

## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI

## COSMOLOGIA

INTRODUZIONE ALL'ASTROFISICA  
DI PROF. MATTEUCCI

Eda Gjergo

Dottoranda, borsa di studio INAF  
Università di Trieste / Osservatorio Astronomico di Trieste  
[gjergo@oats.inaf.it](mailto:gjergo@oats.inaf.it)

Trieste, Novembre 2017



## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

## COMPONENTI DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI

# OUTLINE

## INTRODUZIONE

Scale dell'Universo

Relatività

Scopi della cosmologia

## COMPONENTI DELL'UNIVERSO

Materia Oscura

Panoramica

Ricerche dirette di Materia Oscura

Energia Oscura

Scoperta

Alternative

## CMB

## CONCLUSIONI



## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSORELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIACOMPONENTI  
DELL'UNIVERSOMATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

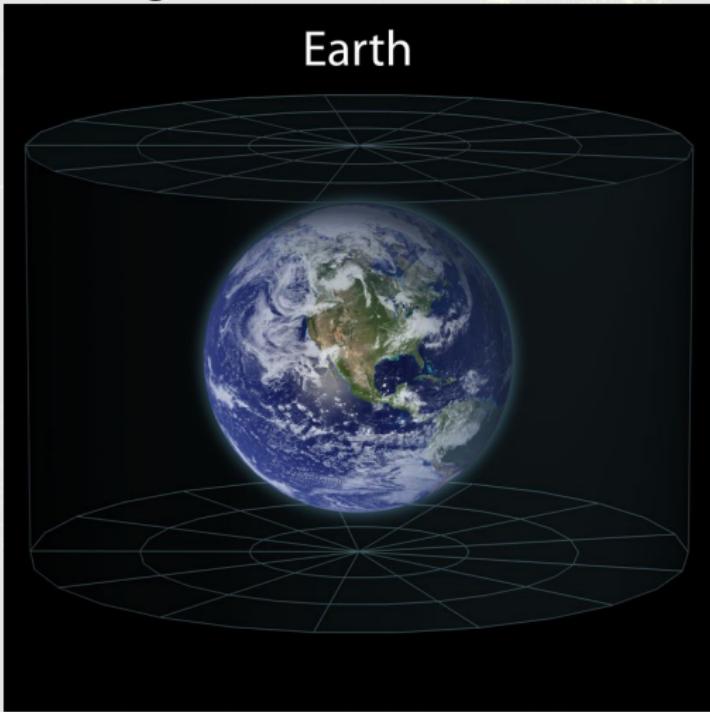
## CMB

## CONCLUSIONI

## SCALE DELL'UNIVERSO

Visita anche il sito: "scaleofuniverse.com"

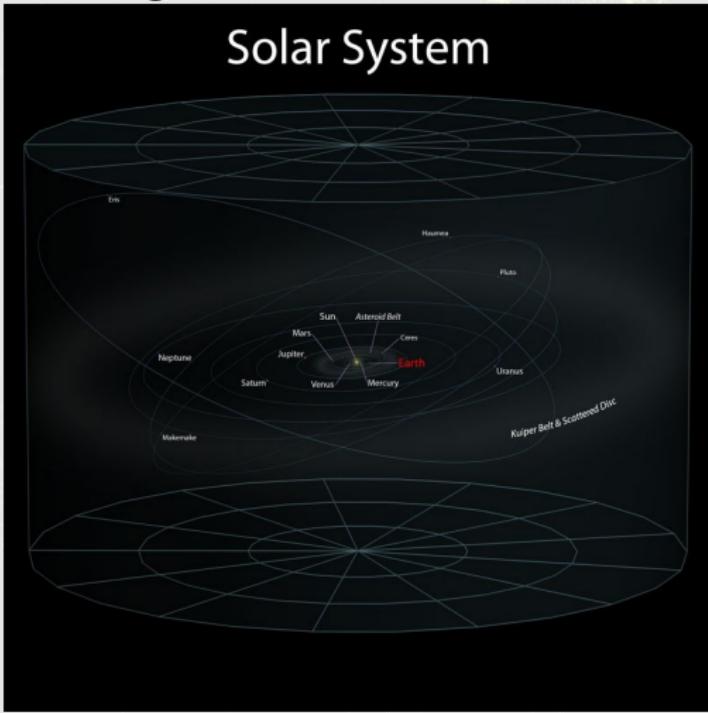
©JPL, Andrew Z. Colvin.



# SCALE DELL'UNIVERSO

Visita anche il sito: "scaleofuniverse.com"

©JPL, Andrew Z. Colvin.



# SCALE DELL'UNIVERSO

Visita anche il sito: "scaleofuniverse.com"

©JPL, Andrew Z. Colvin.



## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSORELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIACOMPONENTI  
DELL'UNIVERSOMATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI

## SCALE DELL'UNIVERSO

Visita anche il sito: "scaleofuniverse.com"

©JPL, Andrew Z. Colvin.

## Milky Way Galaxy



## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSORELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIACOMPONENTI  
DELL'UNIVERSOMATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI

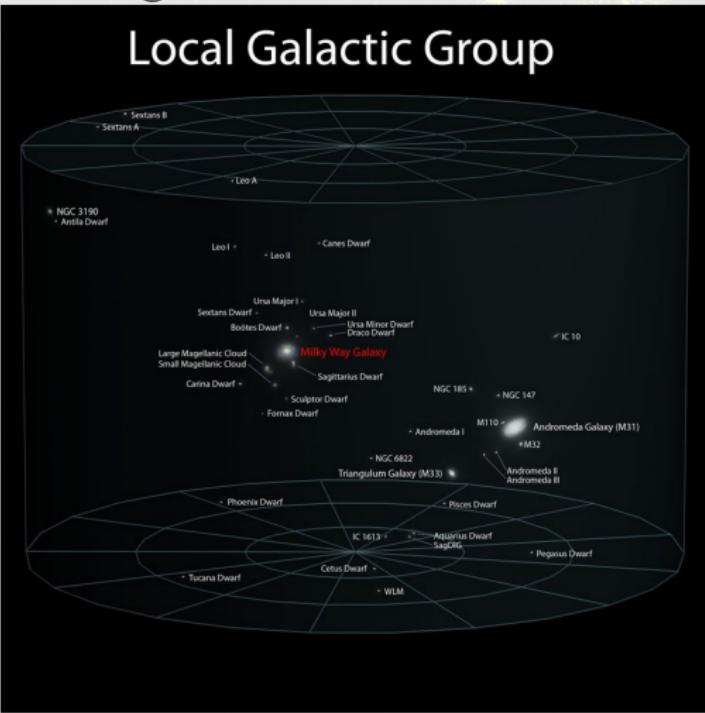


## SCALE DELL'UNIVERSO

Visita anche il sito: "scaleofuniverse.com"

©JPL, Andrew Z. Colvin.

## Local Galactic Group

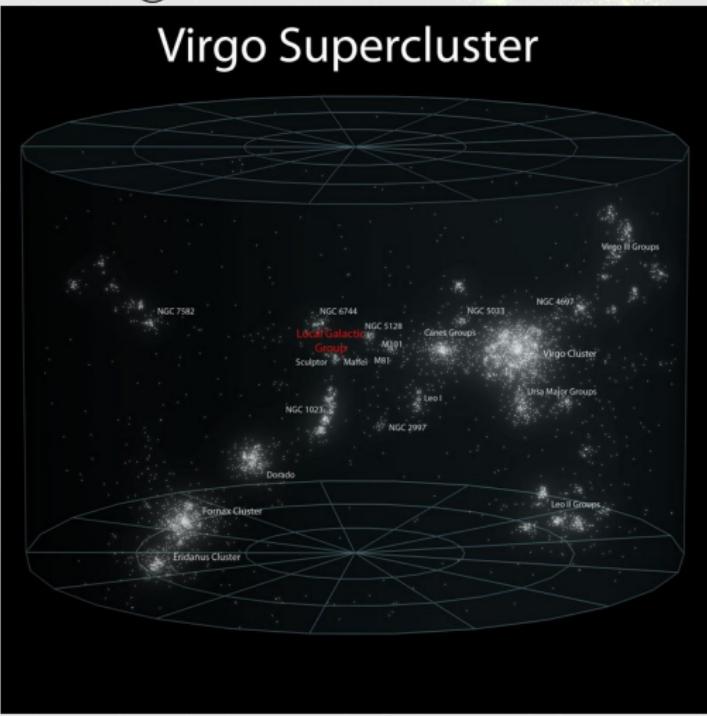


# SCALE DELL'UNIVERSO

Visita anche il sito: "scaleofuniverse.com"

©JPL, Andrew Z. Colvin.

## Virgo Supercluster



COSMOLOGIA

EDA GJERGO

### INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

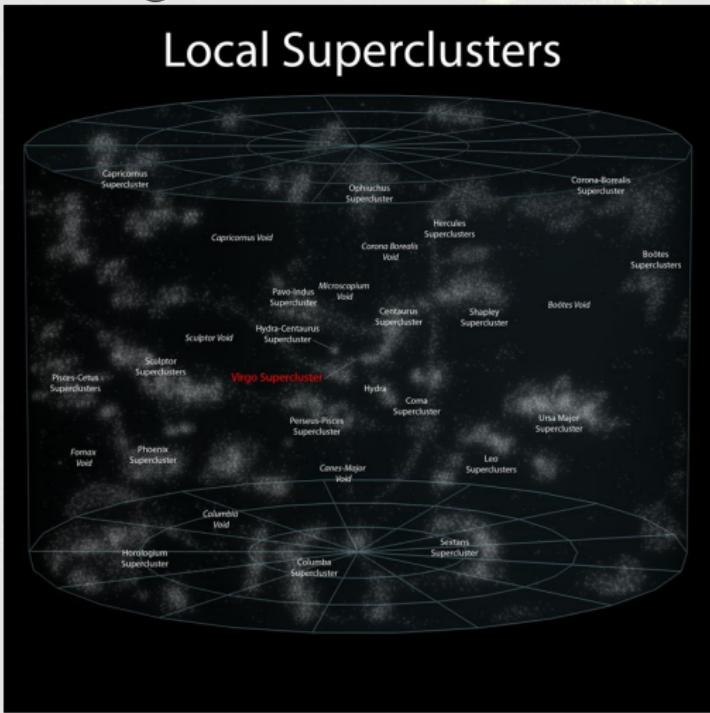
### COMPONENTI DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

### CMB

### CONCLUSIONI





INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

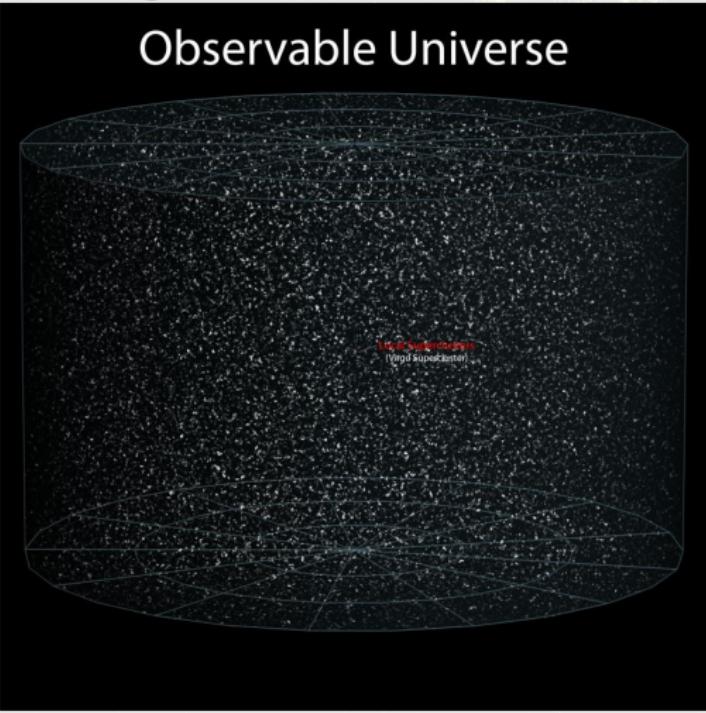
CONCLUSIONI

# SCALE DELL'UNIVERSO

Visita anche il sito: "scaleofuniverse.com"

©JPL, Andrew Z. Colvin.

## Observable Universe



# L'UNIVERSO OSSERVABILE

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



FIGURE: Quali proprietà osservate a queste scale?  
**Principio Cosmologico.**

# RELATIVO E ASSOLUTO I

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

ENERGIA OSCURA

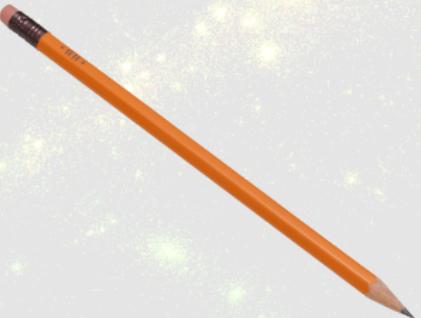
SCOPERTA

ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

Cos'è un'invariante?



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE



# RELATIVO E ASSOLUTO II

Una quantità che non cambia sotto una trasformazione.

La possiamo descrivere col teorema di Pitagora!

$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

Ma come mai nella Relatività si sente parlare di spazio-tempo? Dov'è il tempo?

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

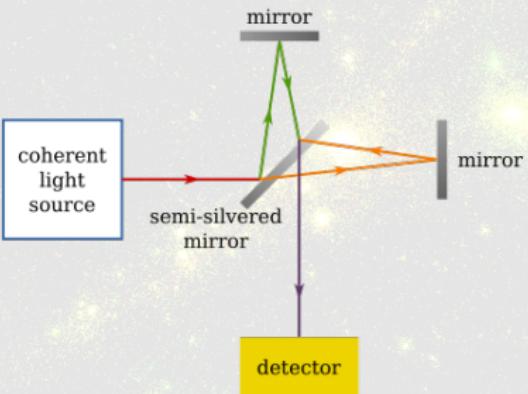
COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI





**FIGURE:** Esperimento di Michelson & Morley. Non si nota interruzione della luce indipendentemente da come ci si muove nello spazio-tempo.

## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIACOMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA

PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

ENERGIA OSCURA

SCOPERTA

ALTERNATIVE

CMB

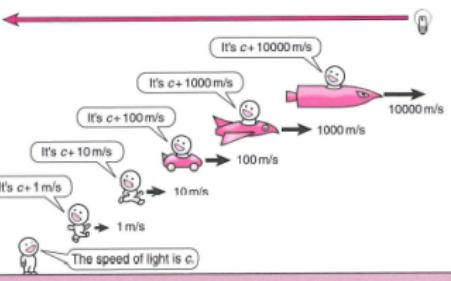
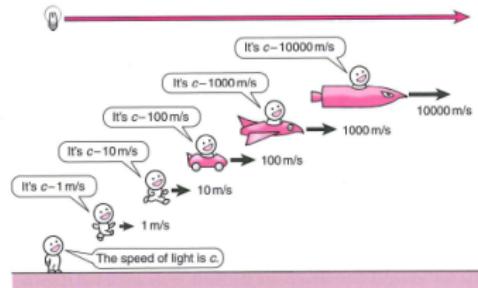
CONCLUSIONI



# LA NATURA HA SCELTO ASSOLUTI DIVERSI DALL'INTUIZIONE QUOTIDIANA...

possible, ...

What you expect:



What really happens:

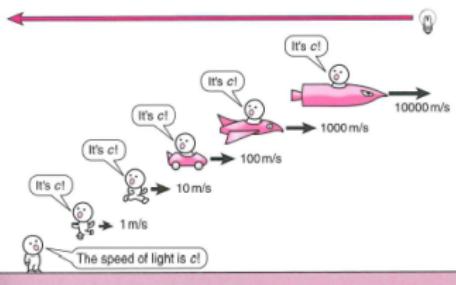
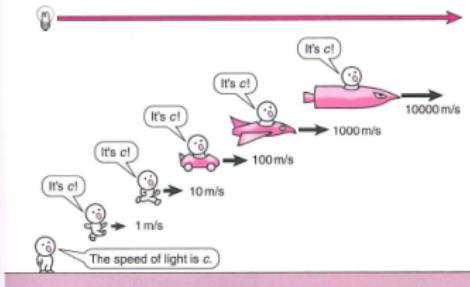


FIGURE: Tatsu Takeuchi, *An Illustrated Guide to Relativity*.

# QUALCOSA DI SBAGLIATO NELL'INVARIANTE INTUITIVA

Non possiamo estendere arbitrariamente il teorema di Pitagora alla coordinata temporale.

$$\Delta s^2 = \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 \quad (1)$$

Tempo e spazio hanno unità diverse. Alla coordinata temporale manca, in unità, il quadrato di una velocità.

Inoltre, esperimenti suggeriscono che quando la coordinata spaziale cresce, quella temporale diminuisce, e vice versa.

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



# QUALCOSA DI SBAGLIATO NELL'INVARIANTE INTUITIVA

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA

PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

ENERGIA OSCURA

SCOPERTA

ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

Cosa suggerisce l'Universo? Relativamente alla velocità della luce:

$$c^2 = \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}{\Delta t^2} = \text{const}$$

Cioè:

$$c^2 dt^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (2)$$

$$0 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (3)$$

Coordinati spaziali e temporali hanno segni opposti.



# QUALCOSA DI SBAGLIATO NELL'INVARIANTE INTUITIVA

Cosa suggerisce l'Universo? Relativamente alla velocità della luce:

$$c^2 = \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}{\Delta t^2} = \text{const}$$

Cioè:

$$c^2 dt^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (4)$$

$$0 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (5)$$

Dunque, la luce traccia coordinate spaziali e temporali che sottratte tra di loro lasciano l'elemento  $\Delta s = 0$  per ogni sistema di riferimento inerziale.

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



# RELATIVITÀ

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA

PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

ENERGIA OSCURA

SCOPERTA

ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

Con la relatività (ristretta), abbandoniamo l'ipotesi di spazio e tempo assoluti per ogni osservatore, a favore di una assoluta velocità della luce.

Con la relatività generale, massa inerziale e massa gravitazionale diventano equivalenti, → anche sistemi non-inerziali possono essere relativistici ⇒ la teoria della gravitazione più generale che ci sia.



# PRINCIPIO DI EQUIVALENZA

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA

PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

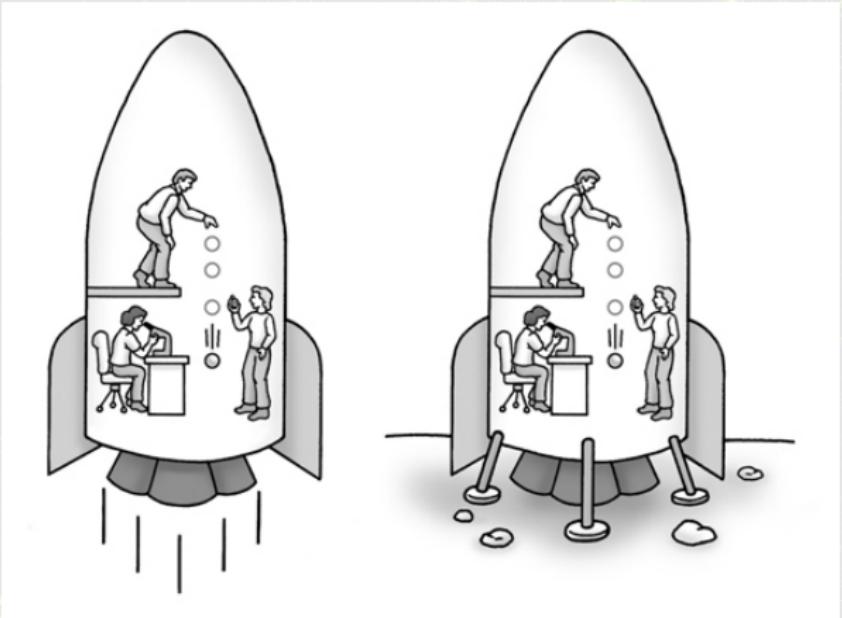
ENERGIA OSCURA

SCOPERTA

ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



**FIGURE:** Massa inerziale (che si oppone a cambiamenti di velocità) e massa gravitazionale (la capacità di un corpo di produrre e percepire gravità) coincidono.



# LOCALITÀ E NON-LOCALITÀ

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

ENERGIA OSCURA

SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

Video srvsgr



# METRICHE - MINKOWSKI E FLRW: LA FORMA DELLO SPAZIO-TEMPO

Metrica di Minkowski (relatività ristretta)

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

Describe proprietà locali, dove la gravità può essere trascurata.

Metrica di Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (relatività generale)

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

Describe l'Universo a larga scala, e assume isotropia e omogeneità.

- ▶  $a(t)$  è lo scale factor.
- ▶  $k$  è la curvatura dello spazio.
- ▶  $ds$  è l'elemento linea, pari a zero per invarianti.

## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

## RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIACOMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA

PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

ENERGIA OSCURA

SCOPERTA

ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI



FIGURE: curvatura kdi una geometria



# A CHE SERVE LA METRICA?

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO

RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

Per risolvere l'Equazione di Einstein e descrivere la dinamica cosmologica:

$$\mathcal{G}_{\mu\nu} = 8\pi G \mathcal{T}_{\mu\nu}$$

G è la costante di gravitazione.

$\mathcal{G}_{\mu\nu}$  è un tensore, e dipende esclusivamente dalla metrica.

Anche  $\mathcal{T}_{\mu\nu}$  è un tensore, ma dipende esclusivamente dal "contenuto" dell'Universo.



# SCOPI DELLA COSMOLOGIA I

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



## LA COSMOLOGIA SI DOMANDA:

- ▶ Come si è evoluto e come si trasformerà l'Universo?
- ▶ Di cosa è fatto l'Universo?

L'equazione di Friedmann risponde ad entrambe:

$$H^2 = \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \sum_i \rho_i \quad (6)$$
$$\frac{H^2}{H_0^2} = \Omega_{0,R} a^{-4} + \Omega_{0,M} a^{-3} + \Omega_{0,k} a^{-2} + \Omega_\Lambda$$

# SCOPI DELLA COSMOLOGIA II

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} (\Omega_{0,R} a^{-4} + \Omega_{0,M} a^{-3} + \Omega_{0,k} a^{-2} + \Omega_\Lambda)$$

- ▶  $H$ : Il parametro di Hubble,  $\dot{a}/a$ .
- ▶  $H_0$ : La costante di Hubble,  $72 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ .
- ▶  $a$ : il fattore scala.
- ▶  $G$ : la costante di gravitazione universale,  $6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$ .
- ▶  $\Omega_{0,x} = \frac{\rho_{0,x}}{\rho_{0,crit}}$  è la quantità adimensionale che rappresenta il parametro di densità cosmica attuale.
- ▶  $\rho_{0,crit} = \frac{3H^2(t)}{8\pi G}$  è la densità critica per cui la geometria dell'Universo è piatta.
- ▶  $x = R, M, k, \Lambda$  sono rispettivamente radiazione, massa, curvatura, ed energia oscura / densità costante di accelerazione.



## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI

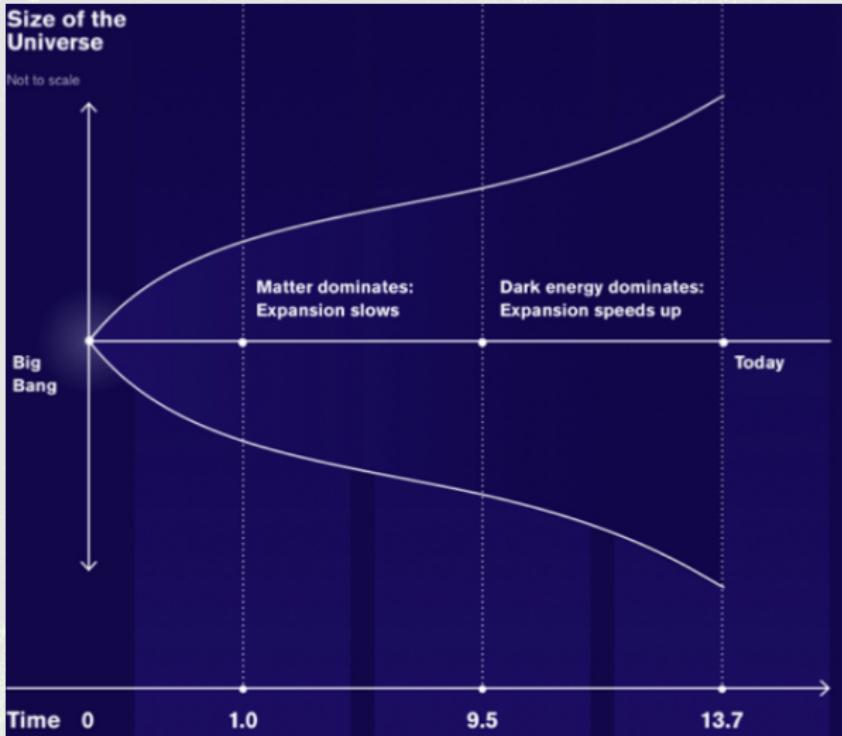


FIGURE: L'asse x e' il tempo in Giga-anni, l'asse y e' il fattore scala a di espansione dell'Universo, descritto dall'equazione di Friedmann. (© DESC)

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀSCOPI DELLA  
COSMOLOGIACOMPONENTI  
DELL'UNIVERSOMATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

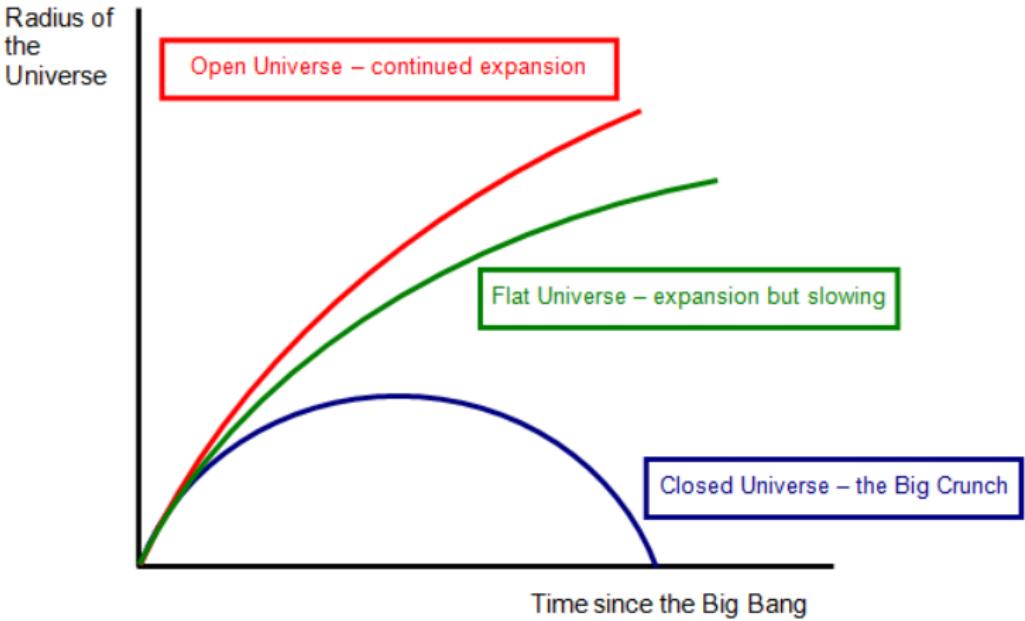


FIGURE: Modelli di espansione di Friedmann.



# COMPONENTI DELL'UNIVERSO

Assumendo che la Relatività Generale sia corretta, queste sono le abbondanze delle sostanze nell'Universo.

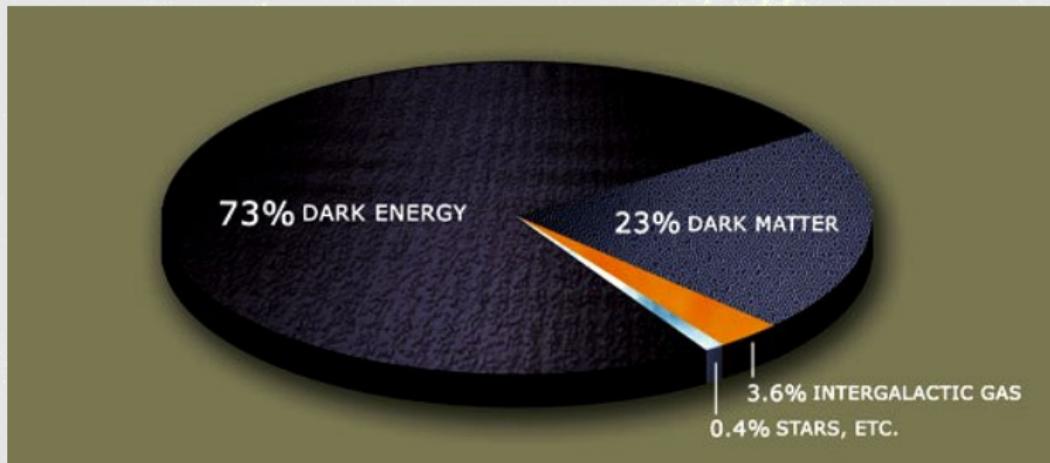


FIGURE: © Planck Collaboration

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

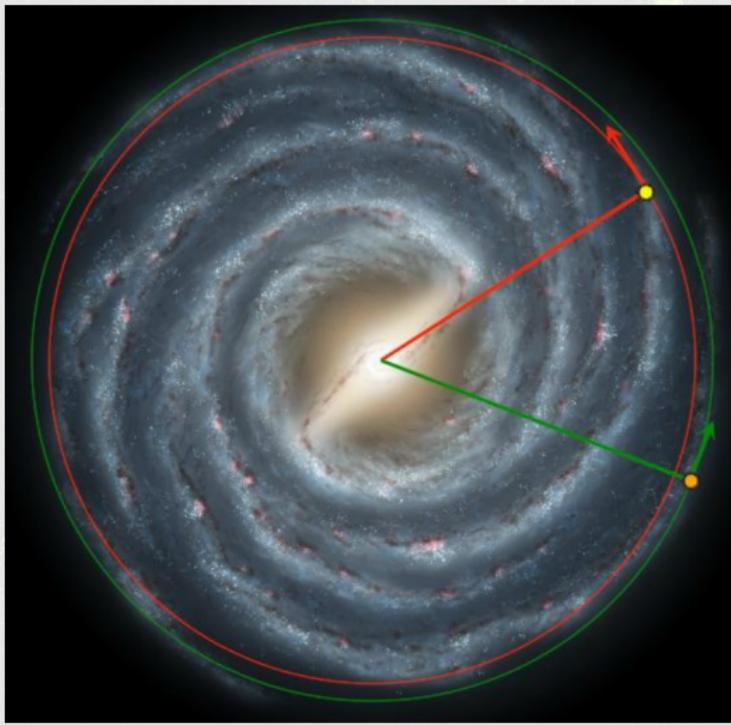


ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA

INAF

NATIONAL INSTITUTE FOR ASTROPHYSICS

# VELOCITÀ DI ROTAZIONE DI UNA STELLA IN UNA GALASSIA A SPIRALE



COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE



## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI



# VELOCITÀ DI ROTAZIONE DI UNA STELLA IN UNA GALASSIA A SPIRALE

$$F = ma \quad (7)$$

$$F_g = \frac{GM_{gal,in}m_\star}{r^2} \quad (8)$$

$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad (9)$$

$$m_\star a_{c,\star} = \frac{GM_{gal,in}m_\star}{r^2} \quad (10)$$

$$v_\star^2 = \frac{GM_{gal,in}}{r} \quad (11)$$

$$\lim_{M_{gal,in} \rightarrow M_{gal,tot}} \Rightarrow v_\star \propto \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (12)$$

# MATERIA OSCURA: COSA CI ASPETTIAMO VS COSA OSSERVIAMO

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

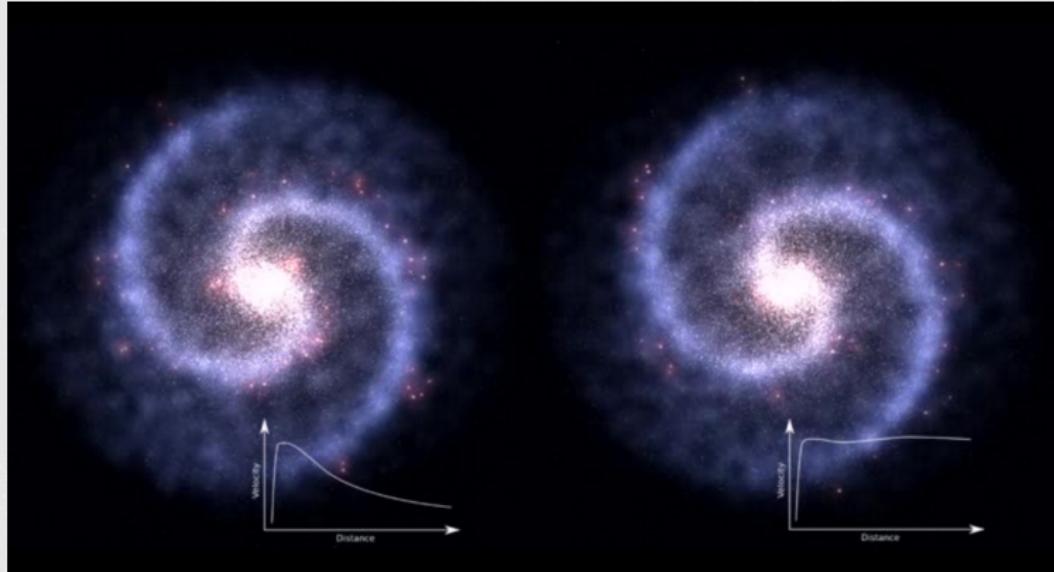
COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA

PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



**FIGURE:** Sinistra: la velocità di stelle nella periferia delle galassie dovrebbe decrescere come la radice quadra della distanza dal centro. Destra: assumendo che la nostra comprensione della fisica sia corretta, invece la massa aumenta linearmente col raggio fin dove c'è materia barionica.

# MATERIA OSCURA

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

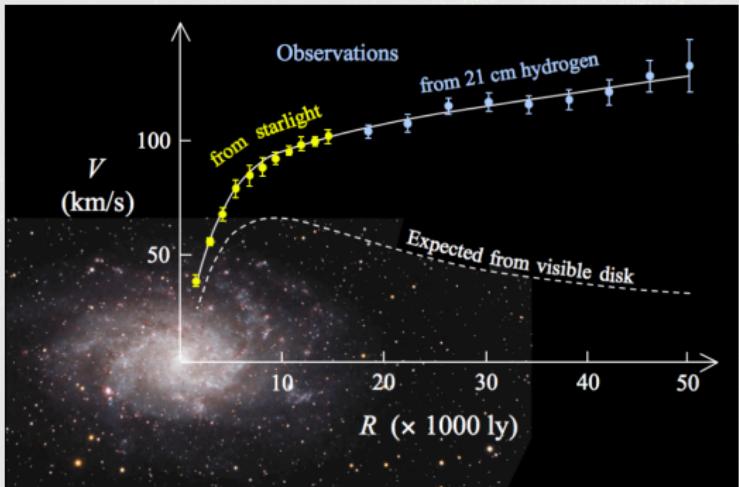
MATERIA OSCURA

PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



**FIGURE:** Problema di Rotazione Galattica (in fig. M33): la massa derivata dalla luminosità totale è molto più piccola di quella derivata dalle velocità delle stelle.

Un Simile comportamento lo si osserva in Ammassi di Galassie.

Ma si tratta di materia mancante? O di materia non luminosa?

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIACOMPONENTI  
DELL'UNIVERSOMATERIA OSCURA  
PANORAMICARICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

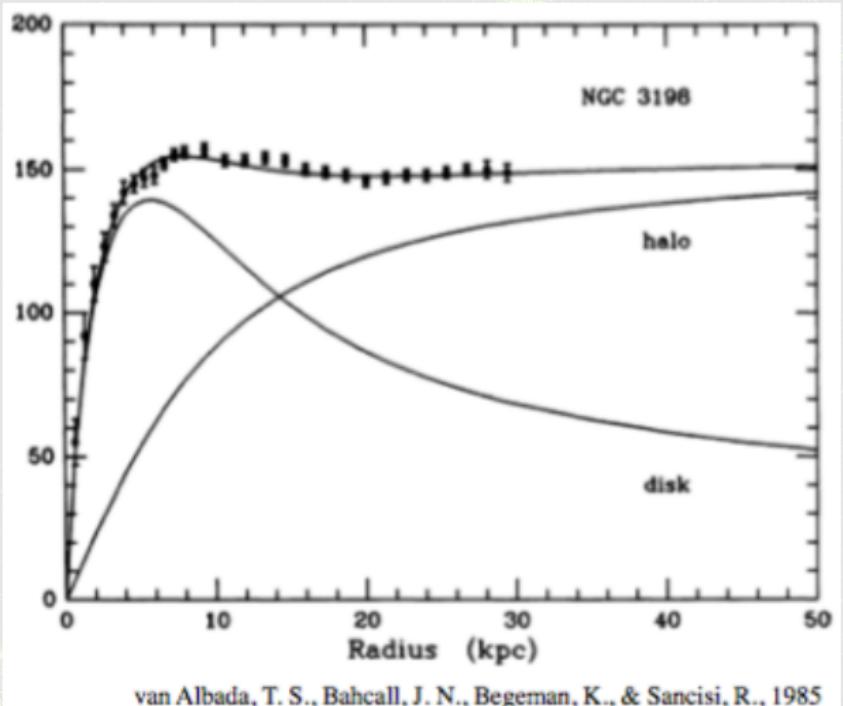


FIGURE: Curve di rotazione corrette con la materia oscura.



INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

# PARENTESI STORICA SULLE IPOTESI SCARTATE DI NEUTRINI, MOND, E MACHOS?



## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

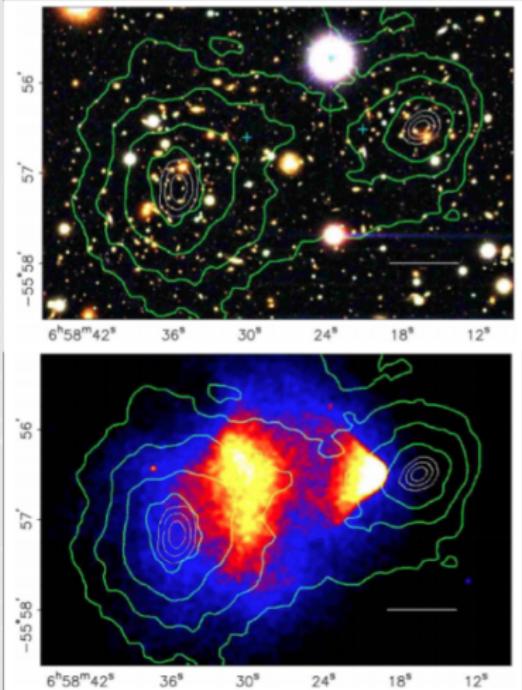
COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI



**FIGURE:** Clowe et al. (2006). Distribuzione del plasma caldo misurato da CHANDRA in raggi X. I contorni di distribuzioni di massa derivano da lenti gravitazionali.

# PROPRIETÀ DELLA MATERIA OSCURA

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

- ▶ **Stabile:** presente sin da epoche primordiali.
- ▶ **Non-collisionale:** electromagneticamente neutra. Se la Materia Oscura è soggetta ad interazioni, avvengono o a piccola scala o sono molto deboli.
- ▶ **Fredda:** non-relativistica, sin da epoche primordiali..

Quanto e' massiccia una particella di Materia Oscura?

Abbiamo bisogno di modelli.



## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSOMATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI



# COME CERCARE LA MATERIA OSCURA?

COSMOLOGIA

EDA GJERGJ

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

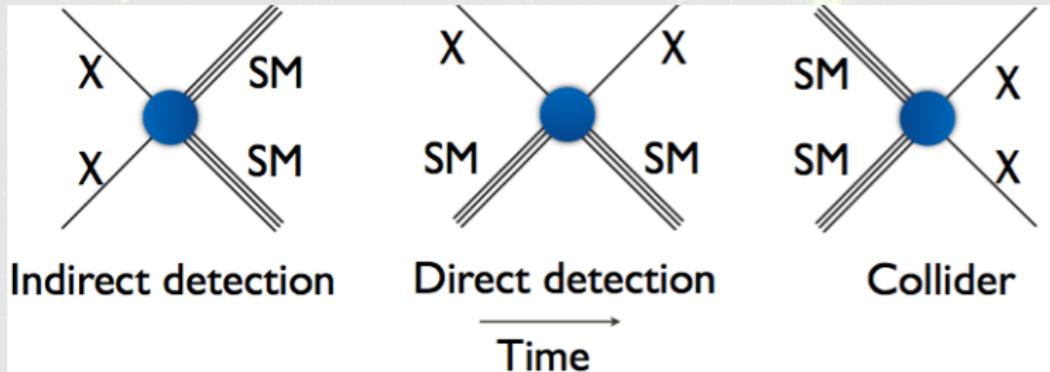
COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

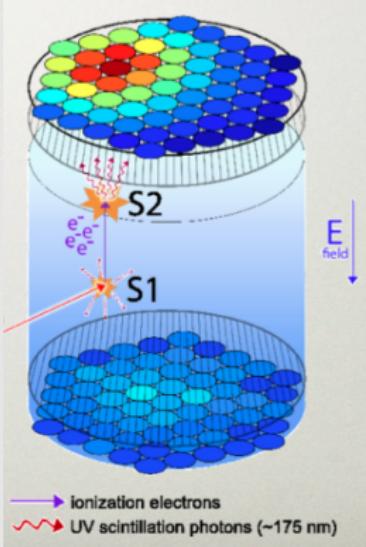


**FIGURE:** Sinistra: osservazioni indirette (astrofisica alle alte energie), Destra: Produzione di materia oscura in laboratorio (acceleratori di particelle), Centro: interazione di materia oscura con materia barionica (Laboratori specializzati).



# ESPERIMENTI DIRETTI DI MATERIA OSCURA

Esempio: LUX (Large Underground Xenon experiment)



**FIGURE:** LUX diagram.

Calibrato per l'osservazione di Particelle ad interazione debole - Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)

- ▶ Esperimento di materia oscura a nobile liquido (370kg xenon liquido).
- ▶ Sensori fotomoltiplicatori in cima e in fondo.
- ▶ Sepolto a 1.5 km sottoterra (per ridurre di  $10^7$  il tasso di muoni cosmico).  
 $\approx 125,000\text{cm}^3$
- ▶ multiple scatter detection possible
- ▶ Sia fasci di neutroni che WIMPs possono essere osservati, ma l'interazione WIMP ha bassa probabilità di ripetersi.

# TUTTI GLI ESPERIMENTI DI OSSERVAZIONE DIRETTA DI MATERIA OSCURA WIMP.

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

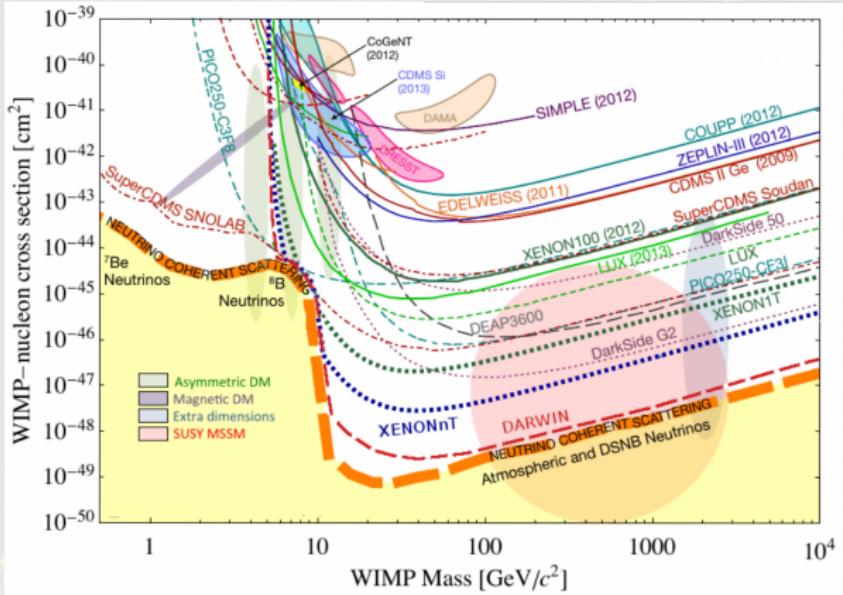
MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



**FIGURE:** Berkeley Workshop on Dark Matter Detection, Giugno 2015. Limiti sulla sezione d'urto dei WIMPs vs la loro possibile massa. Ci stiamo avvicinando al rumore di fondo dei neutrini senza aver scoperto alcun WIMP.

# SCOPERTA DELL'ENERGIA OSCURA

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA

SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



## The Nobel Prize in Physics 2011

Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess

*Share this:*

# The Nobel Prize in Physics 2011



Photo: U. Montan

**Saul Perlmutter**

Prize share: 1/2



Photo: U. Montan

**Brian P. Schmidt**

Prize share: 1/4



Photo: U. Montan

**Adam G. Riess**

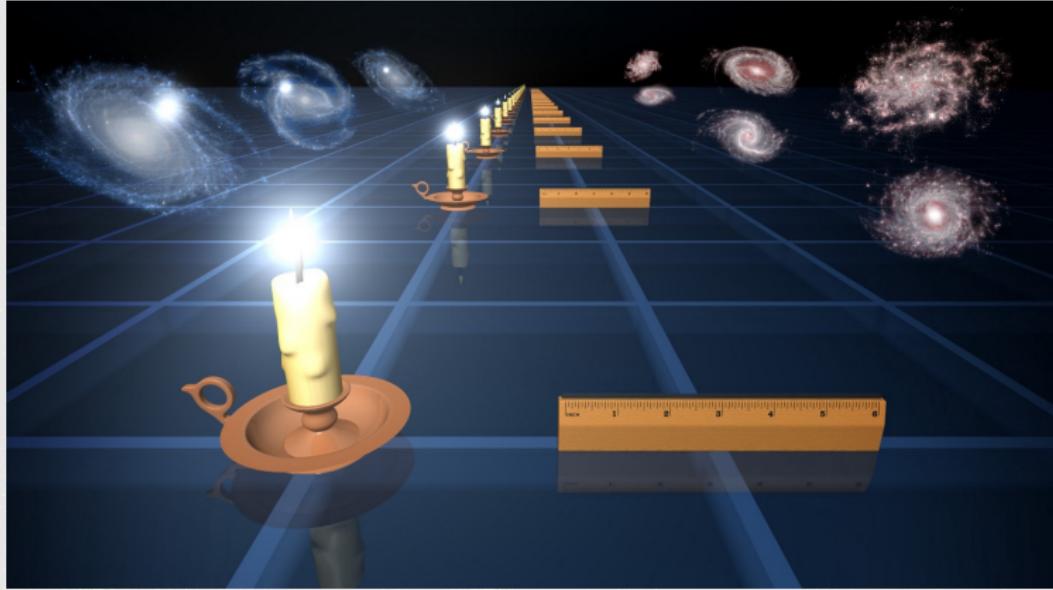
Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae".

Photos: Copyright © The Nobel Foundation



# COME MISURARE LE DISTANZE IN ASTRONOMIA? CANDELE STANDARD.



**FIGURE:** Sinistra: esistono corpi, candele standard, la cui magnitudine assoluta è pressocchè costante. Destra: esistono strutture le cui dimensioni fisiche noi conosciamo (Baryon Acoustic Oscillations - BAO).

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA

SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

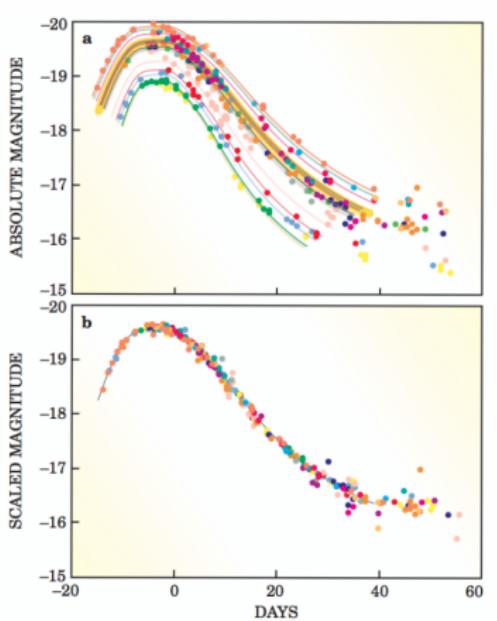
COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA

SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI



Kim et al. (1997). Curve di Luce delle supernove di Tipo Ia. Relazione tra luminosità e periodo.

# MODULO DI DISTANZA DELLE SUPERNOVE TIPO Ia VS IL TEMPO: HUBBLE DIAGRAM

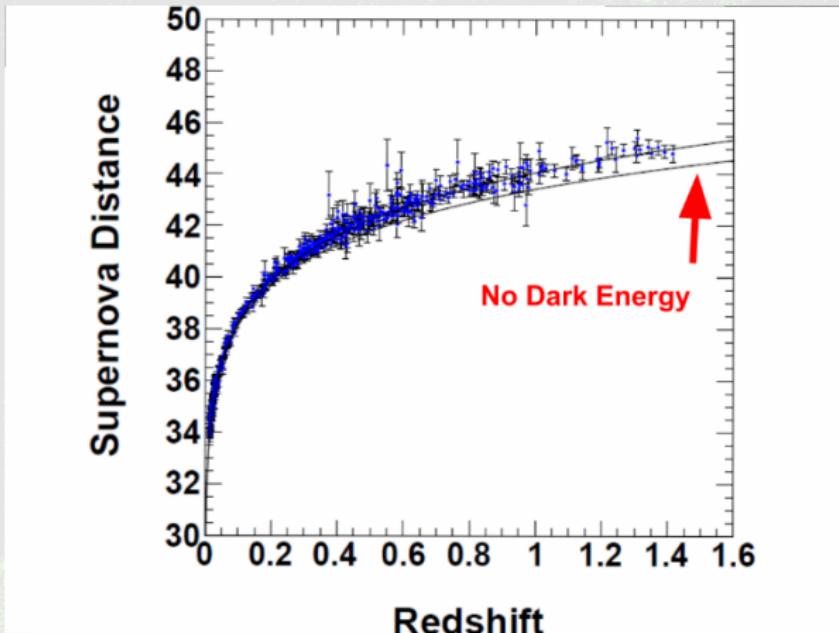


FIGURE: Gjergo et al. (2013), best fit dei dati delle supernove Ia + modello di evoluzione senza energia oscura. Supernova Distance è il modulo delle distanze  $\mu = m - M$ , il redshift  $z$  si relaziona al fattore scala tramite  $a = 1/(1+z)$

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA

ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE



ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA  
INAF  
NATIONAL INSTITUTE FOR ASTROPHYSICS

## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI

## ENERGIA OSCURA

Dall'Equazione di Friedmann:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3H_0c^2} \sum_i \rho_i = \frac{8\pi G}{3H_0c^2} \left[ \Omega_m a^{-3} + \Omega_e a^{-4} + \Omega_\Lambda a^{-3(1+w)} \right]$$

L'energia Oscura (in arancione) si pensa ora essere una costante (con parametro di stato  $w = p/\rho = -1$ ). Lo è? Esistono alternative? Due categorie principali:

## Gravità Modificata

Cambia solo la parte sinistra, quindi la "fisica" del sistema. Niente Energia Oscura, e Relatività inesatta.

## Quintessenza

Cambia solo la parte destra, quindi le componenti dell'Universo. Relatività valida, ma introduce una nuova componente dell'Universo.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{1}{6} f - \frac{\ddot{a}}{a} f_R + \frac{\dot{a}}{a} \dot{f}_R = \frac{8\pi G}{3H_0c^2} \sum_i \rho_i$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3H_0c^2} \sum_i \rho_i + \frac{1}{2c^2} \dot{\phi}^2 + V(\phi)$$

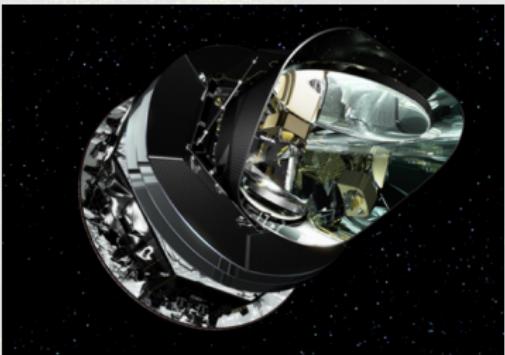
# STORIA DELLA CMB

Scoperta



Penzias and Wilson  
hanno scoperto la CMB per caso (1965)

Satellite di ultima generazione Planck (risultati resi pubblici nel 2013)



COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

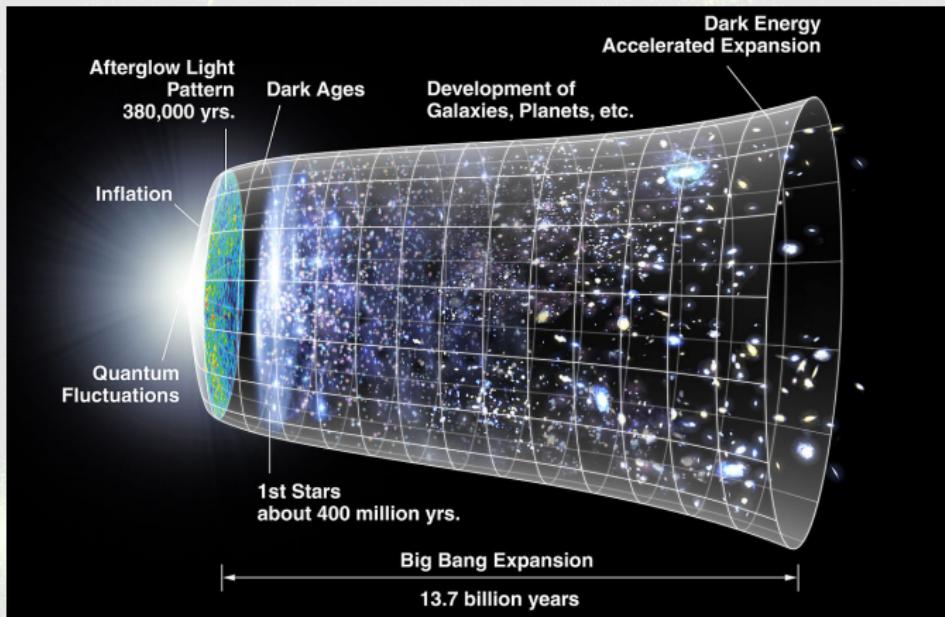
MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI



# QUANDO L'UNIVERSO DIVENNE TRASPARENTE: LA RADIAZIONE COSMICA DI FONDO



# L'UNIVERSO ERA UN PLASMA

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

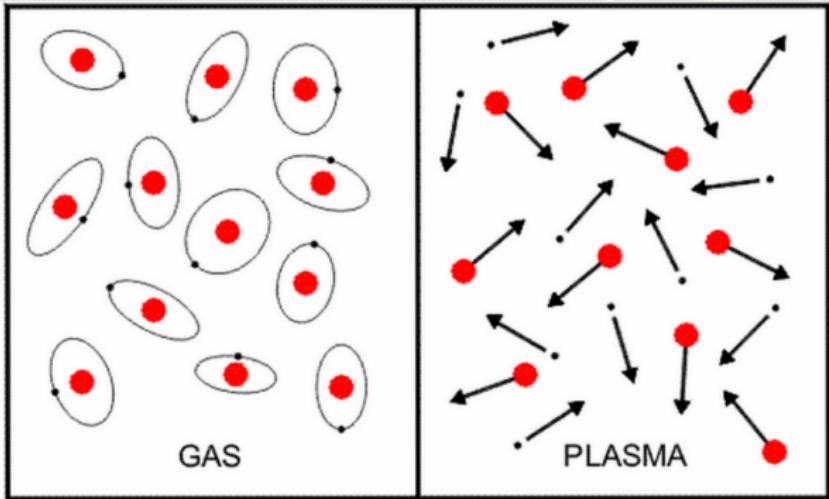
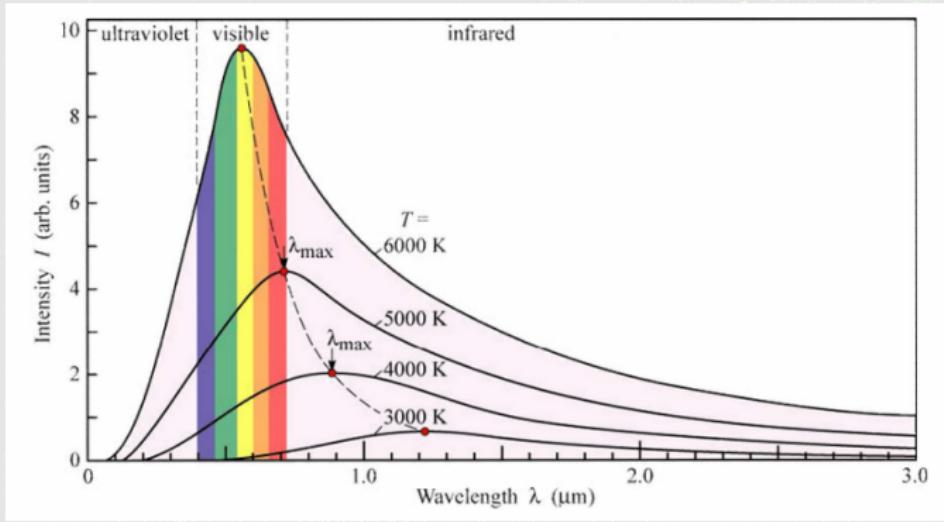


FIGURE: Destra: L'universo primordiale era un plasma. Sinistra: L'universo gassoso post ricombinazione.

La temperatura dell'Universo decresce come  $T \propto a^{-1}$ .  
Quindi come l'Universo si espande, si raffredda. .



Il picco massimo è descritto dalla legge di Wien:

$$\lambda_{\max} T = 0.29 \text{ cmK}.$$

Il profilo è governato dalla legge di Stefan-Boltzman:

$$L = 4\pi\alpha r^2 T^4 \quad (13)$$

$$\alpha = 5.67 \times 10^{-5} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ T}^{-4} \quad (14)$$

## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI



## TEMPERATURA MINIMA DEL PLASMA.

- ▶ Vedrete nella prossima lezione che l'universo barionico a quei tempi era composto principalmente da fotoni, elettroni, neutrini, e nuclei di idrogeno ed elio.
- ▶ La nucleosintesi primordiale dell'Idrogeno e dell'Elio avviene a temperature di  $T \sim 10^9 K \sim 0.1 MeV$ .
- ▶ Massa in eV dell'elettrone? Questo plasma è relativistico o no?
- ▶ Stato fondamentale dell'idrogeno in eV?
- ▶ L'universo deve scendere sotto  $T \sim 0.3 eV \sim 3300 K$  prima che la temperatura sia sufficientemente bassa perché si riduca a gas.

## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

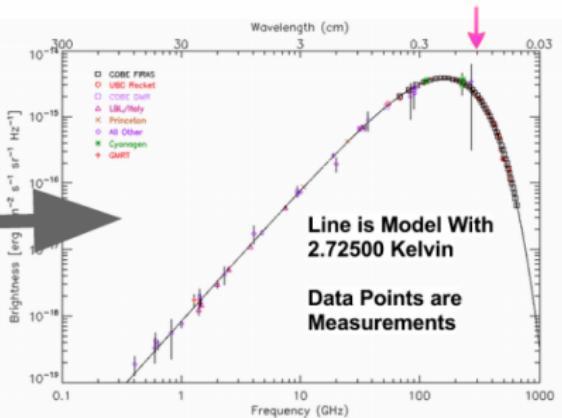
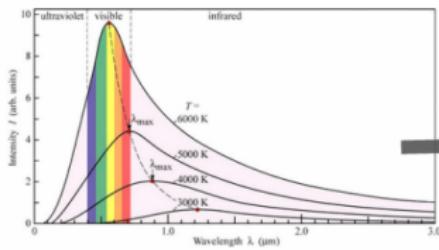
## CMB

## CONCLUSIONI

# OGGI...

Oggi osserviamo questa radiazione del corpo nero, ma allargata di un fattore 1100. Il picco è nelle microonde, and una temperatura di circa 3K.

Ci si riferisce talvolta a questa come 'temperatura' dell'universo, la radiazione di corpo nero che ci permea.



## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

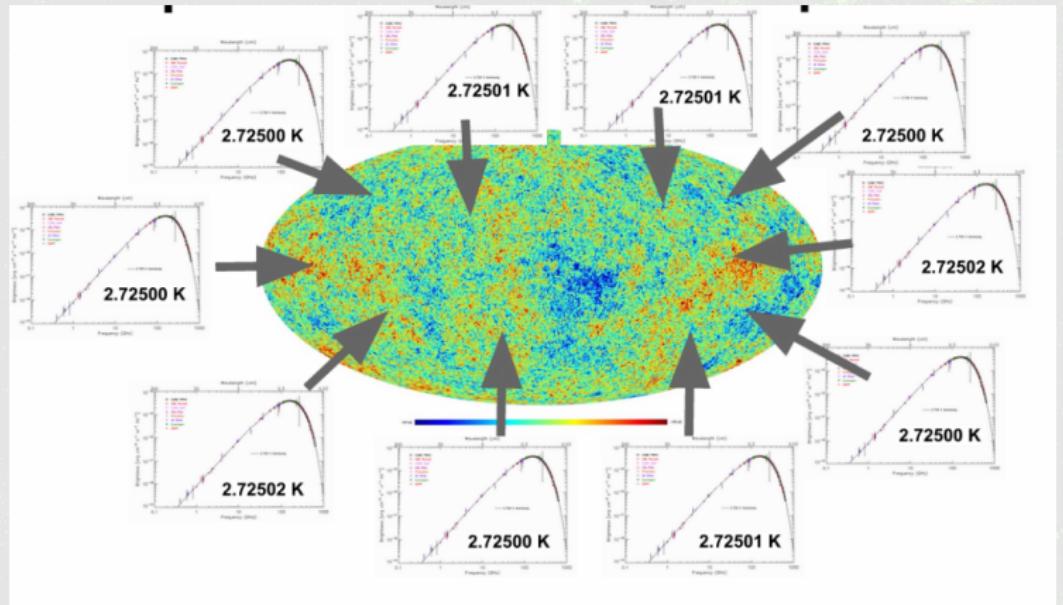
COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI

## TEMPERATURA DELLA VOLTA CELESTE



**FIGURE:** Possiamo misurare qual'è la radiazione del corpo nero emessa da tutte le direzioni dell'Universo. Questa mappa è stata osservata nel dettaglio maggiore dal satellite Planck.

## INTRODUZIONE

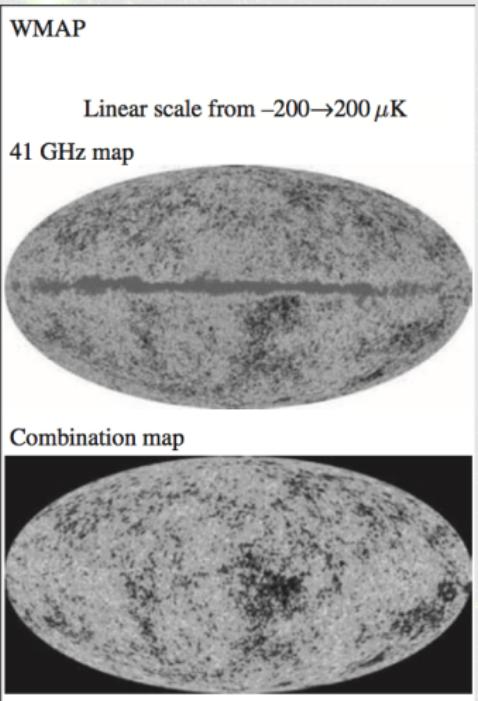
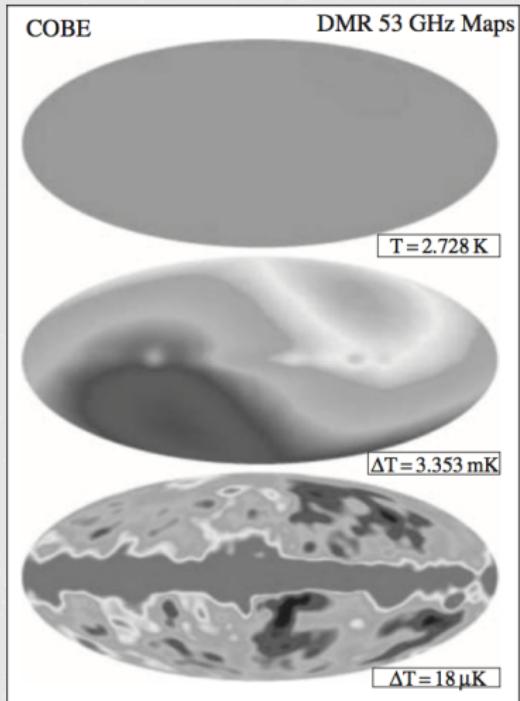
SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI



**FIGURE:** Mappe della CMB. ©NASA Goddard Space Flight Center

# ANISOTROPIA DELLA CMB I

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l,m} a_{l,m} Y_{l,m}(\theta, \phi) \quad (15)$$

La mappa delle fluttuazioni di temperatura viene espansa in armoniche sferiche.

Lo spettro angolare di potenza della radiazione cosmica di fondo alle microonde (cosmic microwave background - CMB) è  $C_l \equiv \sqrt{\langle |a_{l,m}|^2 \rangle}$  (mediato sul momento angolare  $m$ ).

Quindi possiamo plottare le fluttuazioni di temperatura  $l(l+1)C_l/2\pi$  vs il momento del multipolo  $l$ .



# ANISOTROPIA DELLA CMB II

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

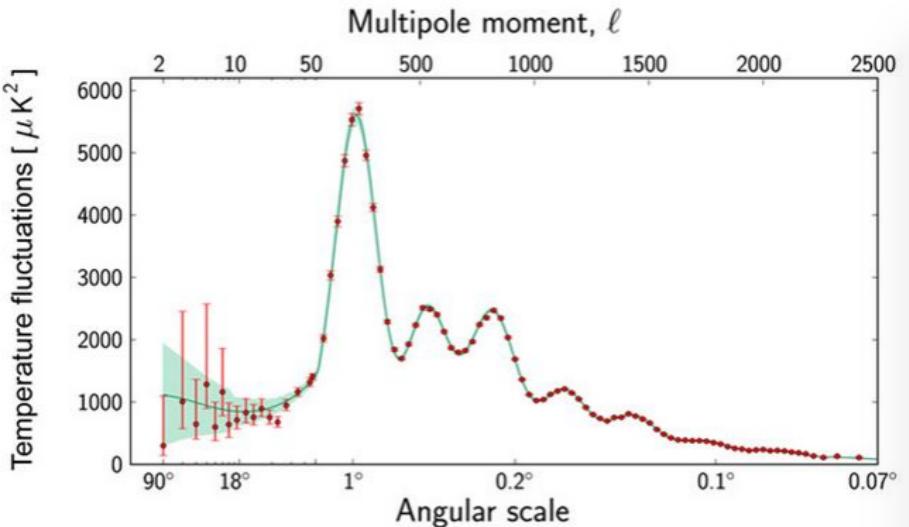
SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



**FIGURE:** Le fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo dipendono fortemente dalle componenti dell'Universo. Prova schiacciente, assumendo che la Relatività sia corretta, dell'esistenza di Materia ed Energia Oscura con le proprietà elencate finora.

## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

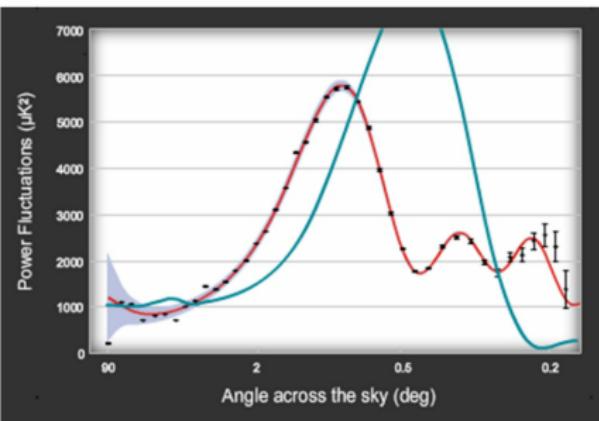
## CMB

## CONCLUSIONI



# COSA PREDICE LA TEORIA CON COMPONENTI DIVERSE? I

Blue Curve is with 100% Atoms



[http://map.gsfc.nasa.gov/resources/camb\\_tool/index.html](http://map.gsfc.nasa.gov/resources/camb_tool/index.html)

[http://map.gsfc.nasa.gov/resources/camb\\_tool/cmb\\_plot.suf](http://map.gsfc.nasa.gov/resources/camb_tool/cmb_plot.suf)

## INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OScura  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

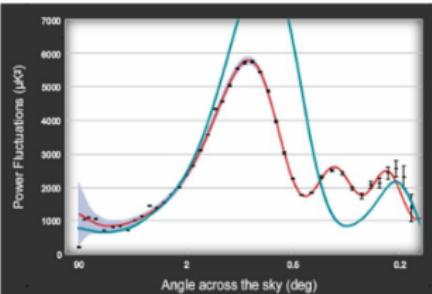
## CMB

## CONCLUSIONI

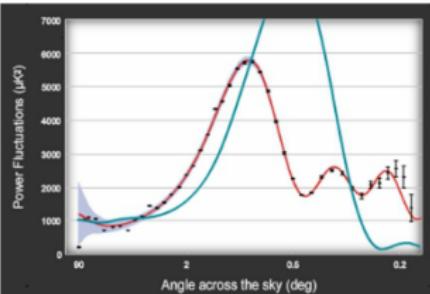


# COSA PREDICE LA TEORIA CON COMPONENTI DIVERSE? II

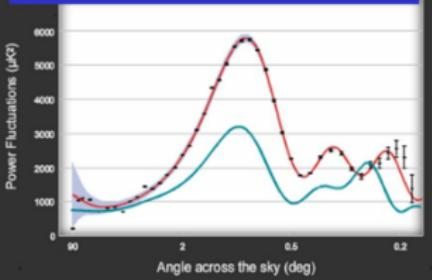
74% Dark Matter, 22% Atoms,  
4% Dark Energy



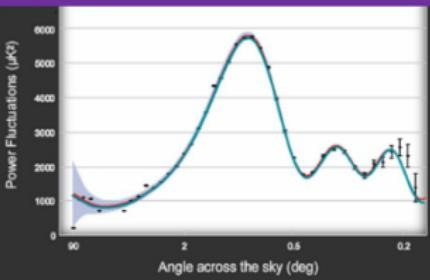
74% Atoms, 22% Dark Energy,  
4% Dark Matter



74% Dark Matter, 4% Atoms,  
22% Dark Energy



74% Dark Energy, 22% Dark Matter,  
4% Atoms



## INTRODUZIONE

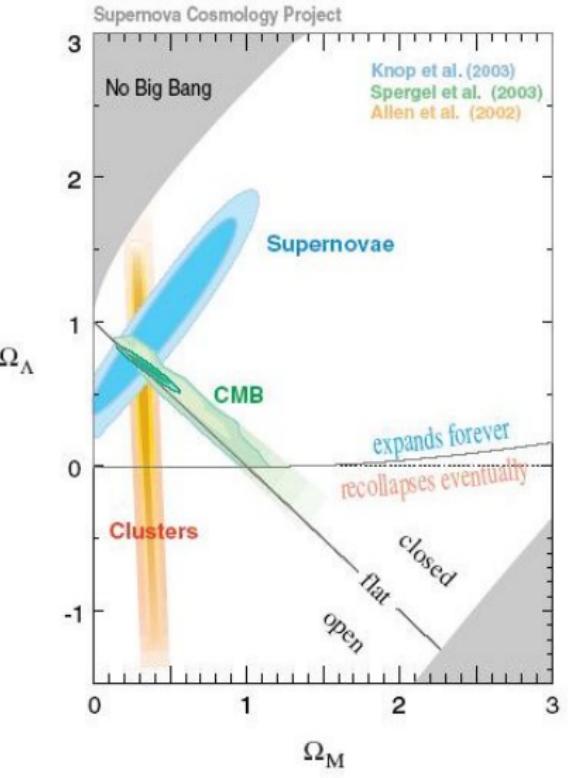
SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OScura  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI



Esperimenti trovano indipendentemente dei valori congruenti sulle abbondanze di Materia (barionica + oscura) ed Energia Oscura.

# RIEPILOGO I

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



- ▶ La Relatività (ristretta - sistemi inerziali) aggiorna la dinamica con il vero assoluto invariante: la velocità della luce.
- ▶ La Relatività (generale - teoria della gravità generalizzata) equipara sistemi accelerati con sistemi gravitazionali → la gravità deforma lo spazio-tempo.
- ▶ la forma dello spazio-tempo viene descritta con le metriche, e dalle Equazioni di Einstein ricaviamo le equazioni di moto generali.
- ▶ Se la Relatività generale è corretta, la materia barionica costituisce solo  $\approx 5\%$  di tutto il "contenuto" dell'Universo.

# RIEPILOGO II

- ▶ La Materia Oscura pare costituire l'85% di tutta la materia non-relativistica (25% del totale). È stabile, piccola, e probabilmente è inerte all'elettromagnetismo.
- ▶ L'Energia Oscura (70% del totale) pare essere una strana energia del vuoto che fa espandere lo spazio-tempo, opponendo il collasso della gravità.
- ▶ Ci sono diversi esperimenti che puntano tutti all'esistenza di Materia ed Energia Oscura:
  - ▶ Problema di Rotazione Galattico (e degli ammassi galattici) per Materia Oscura.
  - ▶ Supernove di Tipo Ia per Energia Oscura.
  - ▶ Radiazione Cosmica di Fondo alle Microonde per entrambe.
  - ▶ altri come BAO.

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



# MATERIA OSCURA O ENERGIA OSCURA?

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

Nell'equazione di Friedmann:

$$H^2 = H_0^2 [\Omega_m a^{-3} + \Omega_e a^{-4} + \Omega_\Lambda]$$

- ▶ Materia Oscura (in arancio, assieme alla materia barionica) è una massa costante nel tempo. La sua densità decresce all'aumentare del volume.
- ▶ Energia Oscura (viola) sembra essere una densità energetica costante.



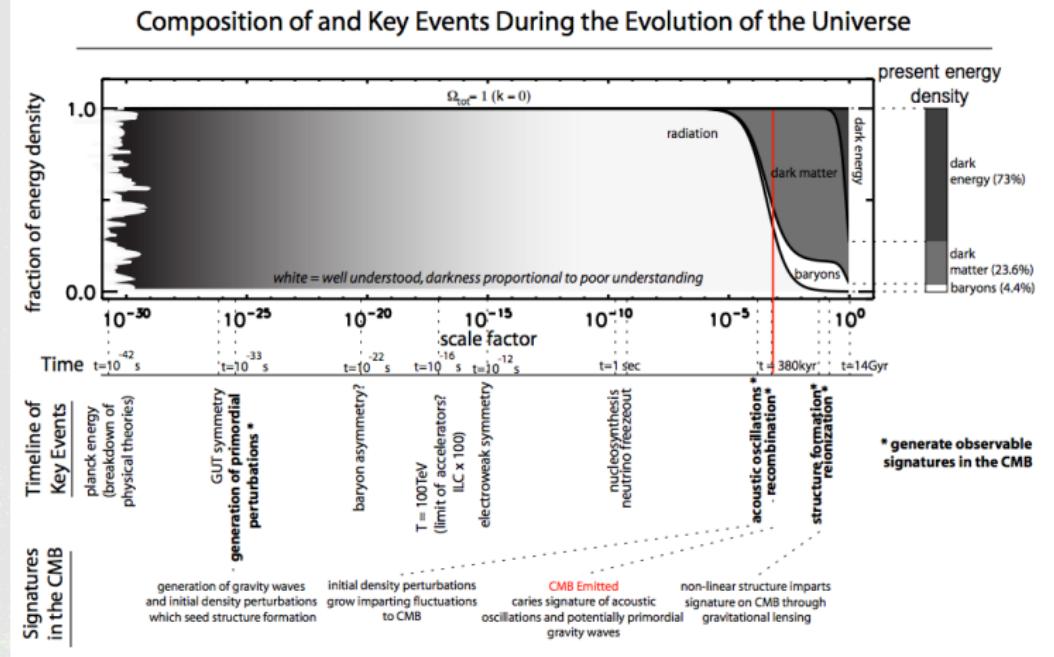


FIGURE: Credit: Jeff McMahon, University of Michigan.

# TEMPI ED ENERGIE DEI PROCESSI COSMOLOGICI

$t$	$\rho^{1/4}$	Event
$10^{-42}$ s	$10^{18}$ GeV	Inflation begins?
$10^{-32 \pm 6}$ s	$10^{13 \pm 3}$ GeV	Inflation ends, Cold Big Bang begins?
$10^{-18 \pm 6}$ s	$10^{6 \pm 3}$ GeV	Hot Big Bang begins?
$10^{-10}$ s	100 GeV	Electroweak phase transition?
$10^{-4}$ s	100 MeV	Quark-hadron phase transition?
$10^{-2}$ s	10 MeV	$\gamma, \nu, e, \bar{e}, n,$ and $p$ in thermal equilibrium
1 s	1 MeV	$\nu$ decoupling, $e\bar{e}$ annihilation.
100 s	0.1 MeV	Nucleosynthesis (BBN)
$10^4$ yr	1 eV	Matter-radiation equality
$10^5$ yr	0.1 eV	Atom formation, photon decoupling (CMB)
$\sim 10^9$ yr	$10^{-3}$ eV	First bound structures form
Now	$10^{-4}$ eV (2.73 K)	The present.

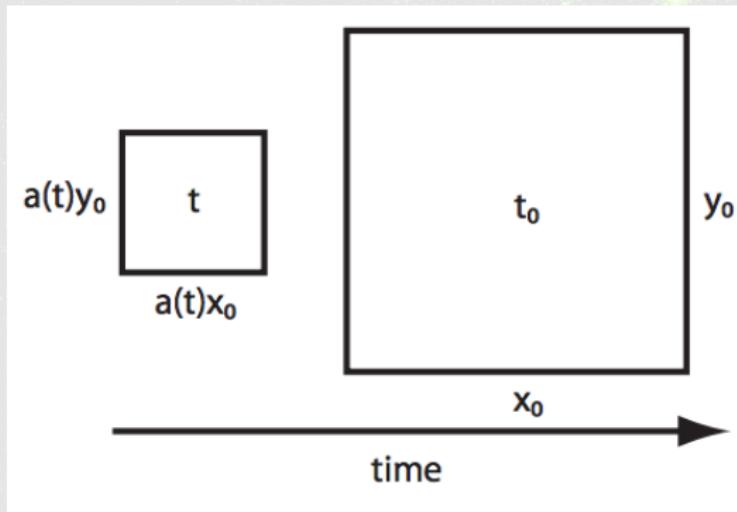


FIGURE: Significato del fattore scala.

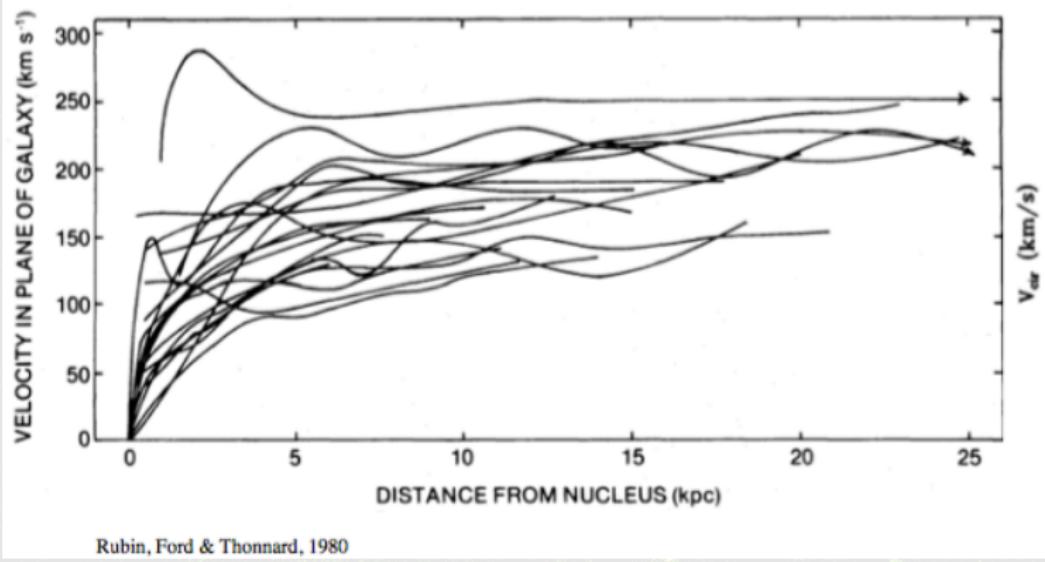


FIGURE: Several galaxy rotation curves. Flat profile.

