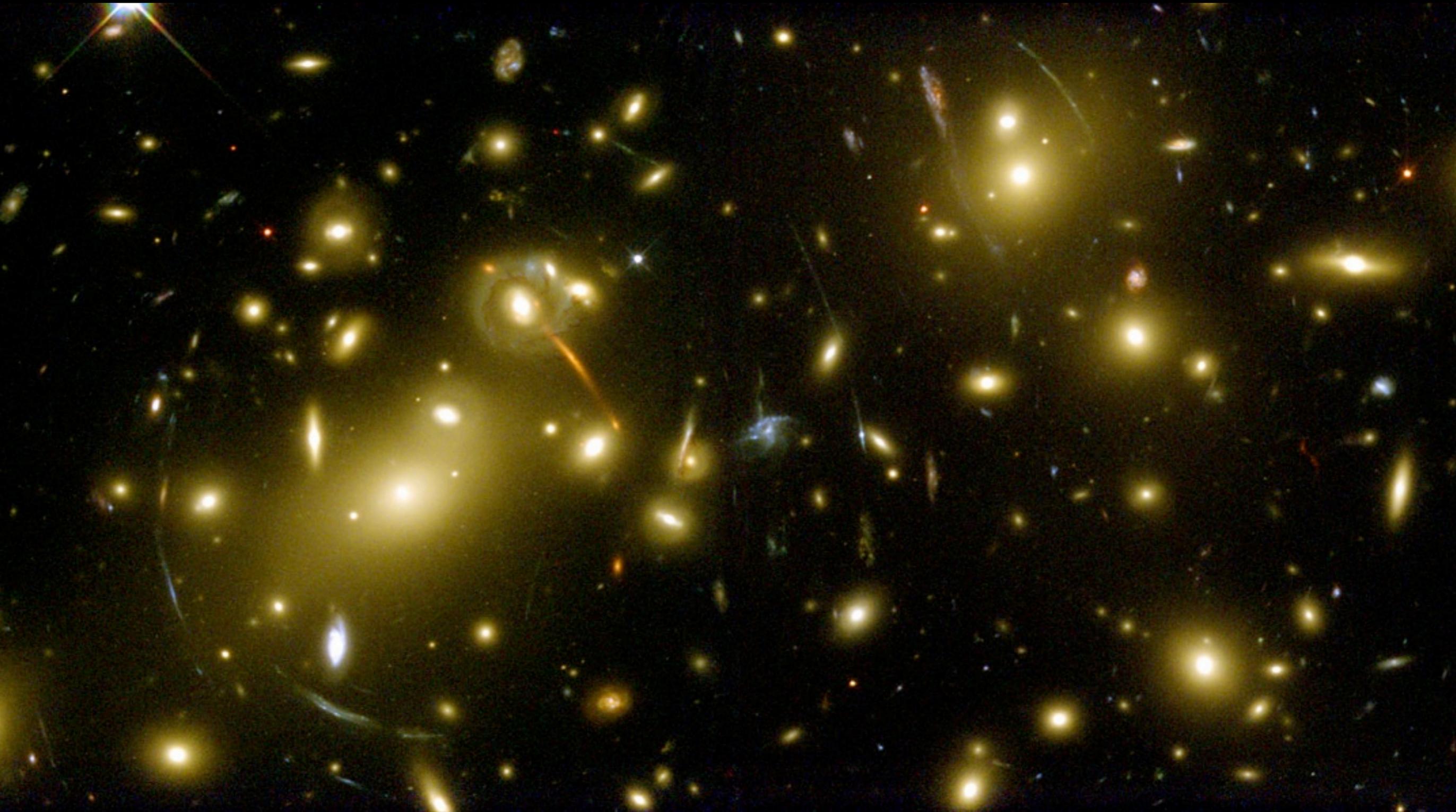


La curvatura dello spazio-tempo ad opera di un oggetto massivo posto tra l'osservatore e la sorgente induce una deflessione della luce. L'immagine si deforma.

Dalla "potenza" e dalla mappatura della distorsione si può risalire alla distribuzione di massa dell'oggetto che la provoca.



# Misure di massa di Ammassi

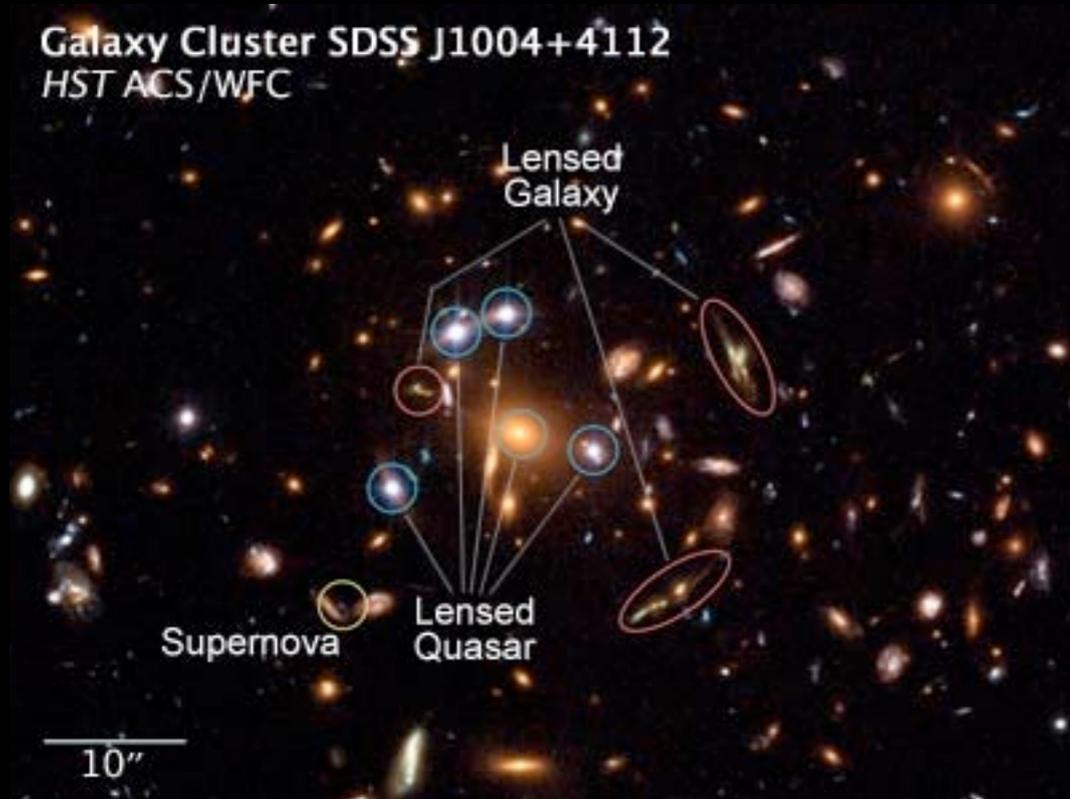


Le misure di lente gravitazionale su ammassi favoriscono di nuovo l'esistenza di Materia Oscura

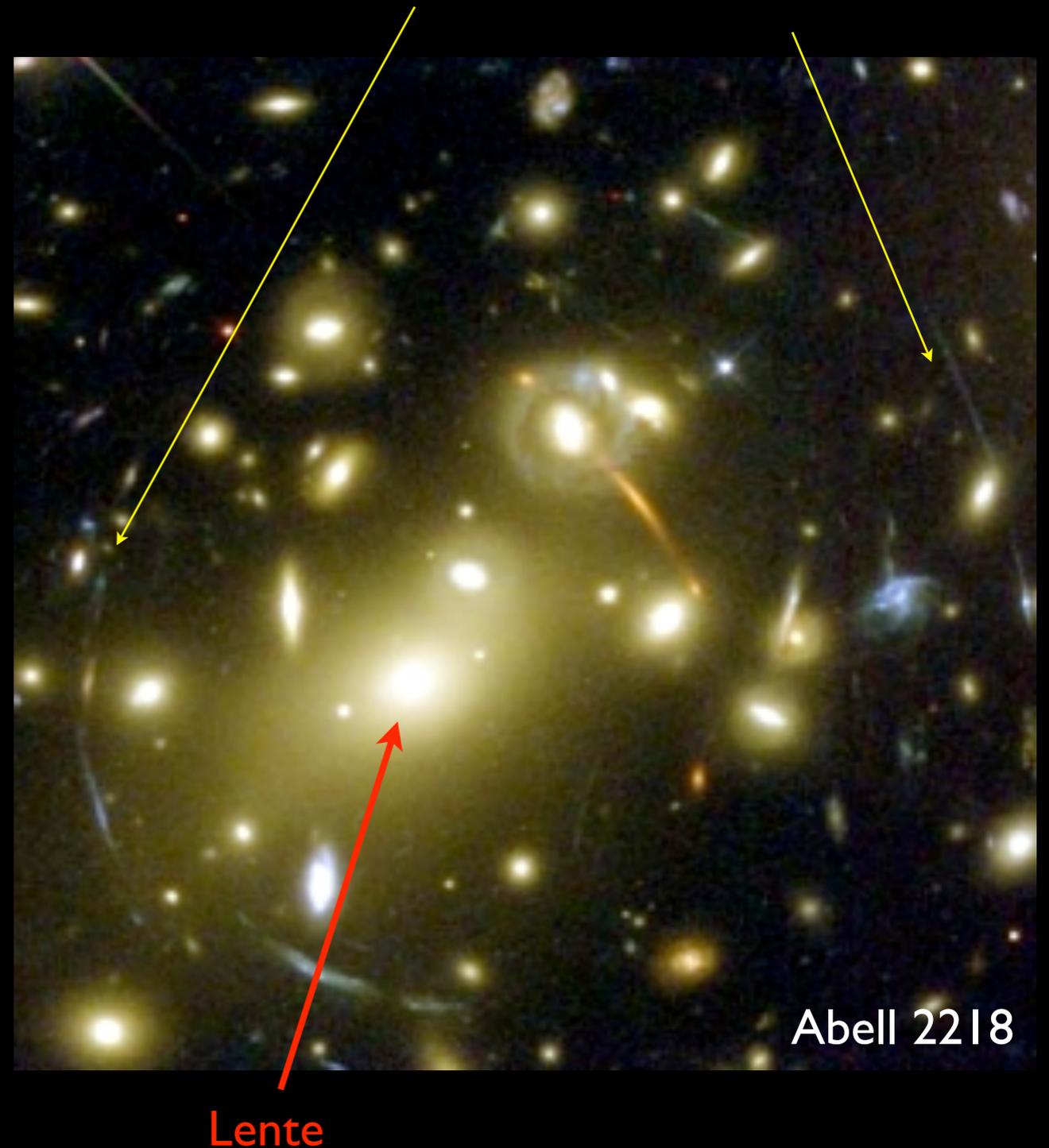
# DM: hint from non-dynamic measures

## Lenti Gravitazionali

Archi giganti di luce da galassie lontane, distorte e amplificate dal potenziale gravitazionale dell'ammasso

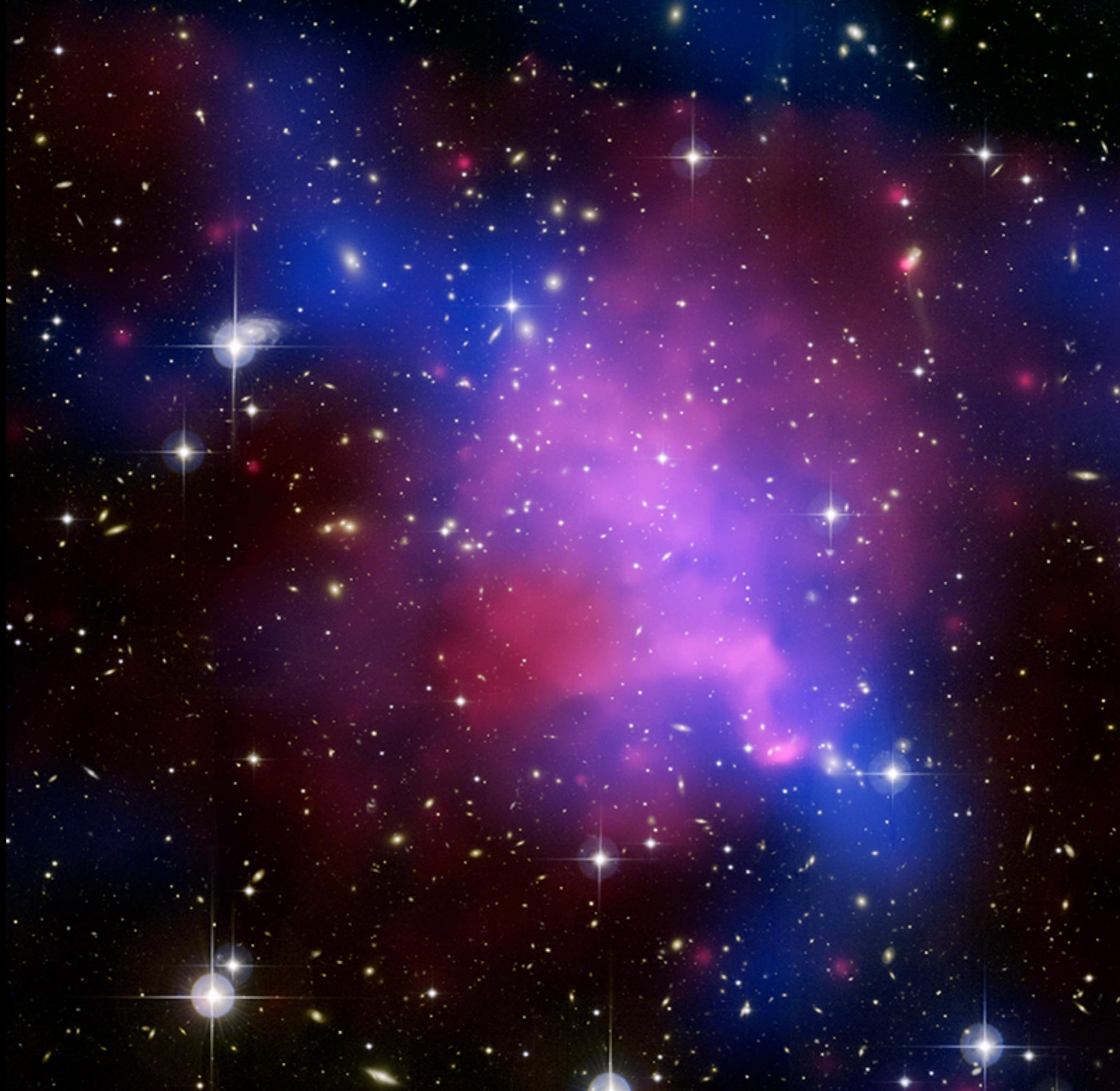


objects in which the visible baryonic and hypothesized dark matter are spatially coincident, as in most of the universe



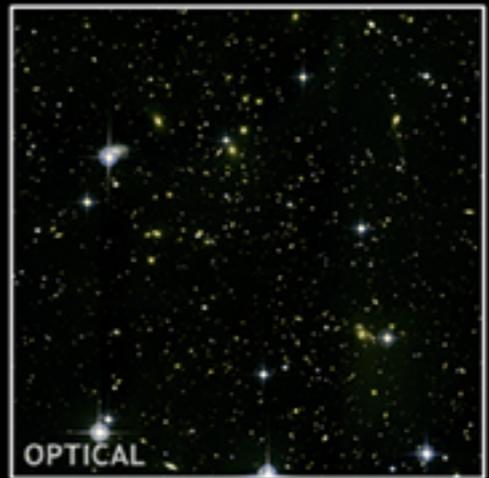
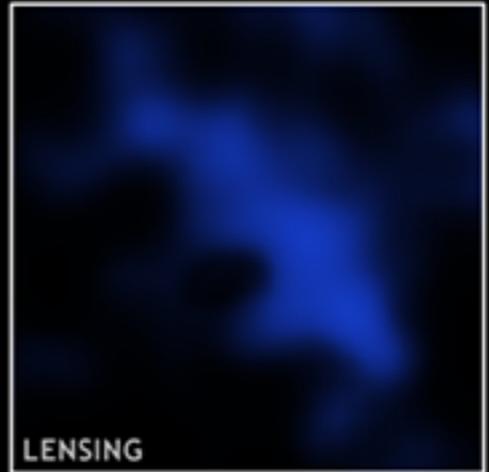
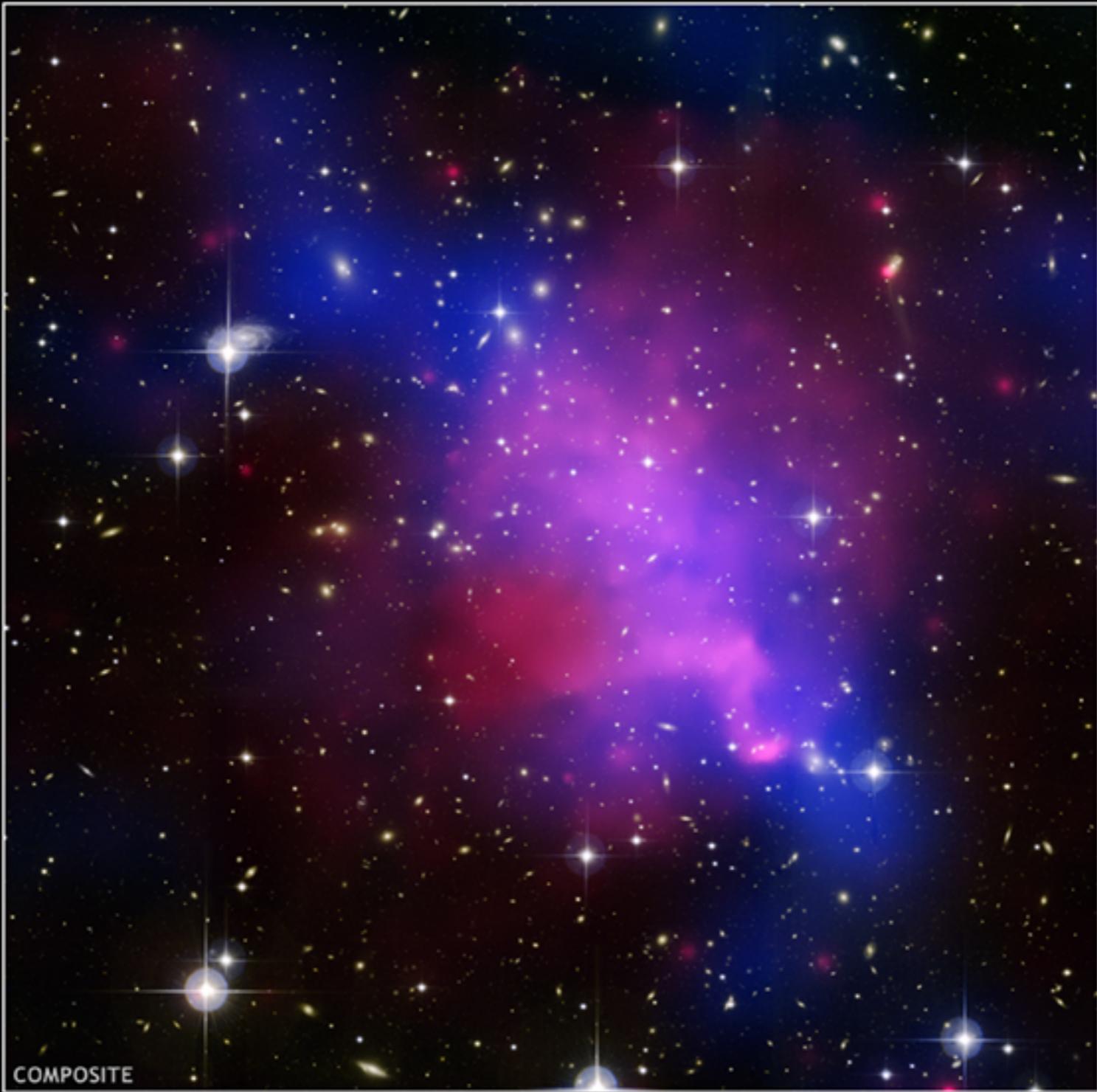
*Scontri tra Ammassi*

U.S. Astronomical Society



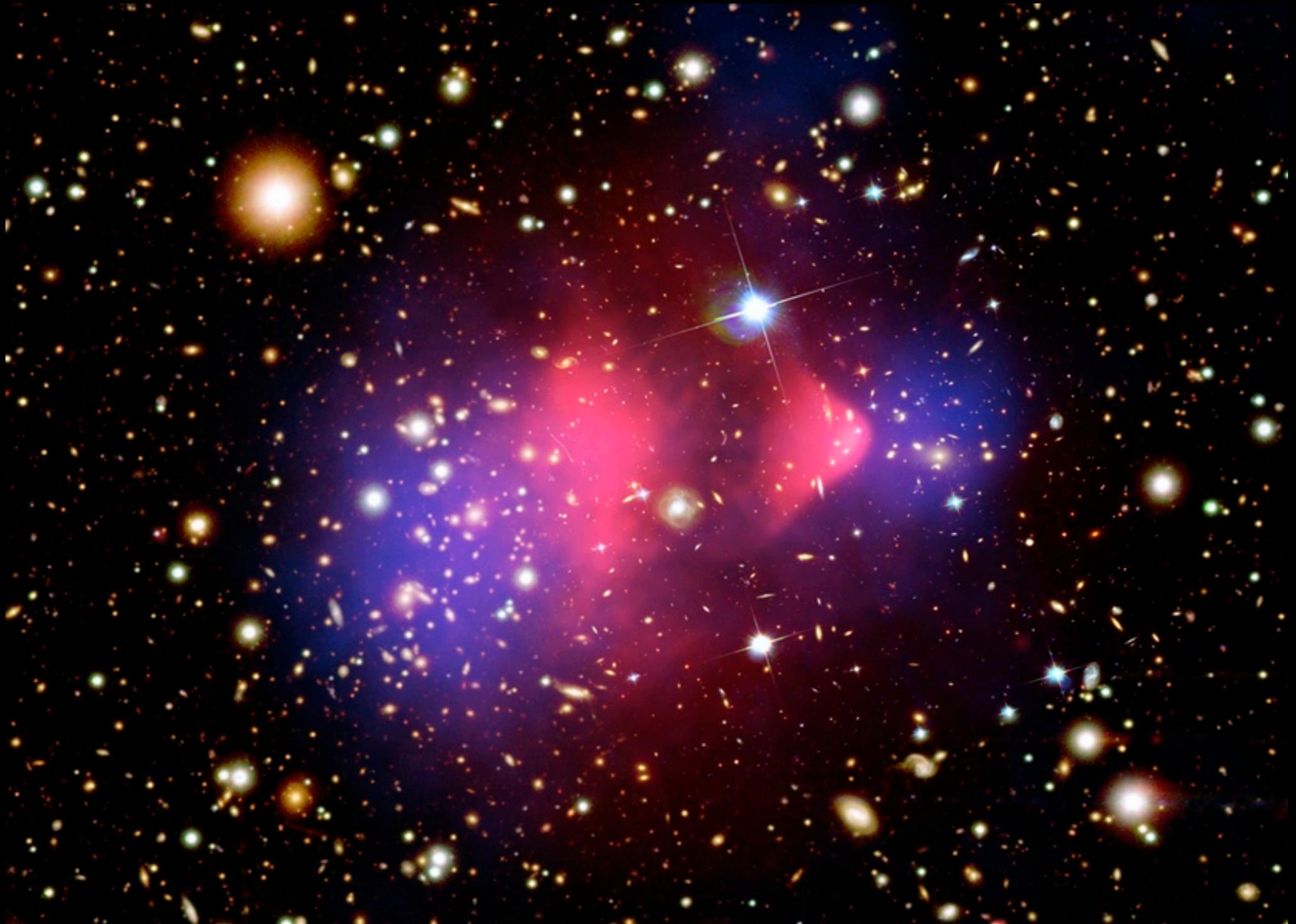
Abell 111

U  
C  
O  
S  
T  
I  
T  
U  
T  
E  
A  
M  
M  
A  
S  
S  
A  
C  
H  
U  
S  
E  
T  
S



A  
b  
e  
l  
l  
o  
n  
s

# Scontri tra Ammassi



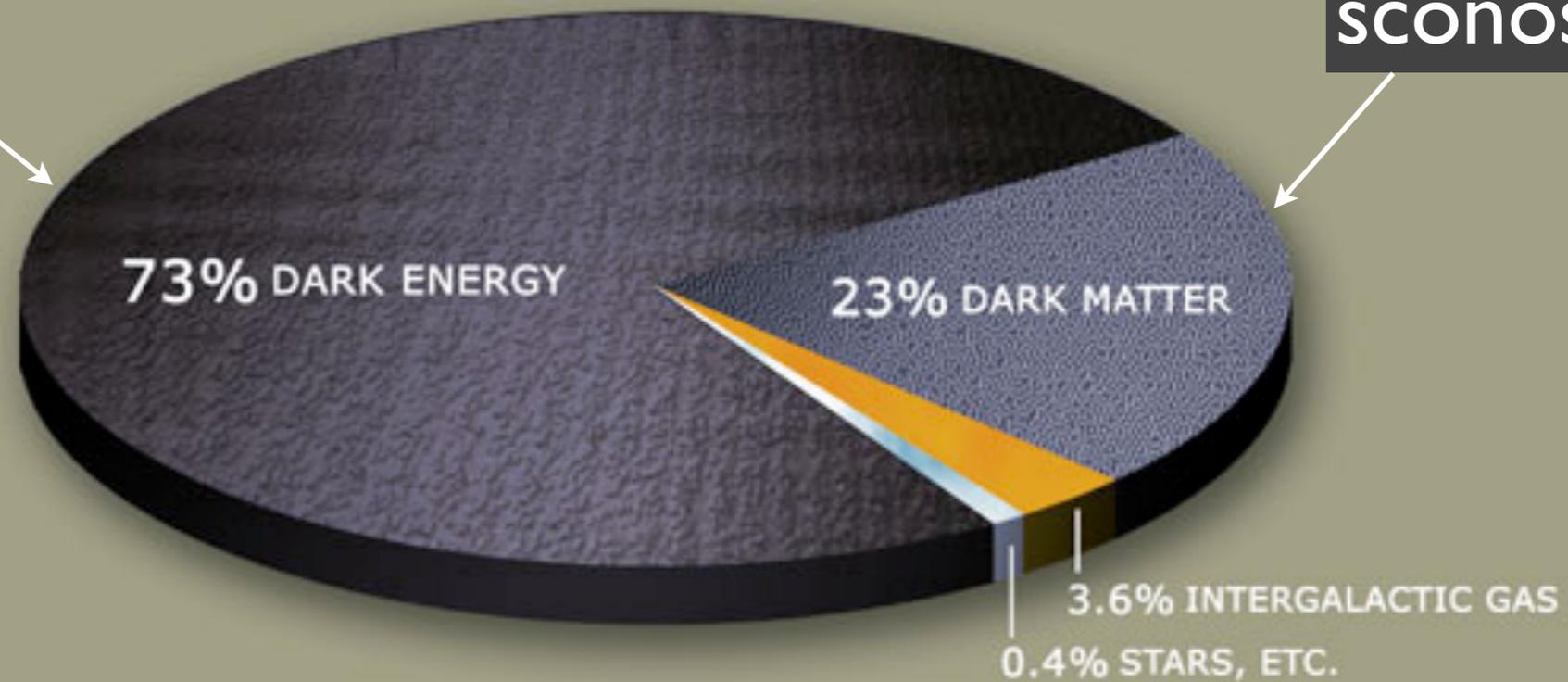
Bullet Cluster

Rimettere il Puzzle  
insieme

*più del 95% dell'Universo ci è sconosciuto!!!*

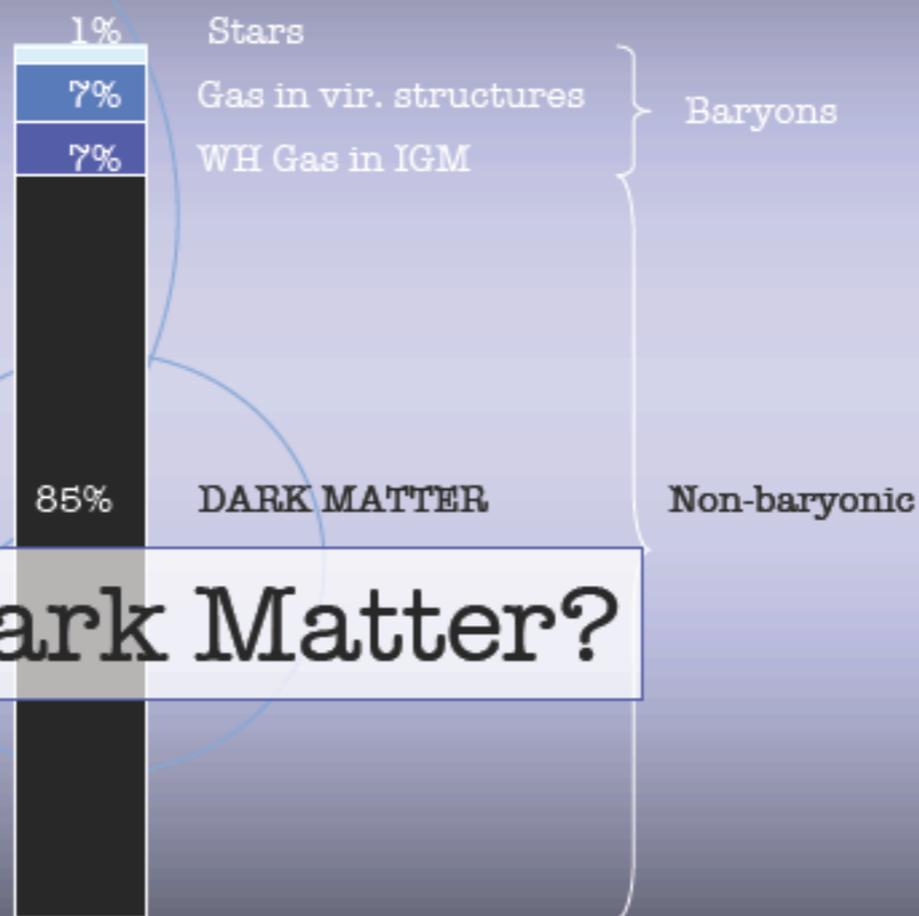
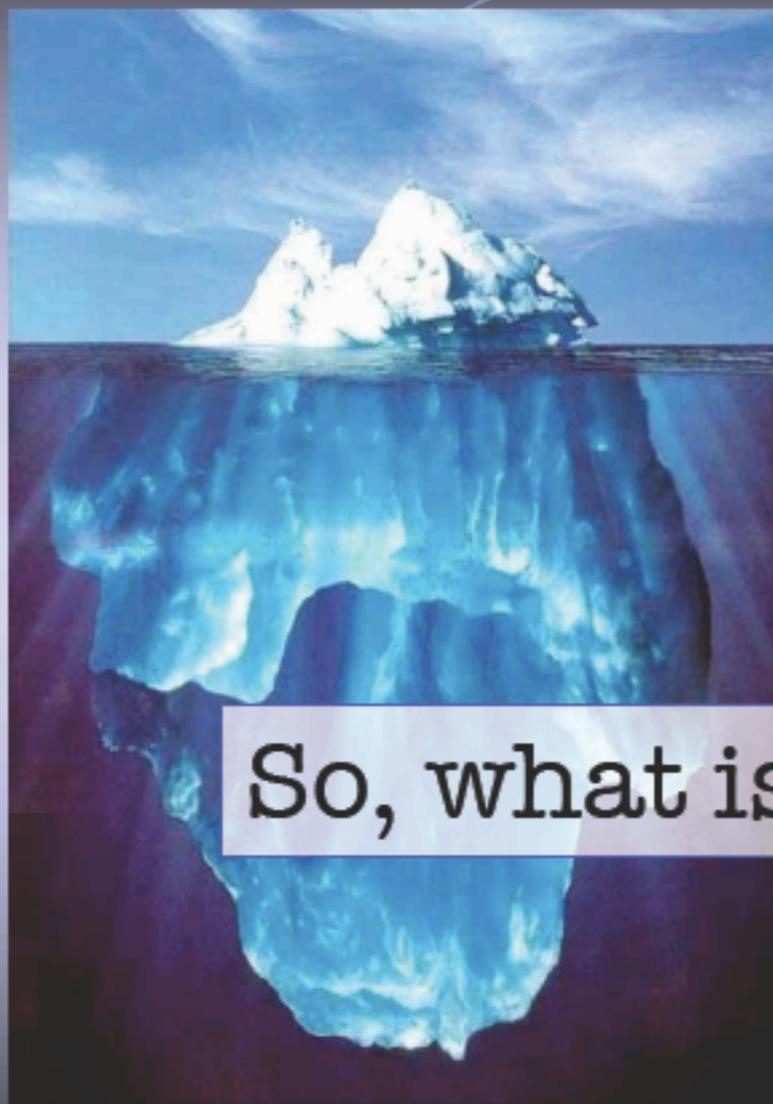
sconosciuta

sconosciuta



*compresa la natura della Materia Oscura*

# An Inventory of Matter in the Universe



So, what is Dark Matter?



# WIMP

Weak Interacting  
Massive Particle

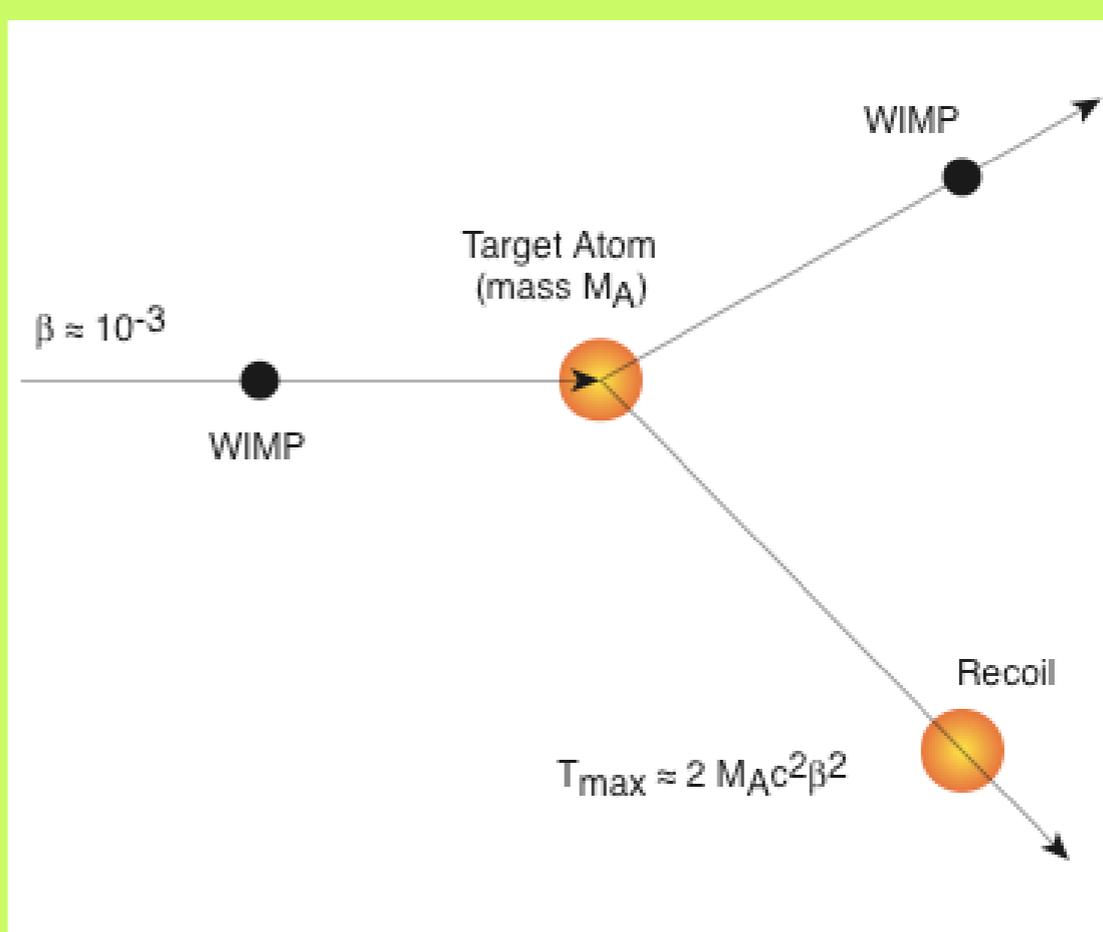
Una possibilità è che la materia oscura sia composta da Particelle Massive Debolmente Interagenti (WIMP)

Queste particelle risolverebbero anche questioni aperte legate all'estensione del Modello Standard

Le WIMP interagendo con i nuclei della materia ordinaria rilascerebbero energia che potrebbe essere rivelata



**L'energia è molto bassa e le interazioni poco probabili**



# Difficoltà nella rivelazione di WIMP

✓ Interazioni poco probabili



necessità di avere un esperimento con grande massa

✓ Interazioni a bassa energia dove esistono molti eventi di fondo dovuti alla radioattività naturale



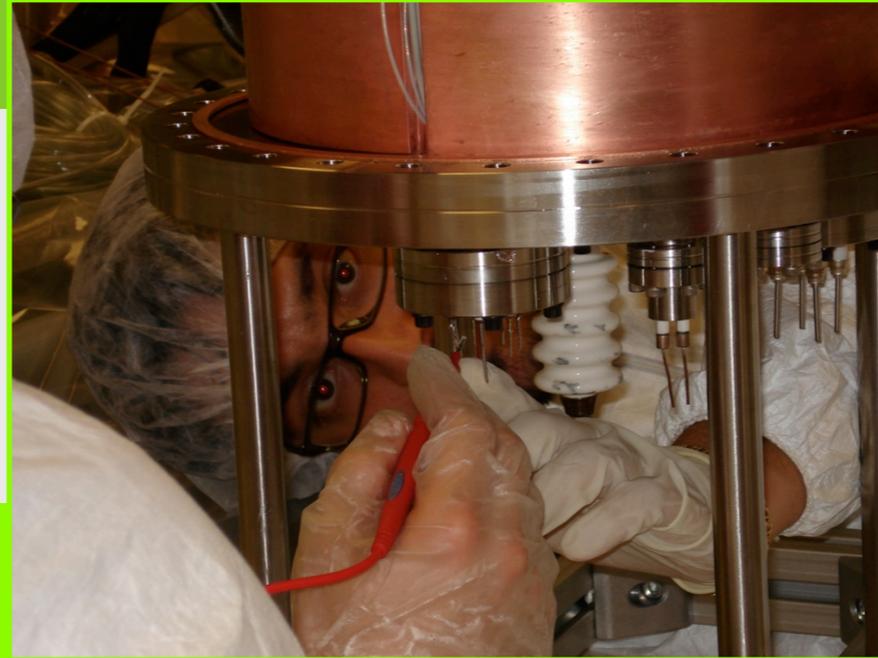
- sito underground
- purezza dei materiali
- schermi attivi e passivi
- tecniche di identificazione delle particelle

# Rivelazione di Materia Oscura al Gran Sasso

CRESST



WArP



Xenon

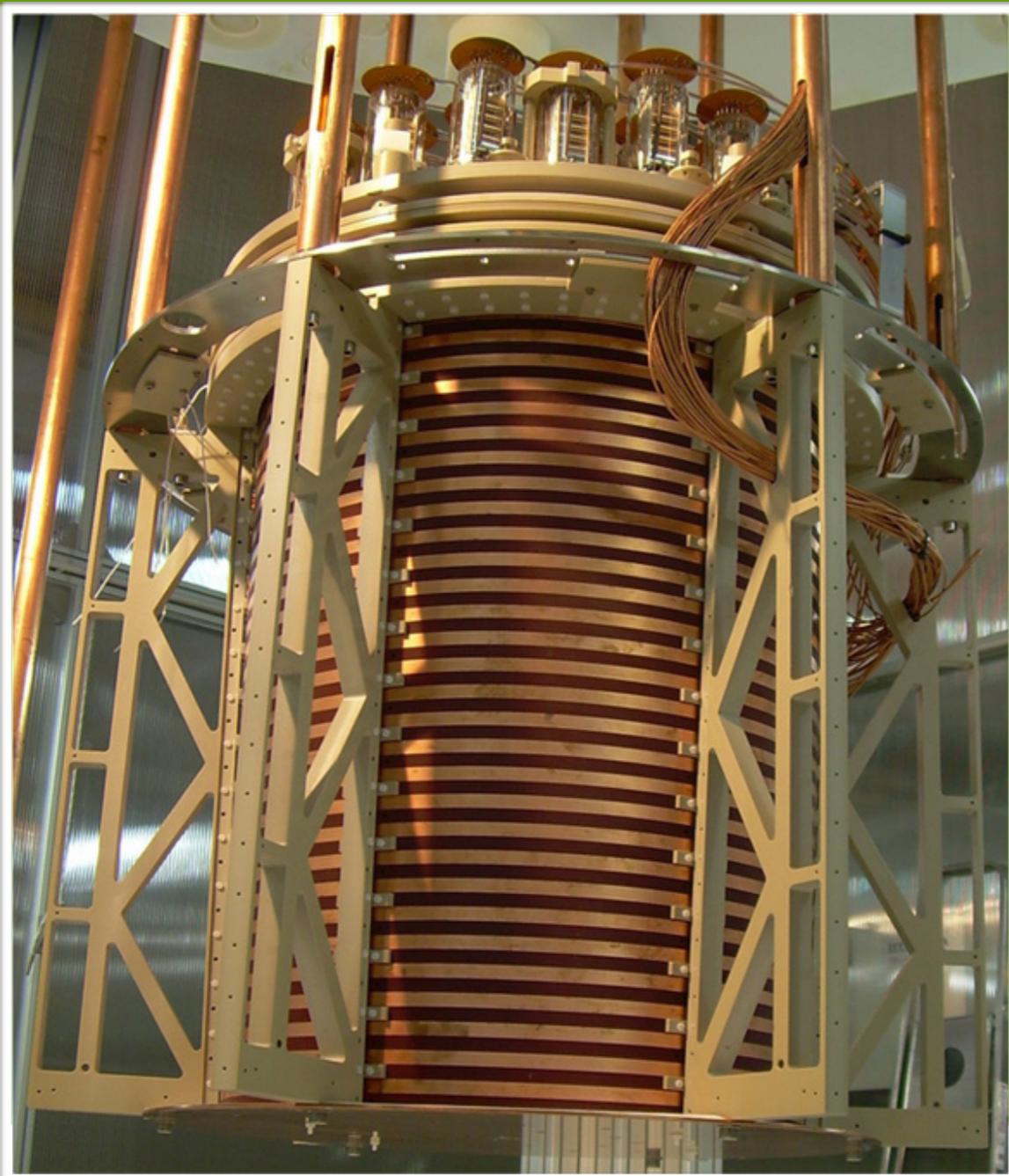


DAMA

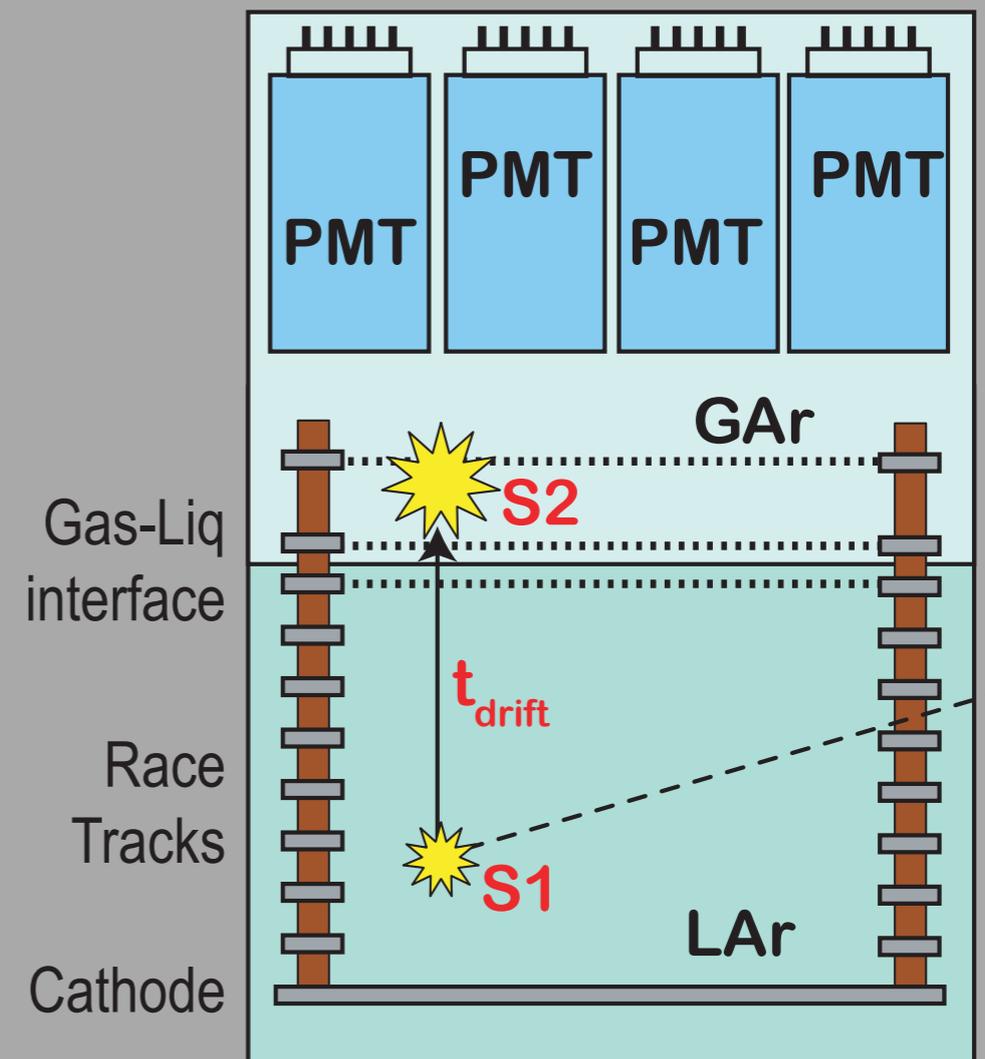
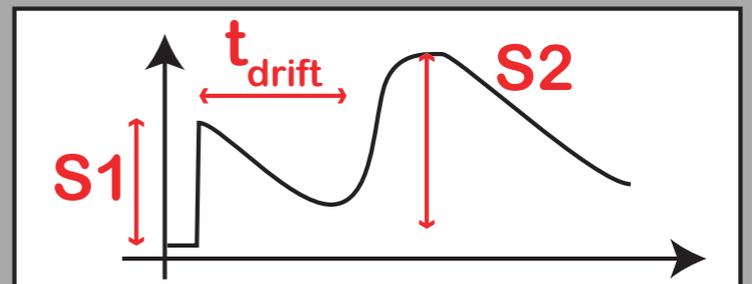


# un esempio: WArP

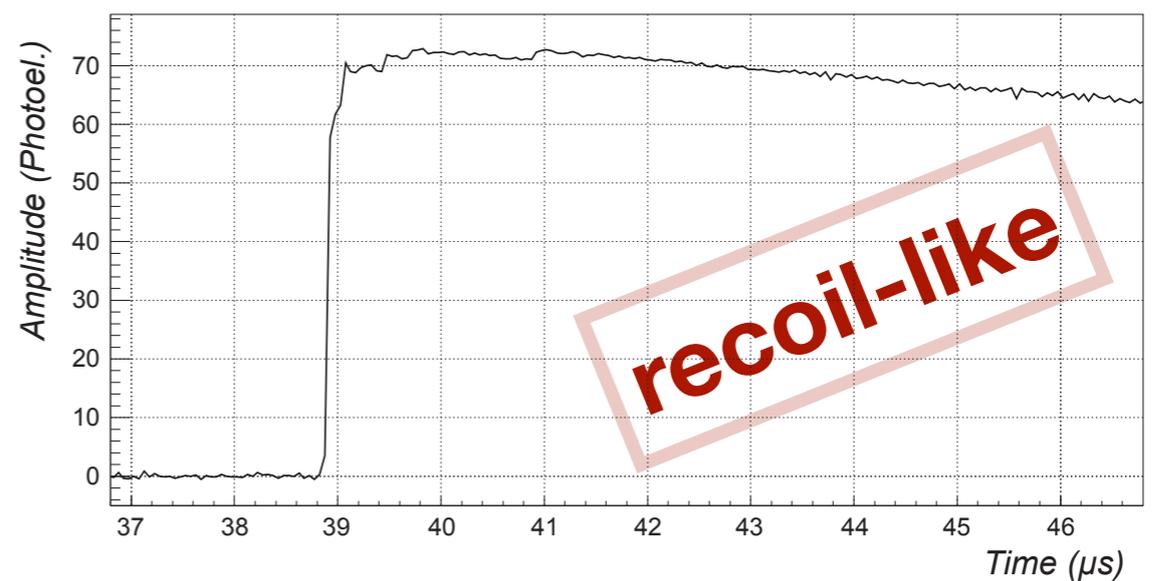
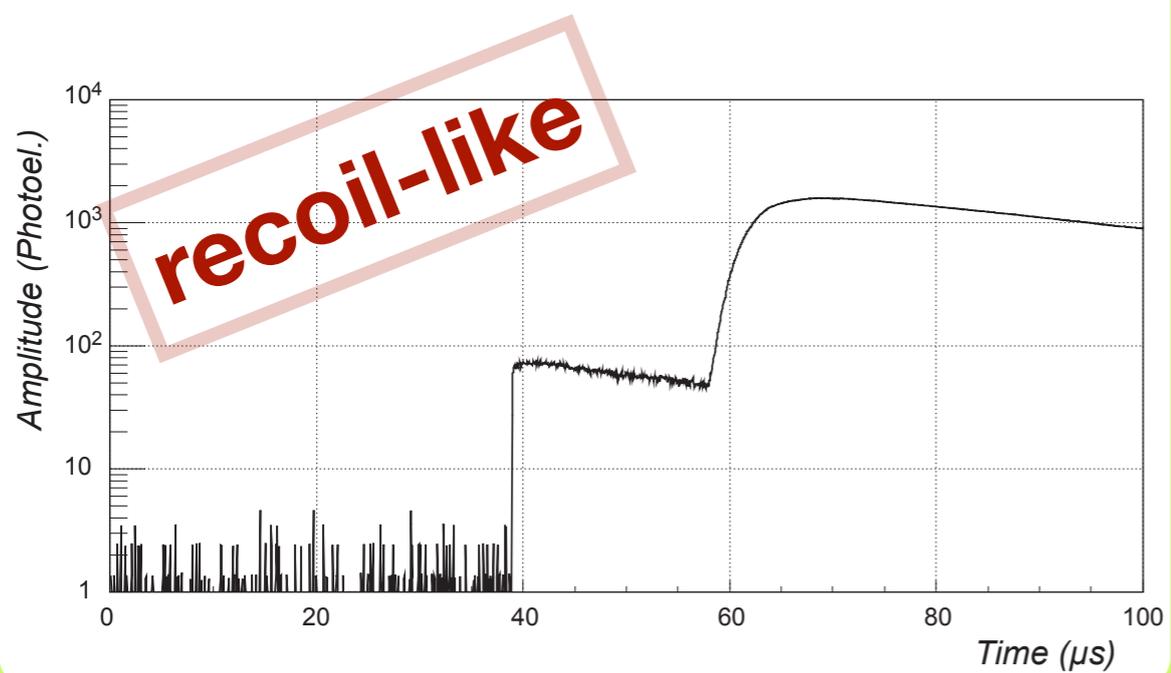
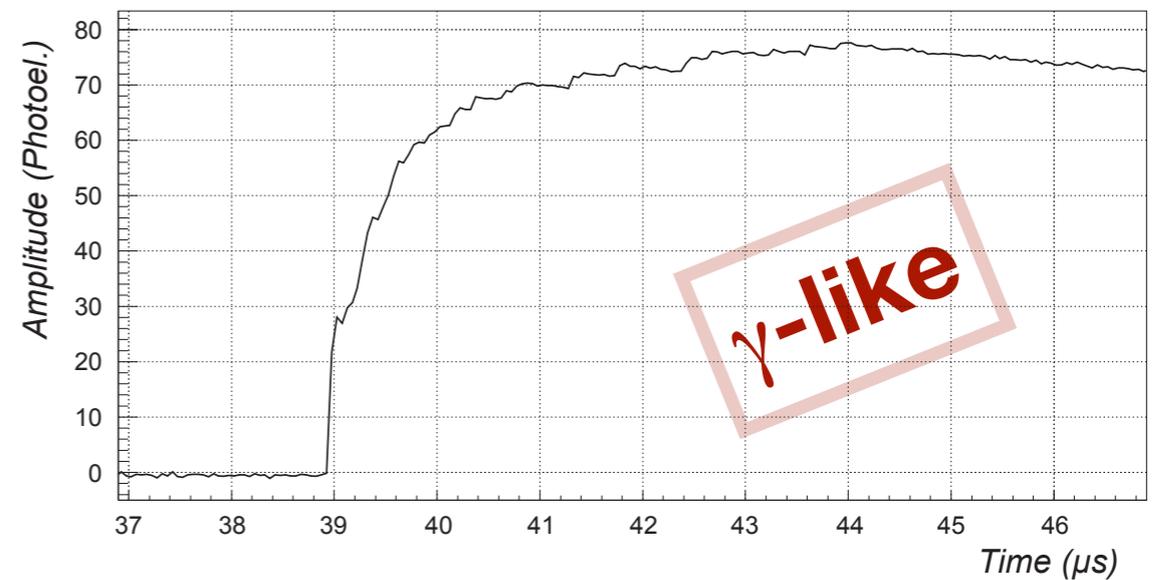
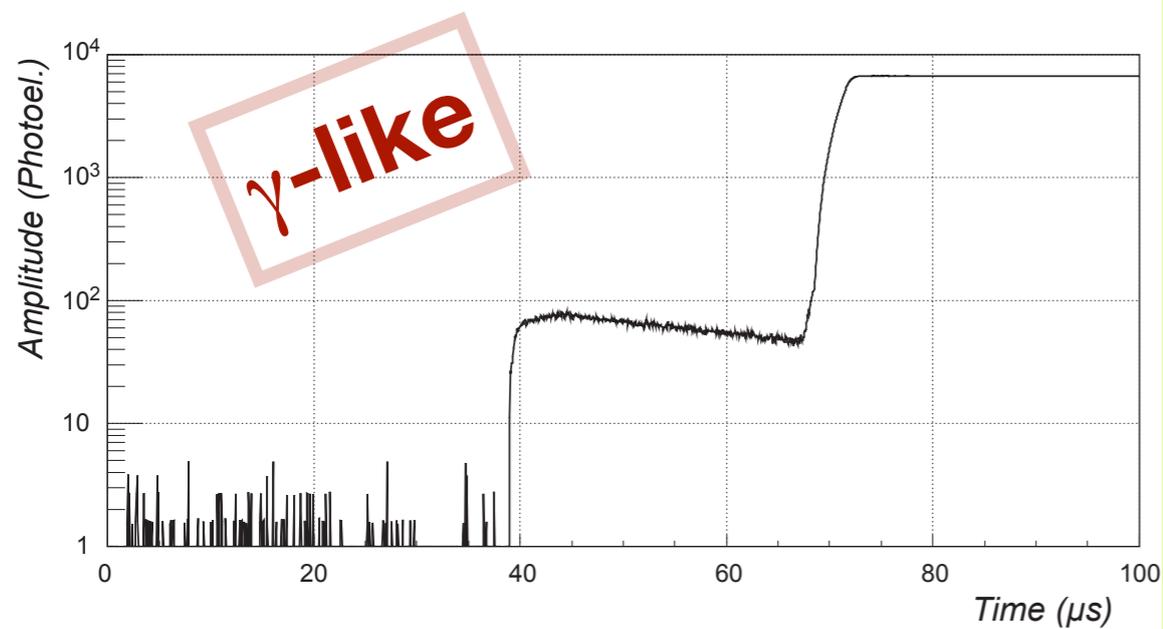
WArP 100



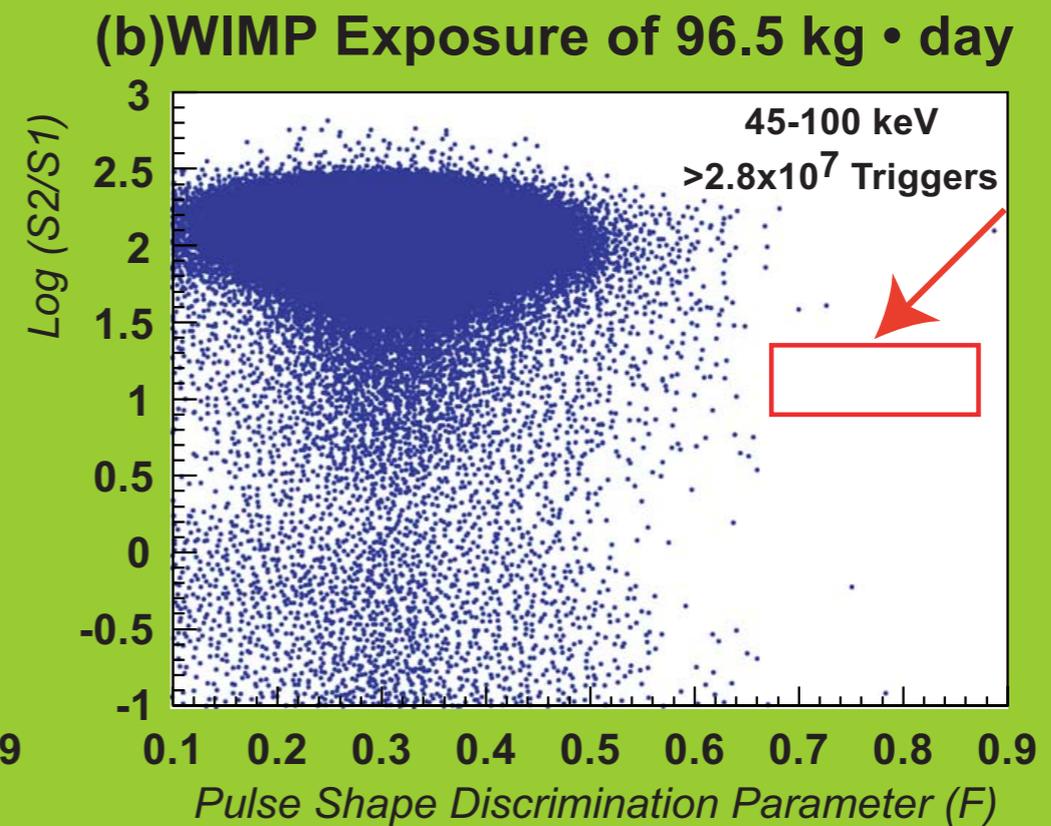
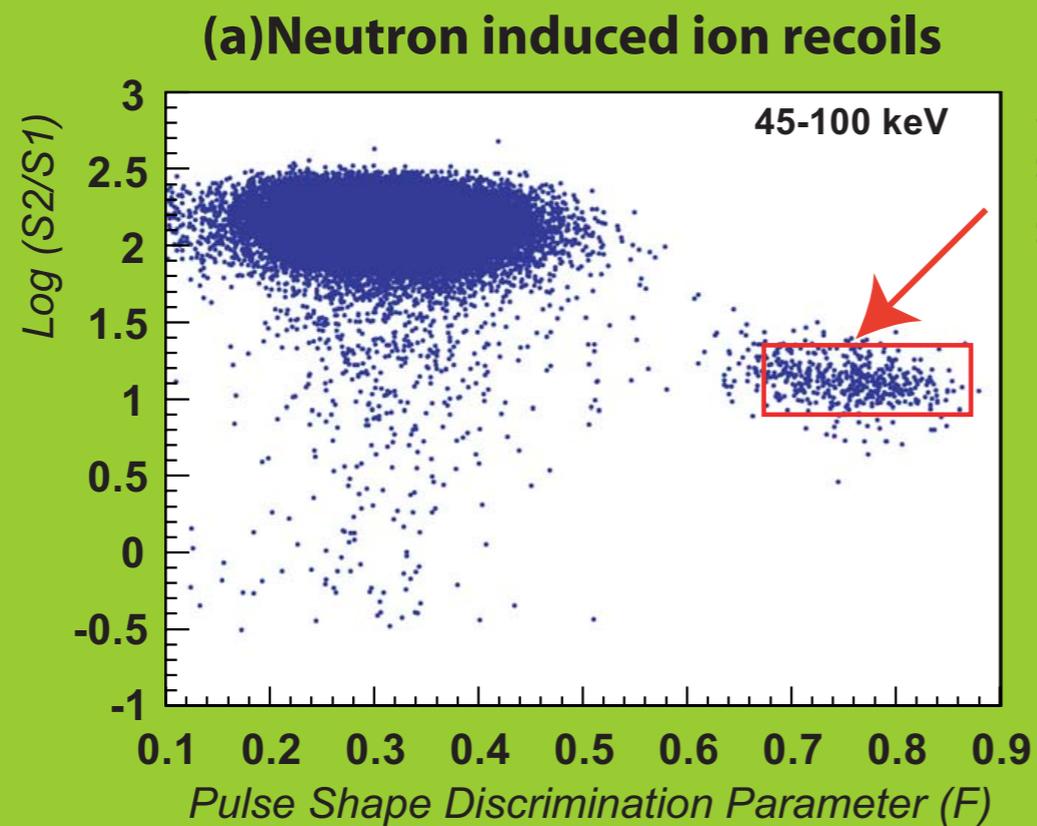
Integrated  
light  
signal



# Identificazione di particelle



# Discriminazione in WArP





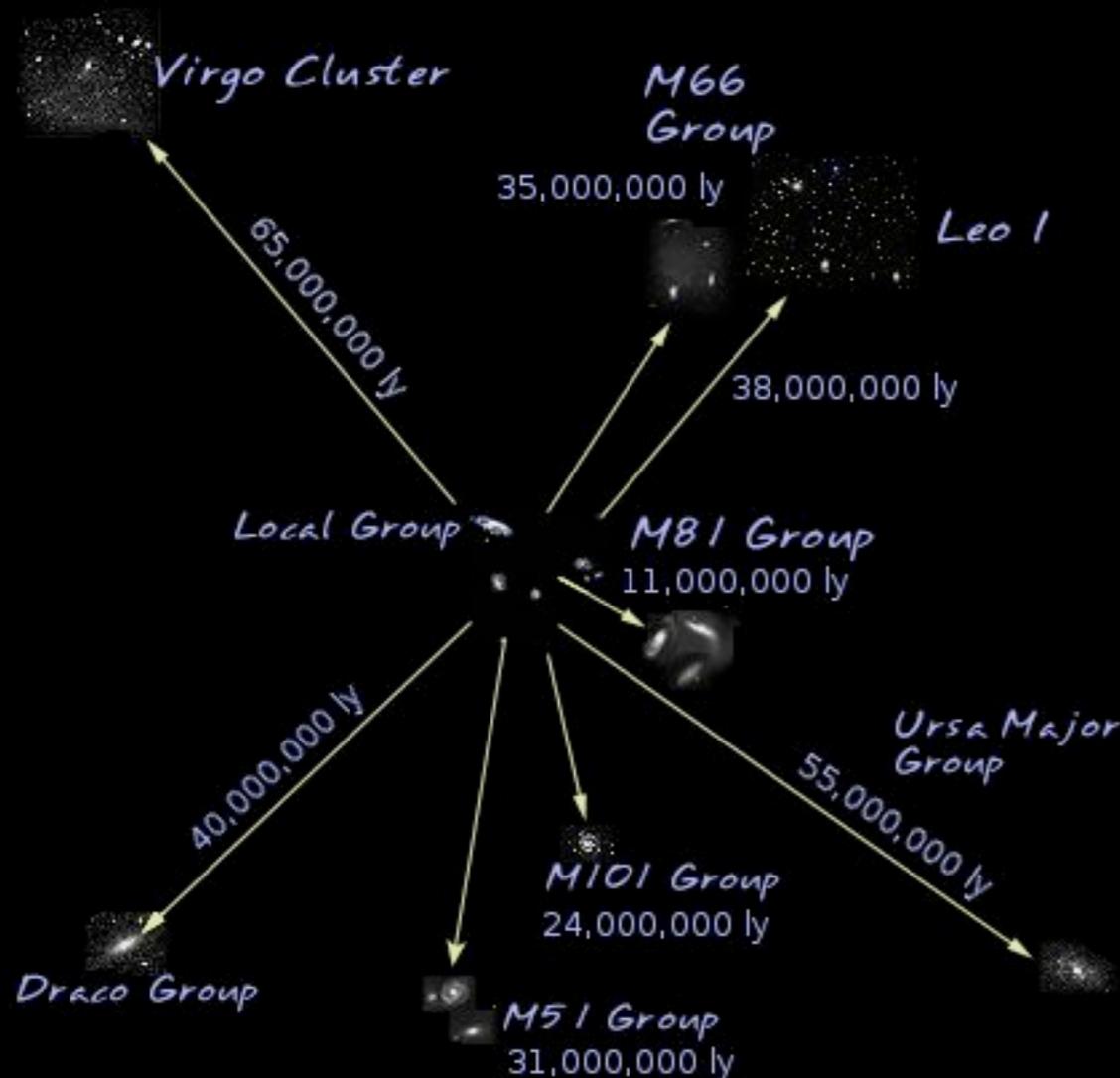
*fine*

# L'Universo Osservabile

*Guardare indietro nel tempo*

# L'Universo Osservabile: guardare indietro nel Tempo

- Distanza Terra-Sole **8 minuti**
- Diametro Via Lattea **70000 ly**
- Distanza Terra-Cane Maggiore **25000 ly**
- Distanza Andromeda **2.36 milioni ly**
- Diametro Gruppo Locale **10 milioni ly**
- Distanza ammasso Vergine **60 milioni ly**
- Diametro Superammasso Locale **200 milioni ly**
- Distanza ammasso di Abel **2.2 Miliardi Ly**



ERA	PERIODO	Mil. anni	PRINCIPALI EVENTI
PREZOICO		4600	Formazione della crosta terrestre (rocce delle isole di S. Pietro e Paolo)
ARCHEOZOICO		3600	Primi fossili attribuibili a Batteri ( <i>Eobacterium</i> ) Stromatoliti; rocce contenenti idrocarburi
CIANOZOICO		2500	Era dei Cianobatteri. Progressiva formazione atmosfera. O <sub>2</sub> pari al 0,2%.
PROTEROZOICO		1600	Era dei primi Eucarioti. Termina con una grande glaciazione.
PALEOZOICO	Cambriano	590	Clima caldo uniforme. Stromatoliti abbondanti. Cloroficce sifonate, abbondanti fossili marini
	Ordoviciano	505	Clima caldo temperato. Ossigeno atmosferico a 2%. Alge monocell. Primi vertebrati.
	Siluriano	440	Clima temperato. Prime feoficce. Dal Siluriano medio prime piante vascolari. Primi animali terrestri
	Devoniano	410	Formazione di mari interni. Primi fossili di semi. Primi insetti apteri. Compagno gli anfibi.
	Carbonifero	360	Clima caldo umido. Pangea. Foreste di Calamitali. Pteridosperme. Compagno gli insetti alati.
	Permiano	285	Clima freddo e arido. Gimnosperme dominano su Pteridofite. Prob. origine Angiosperme.
MESOZOICO	Triassico	250	<i>Sanmiguelia</i> . Abbondanza di Ginkgofite. Primi mammiferi; dinosauri e rettili volanti.
	Giurassico	215	Formaz. Oceano Ataltico. Dominano le Cicadofite. Massimo sviluppo rettili giganti. Uccelli.
	Cretaceo	145	Sviluppo Angiosperme. Abbondanti teleostei. Sviluppo mammiferi. Estinzione grandi rettili.
CENOZOICO	Paleocene	65	Orogenesi alpina. Flora intorno alla Tetide: Laurifille. Diversificazione dei Mammiferi
	Eocene	58	Clima tropicale in Europa. Riduzione Cicadali. Primo fossile di <i>Composite</i> e di <i>Graminee</i> .
	Oligocene	27	Clima sub-tropicale in Europa centro-sett. Diffusione <i>Graminee</i> . Sviluppo caducifoglie.
	Miocene	24	Prosciugamento del Mediterraneo. Flora di sclerofille. Ingresso flora steppica.
	Pliocene	5	Raffreddamento generalizzato. Riempimento Mediterraneo. Flora di deserti steppa e savana.
NEOZOICO	Pleistocene	2	Successione di glaciazioni. Immigrazione di specie artiche. Nascono Etna e Eolie.
QUATERNARIO	Olocene	0,01	Piccole glaciazioni. Azione dell'uomo sulla vegetazione: diffusione di specie sinantropiche.

# CMB: La prima foto dell'Universo

1

Se il modello del Big Bang è giusto ci deve essere stato un momento in cui la  $T$  dell'Universo era sufficientemente bassa per permettere agli atomi di formarsi

3

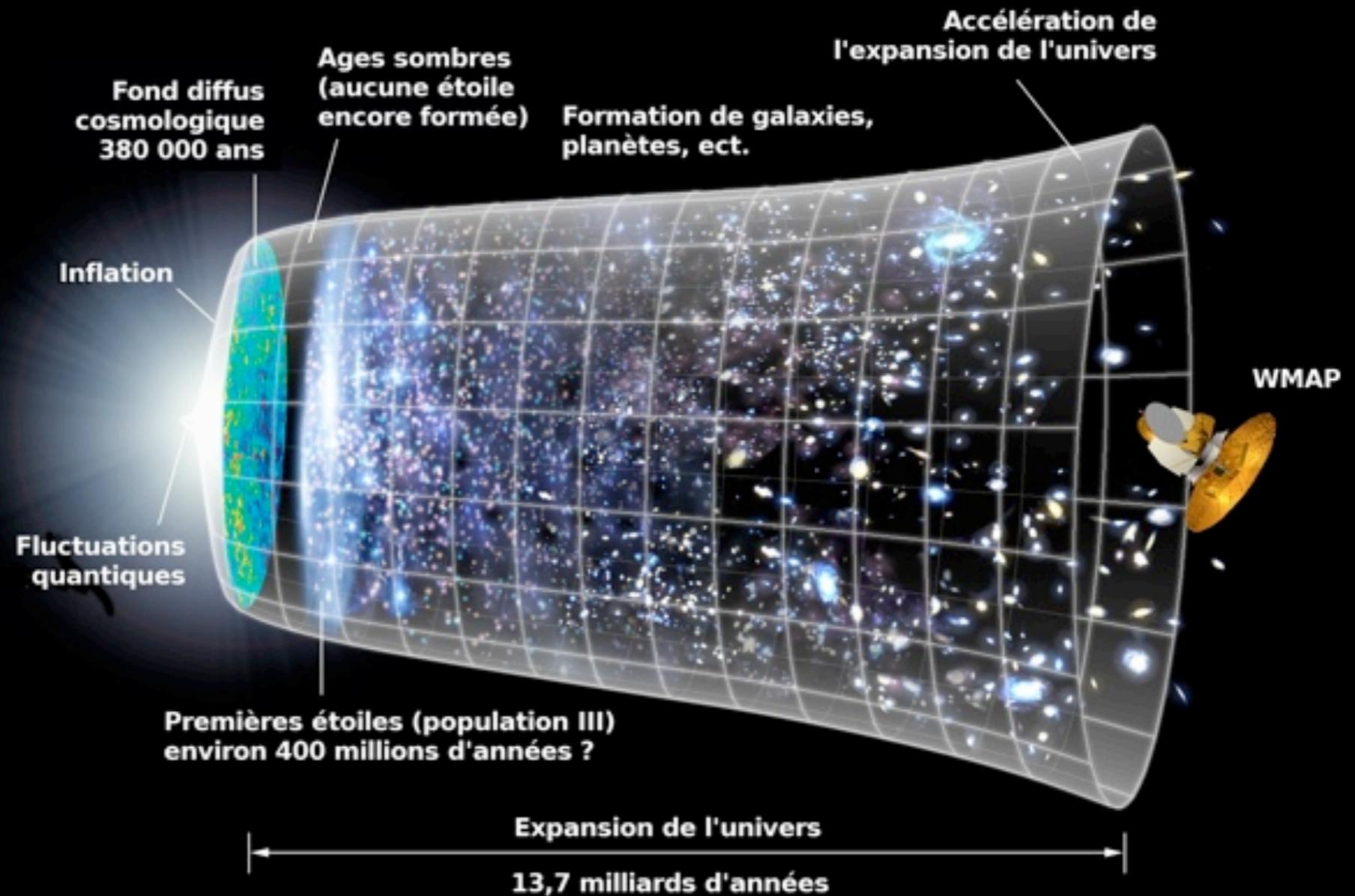
Per l'espansione oggi avrebbero una lunghezza d'onda molto maggiore

4

questa sarebbe la prima immagine dell'universo

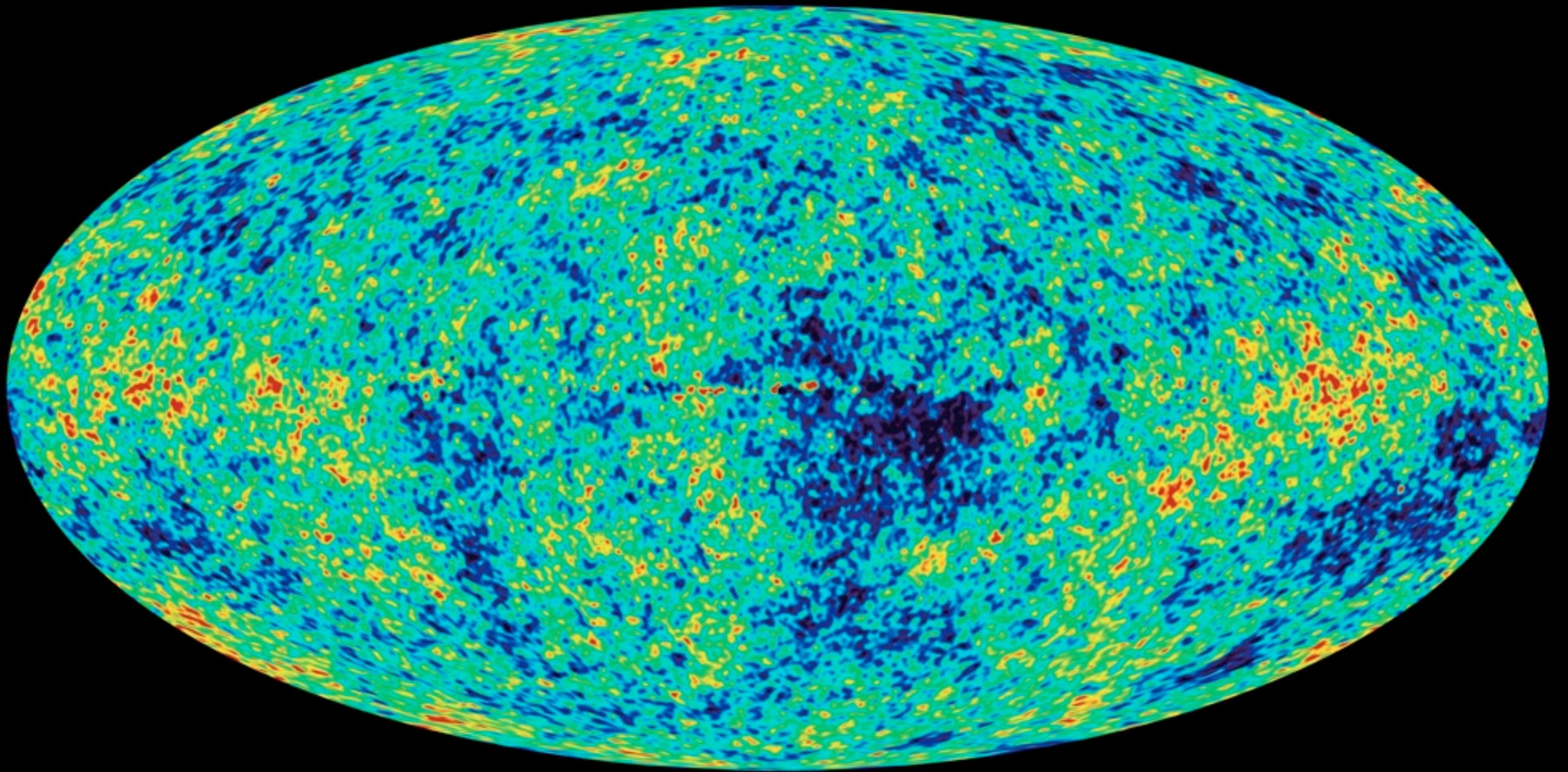
2

in tale "istante" i fotoni si sarebbero disaccoppiati dalla materia propagandosi liberamente



Predizione del modello a Big Bang

# CMB: La prima foto dell'Universo



# CMB: La prima foto dell'Universo

1

Attualmente è la componente dominante nella banda delle microonde

2

Sono state osservate variazioni di densità (luminosità) dell'ordine di:  $10^{-5}$  su scala angolare di  $7^\circ$ ,  $1^\circ$  e  $0.2^\circ$

3

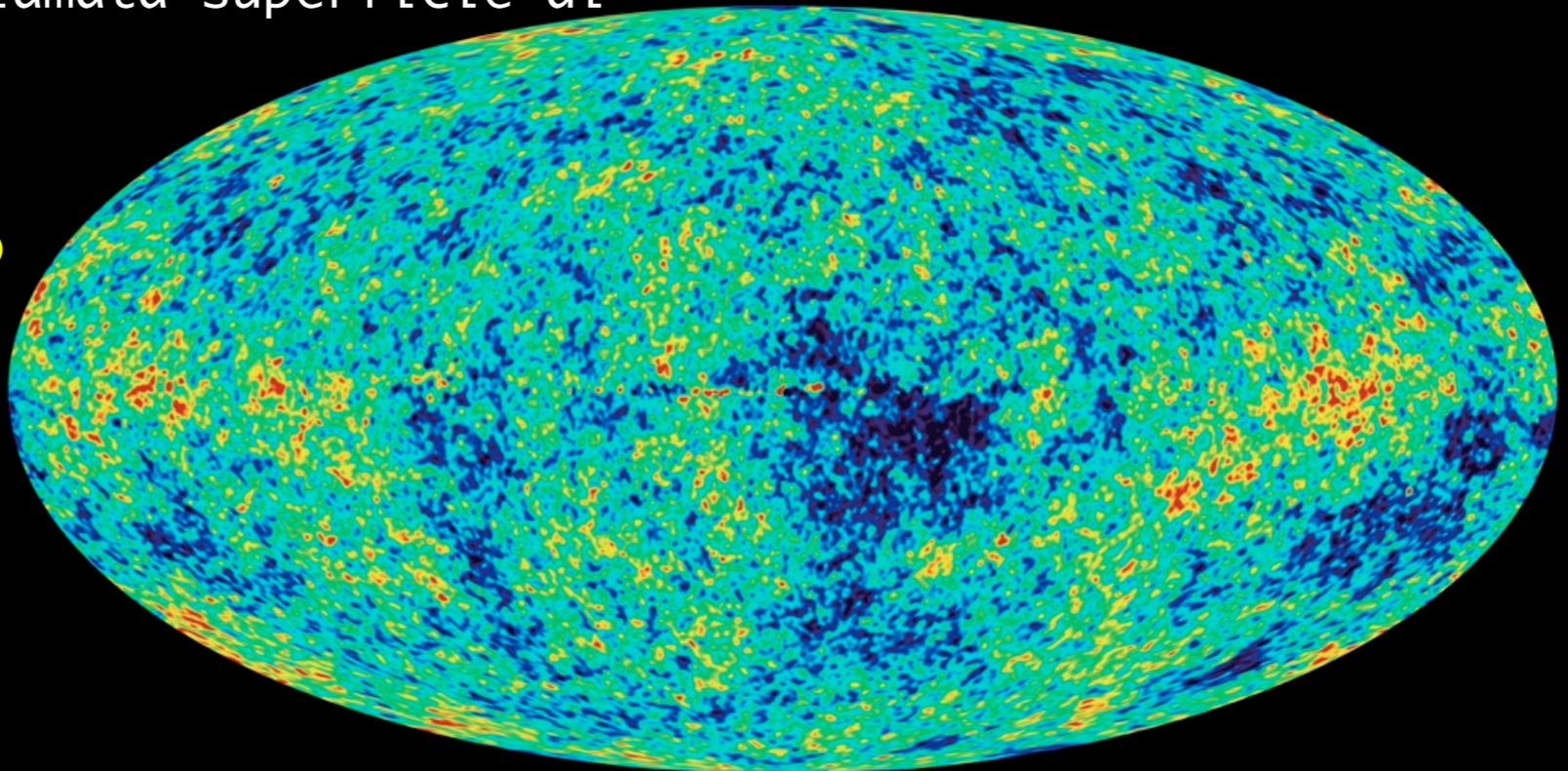
CMB mostra una spaventosa omogeneità ed isotropia (globali)

4

I fotoni che vediamo hanno interagito l'ultima volta su una sfera virtuale chiamata superficie di ultima diffusione

Qual'è il significato fisico di tali oscillazioni?

quali oscillazioni sono interessanti?

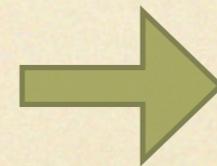


# Constraint dal CMB

Al momento della ricombinazione ogni punto sulla sup. era legato causalmente a tutti i punti in una sfera di raggio

$$R = 2ct_{ric}$$

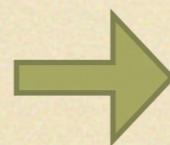
Variazioni di densità oltre questa distanza non sono legate a processi fisici. Ciò individua un angolo di apertura massimo entro cui guardare



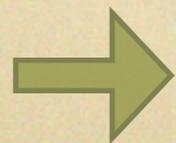
$$\theta < \theta_{max}$$

Quali sono questi processi fisici?

Nel plasma la **forza di gravità** si oppone alla **pressione** di radiazione dei fotoni



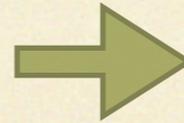
In prima approx. il plasma si comporta come un **oscillatore armonico forzato**



Esistono delle oscillazioni acustiche, che generano le fluttuazioni di materia.

# Constraint dal CMB

Le oscillazioni producono dei picchi acustici, dal cui studio si ricavano info sulla distrib. di materia (oscura).

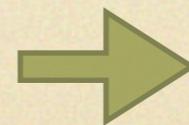
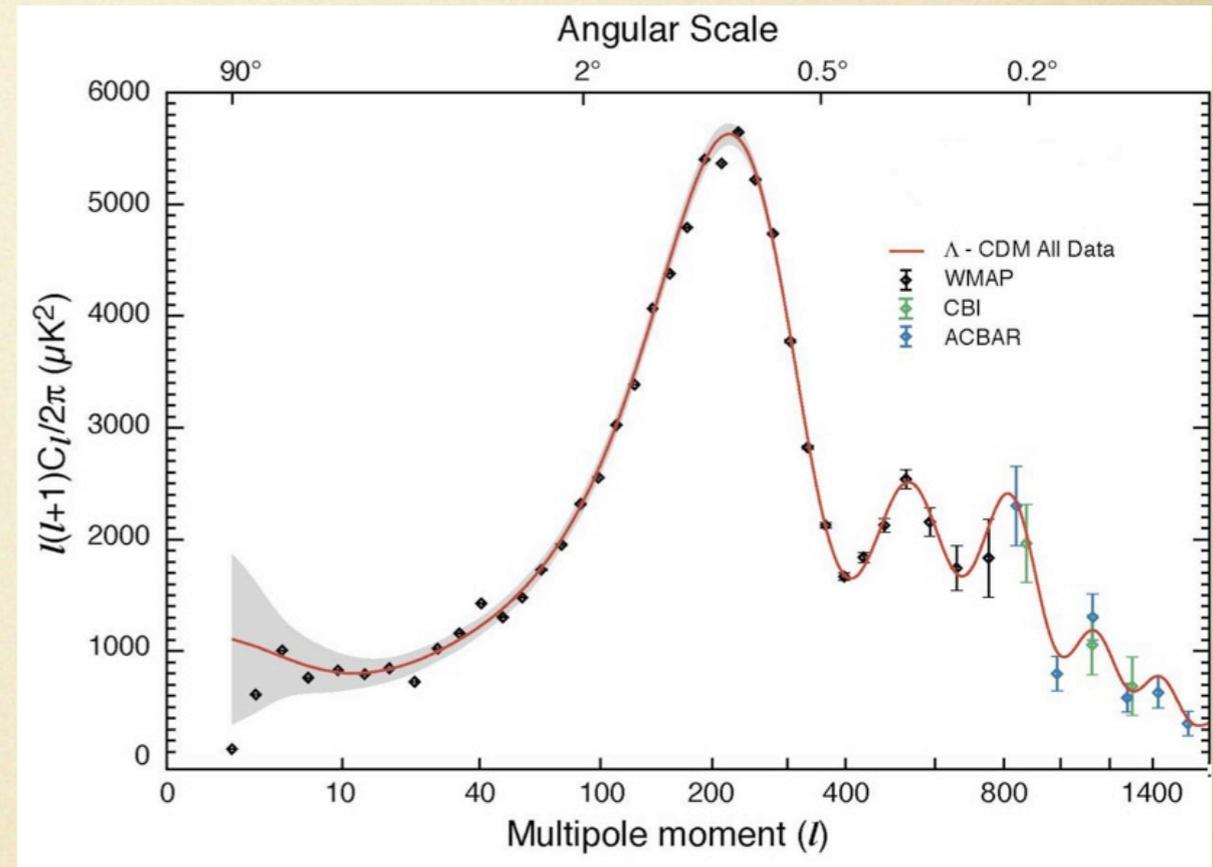


La misura della posizione del primo picco permette una stima della densità totale

$$\Omega_{\Lambda} + \Omega_M \simeq 1$$

Il rapporto tra l'altezza del primo e secondo picco acustico risulta propo. alla densità cosmica di barioni

$$\Omega_M = \Omega_B + \Omega_{DM}$$



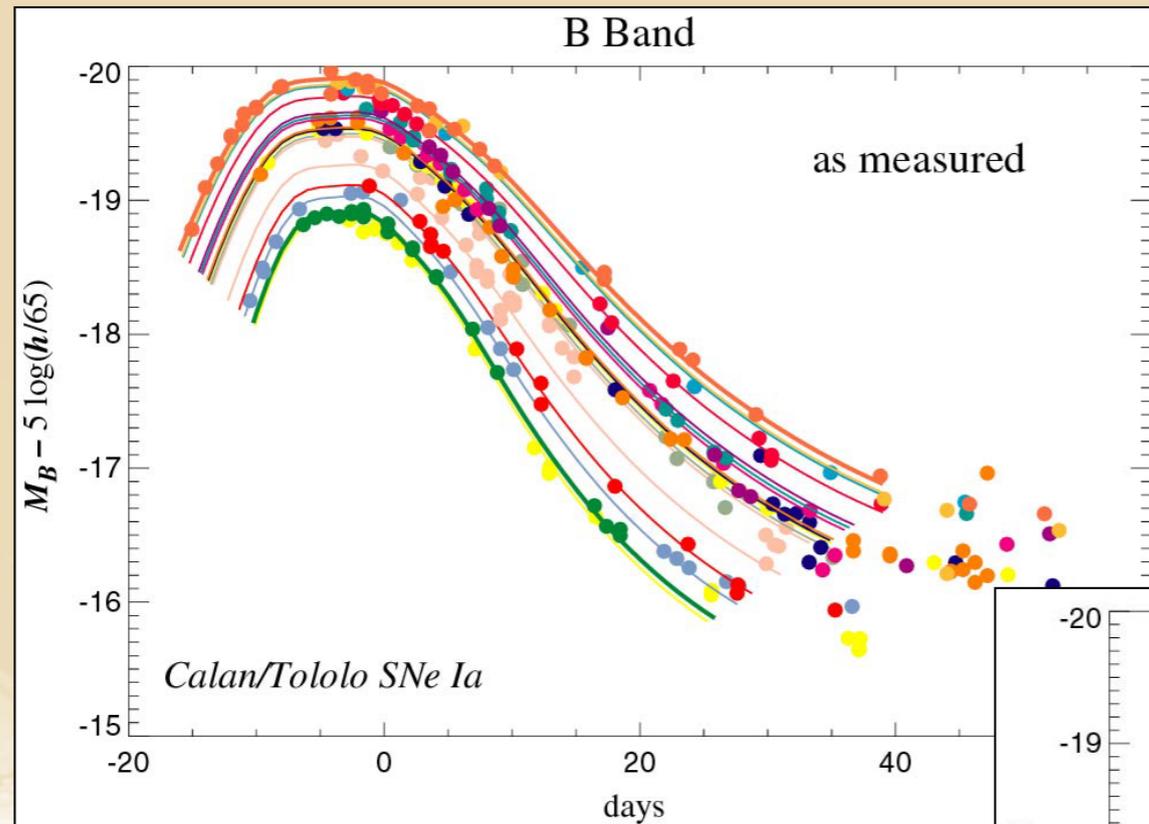
$$\Omega_B \simeq 0.045$$

$$\Omega_{DM} \simeq 0.25$$

$$\Omega_{\Lambda} \simeq 0.7$$

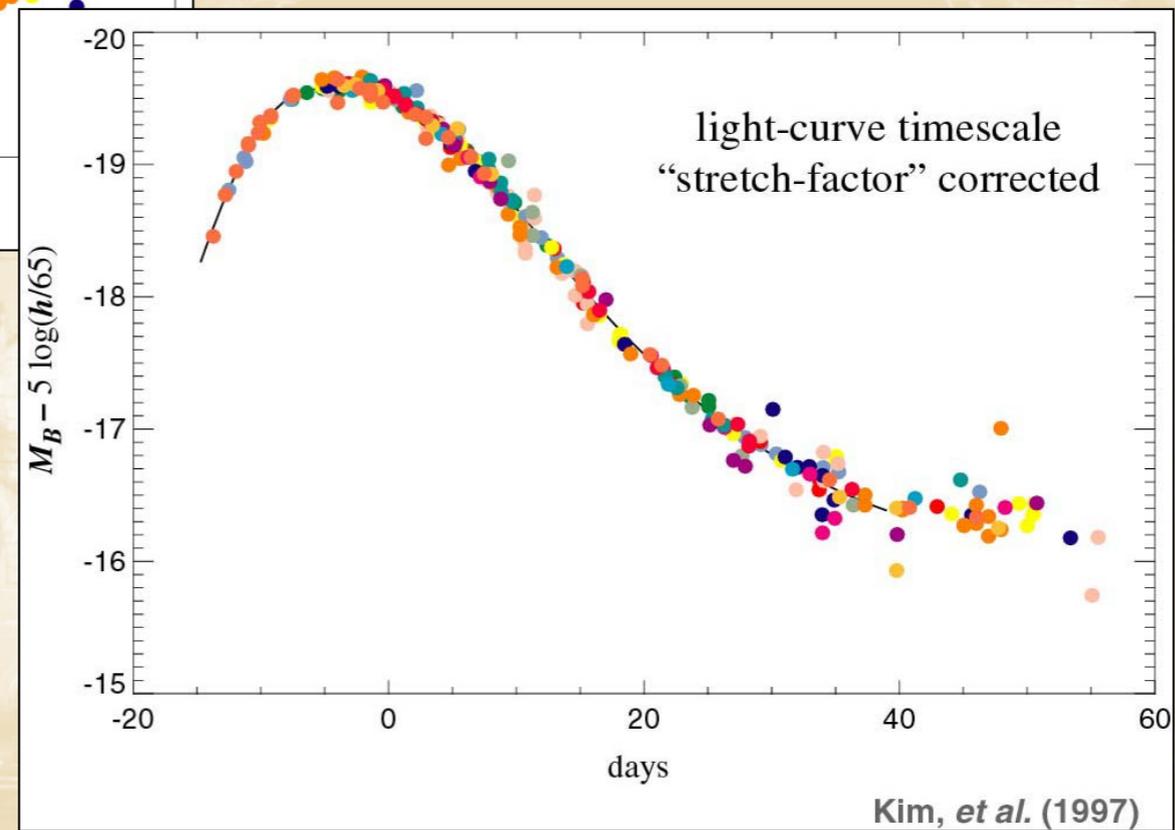
SN Ia

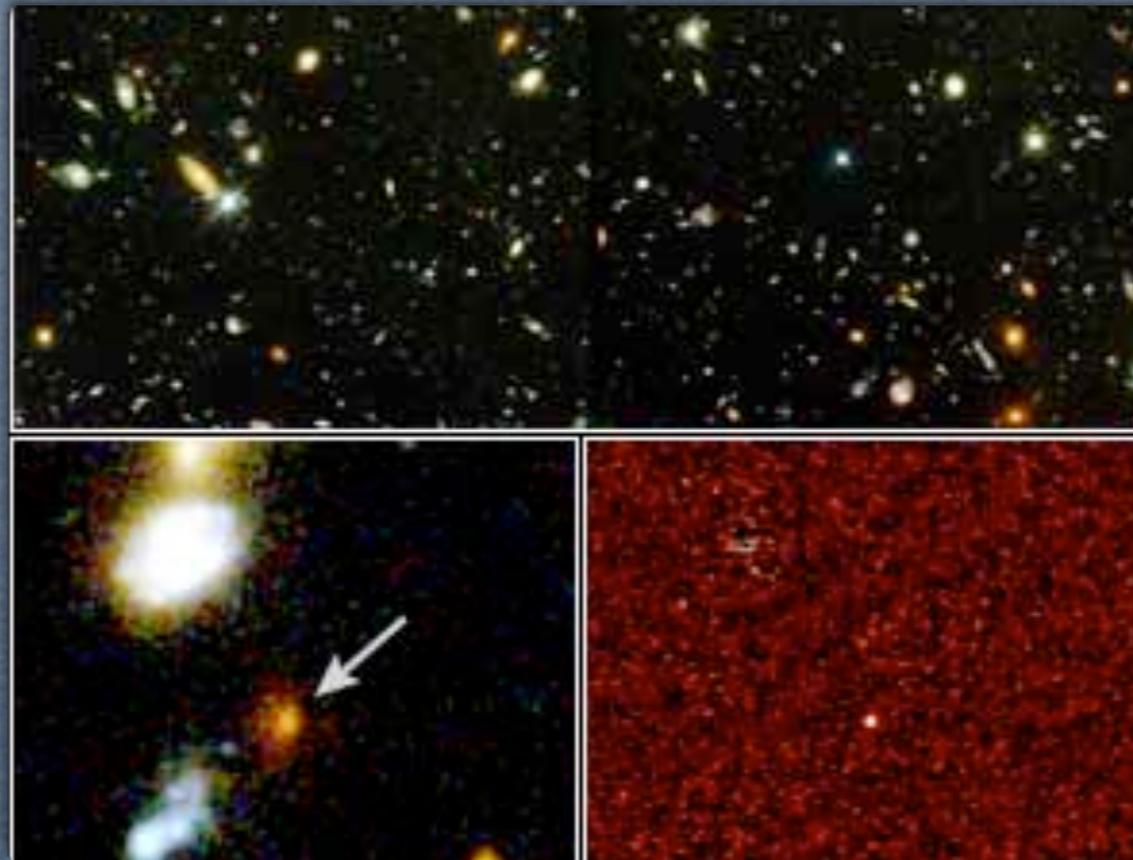
# Universal Supernova Ia Light Curve



Supernova Ia lightcurves are empirically a 1-parameter family

After transformation a universal light curve, i.e. a de-facto standard candle



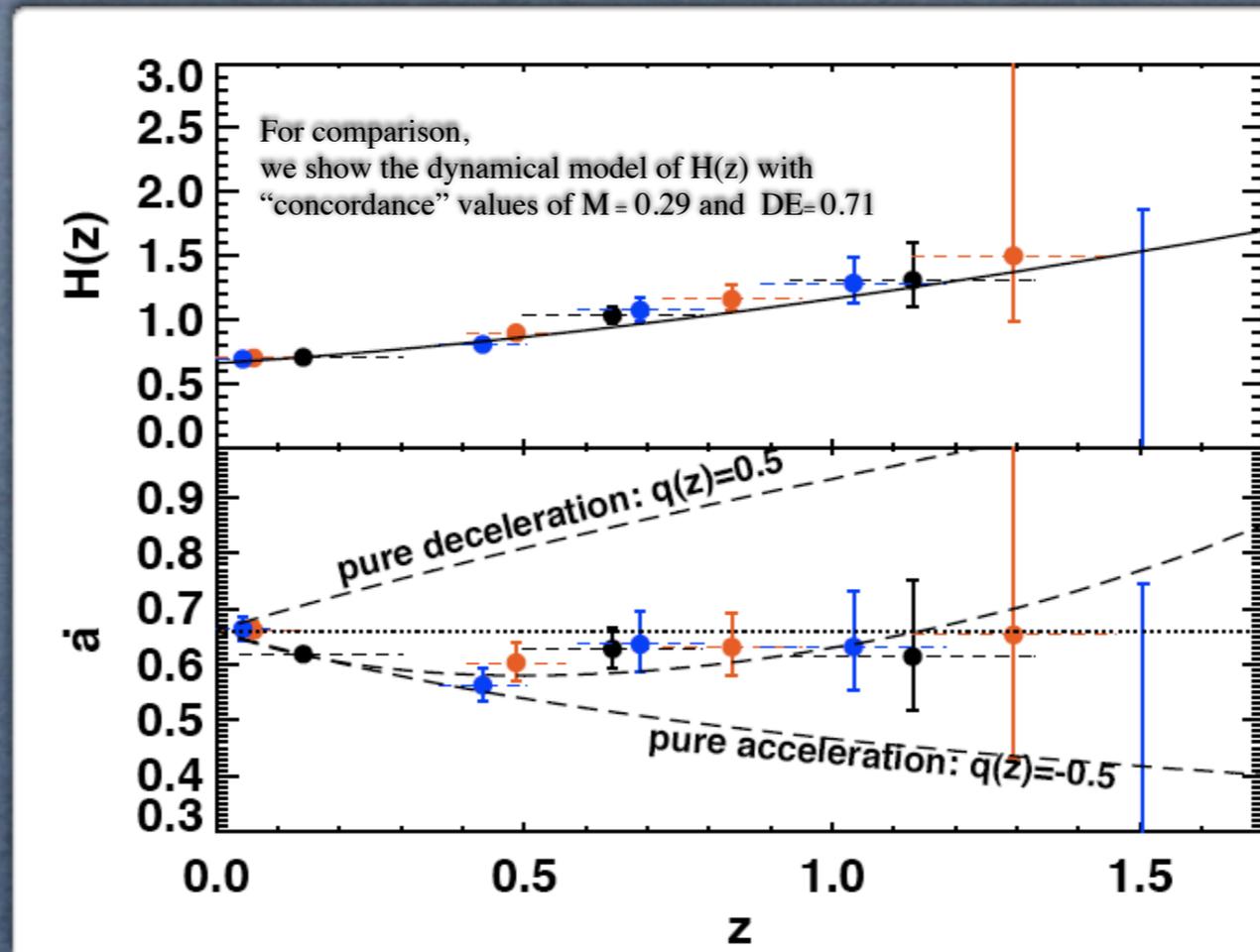


Immagini relative alla rivelazione di una delle più lontane supernovae mai viste, la supernova 1997ff, effettuata tramite il telescopio spaziale Hubble. La foto superiore mostra la miriade di galassie registrate da Hubble nella regione di spazio distante circa 10 miliardi di anni luce dalla terra. Il quadrato bianco indica l'area in cui risiede la supernova 1997ff. La foto in basso a sinistra è una vista ravvicinata di questa regione. La freccia indica la galassia ospite della supernova. Il colore rosso è dovuto a miliardi di vecchie stelle che qui risiedono. La foto in basso a destra mostra la supernova stessa (punto bianco nel centro). Quest'ultima immagine è stata ottenuta tramite tecniche software confrontando foto scattate in tempi diversi.

# astro-ph/0611572v2

- 21 new Type Ia supernovae (SNe Ia)
- Hubble Space Telescope (HST)
- used to trace the history of cosmic expansion over the last 10 Gyears

23 (10+13) spectroscopically confirmed SNe Ia at  $z \geq 1$  (highest r-shift sample)

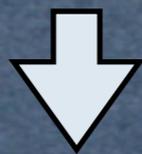


strengthening the evidence for a cosmic jerk the transition from deceleration in the past to acceleration in the present

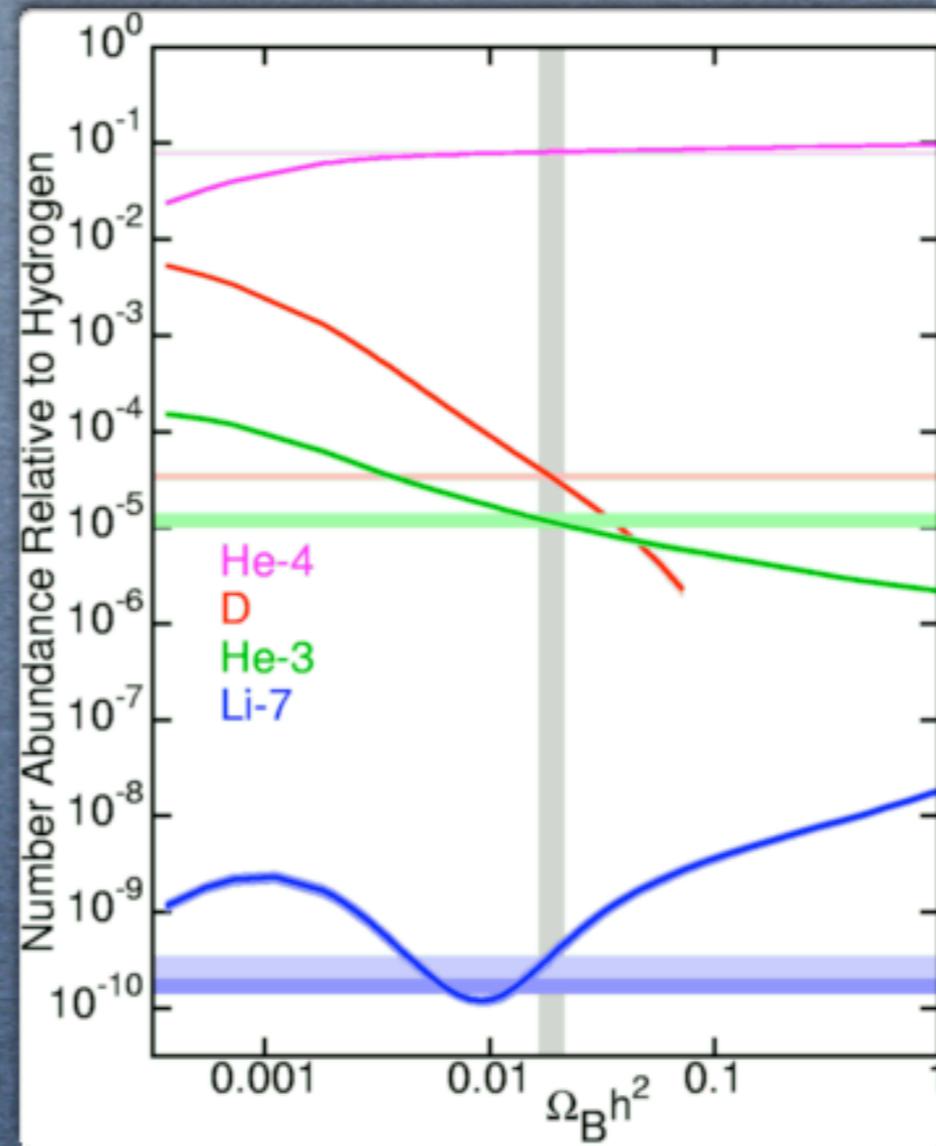
- The unique leverage of the HST high r-shift SNe Ia provides the first meaningful constraint on the dark energy equation-of-state parameter at  $z \geq 1$
- The result remains consistent with a cosmological constant ( $w(z) = -1$ ), and rules out rapidly evolving dark energy ( $dw/dz \gg 1$ )
- The defining property of dark energy, its negative pressure, appears to be present at  $z > 1$ , in the epoch preceding acceleration (98% CL)

BBN

- The conditions of the early universe influence the primordial abundances
- The theoretical predictions depend on the density of  $p$  and  $n$  (at that time)
- BBN gives a way of measuring  $B$  density
- $D$  density pins down the  $B$  density extremely accurately to only 4%



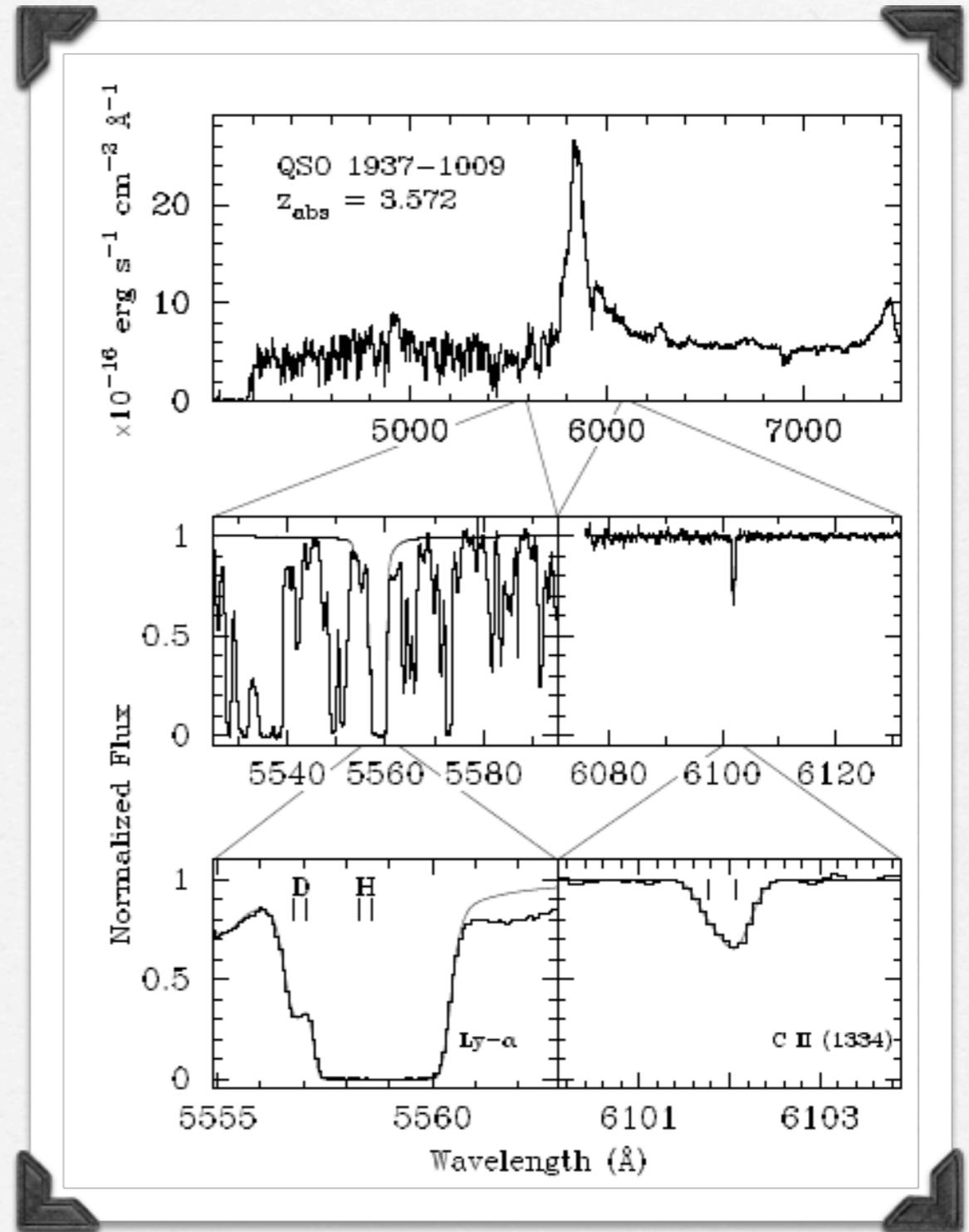
about 25% of non baryonic DM



recent measures explores  $D$  abundances at redshift 3-4 well before much processing could have altered the primordial abundances

# Lyman alpha forest

Deuterium Abundance measurement (D/H) ratio in metal-poor QSO absorption systems and directly infer the value of primordial D/H.



# L'Universo Osservabile

*Dalla Terra al Cosmo*

# L'Universo Osservabile: il sistema solare

**Distanza media Terra-Sole:** 150 milioni di km (circa 8 minuti-luce)

**Massa Terra** =  $6 \times 10^{24}$  kg = 6.000.000.000.000.000.000.000.000 kg

**Massa Sole** =  $2 \times 10^{30}$  kg = 2.000.000.000.000.000.000.000.000.000 kg



## Sistema solare:

- Sole
- 8 pianeti (con 165 lune conosciute)
- 3 pianeti nani (Cerere, Plutone, Eris)
- centinaia di migliaia di asteroidi
- comete e miliardi di corpi minori