

# 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

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



# 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

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

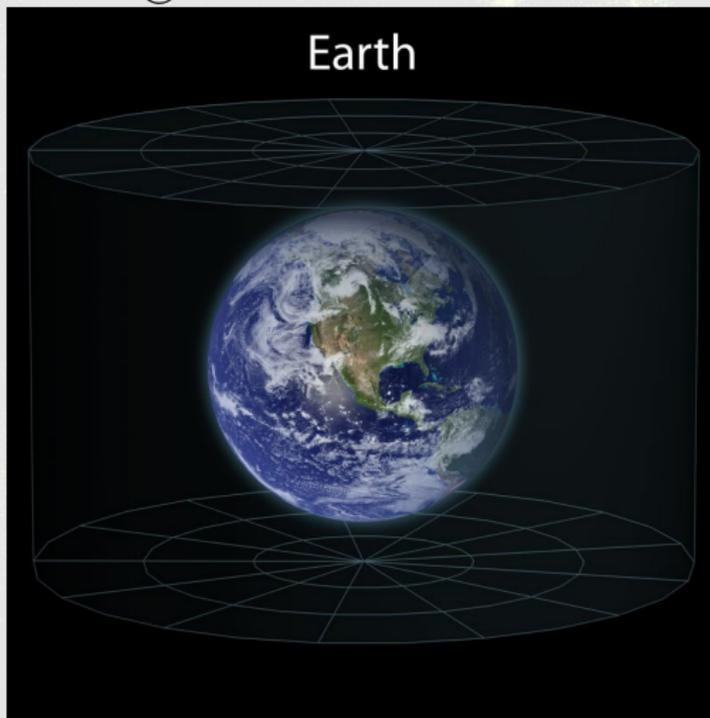
### CONCLUSIONI



# SCALE DELL'UNIVERSO

Visita anche il sito: "scaleofuniverse.com"

©JPL, Andrew Z. Colvin.



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



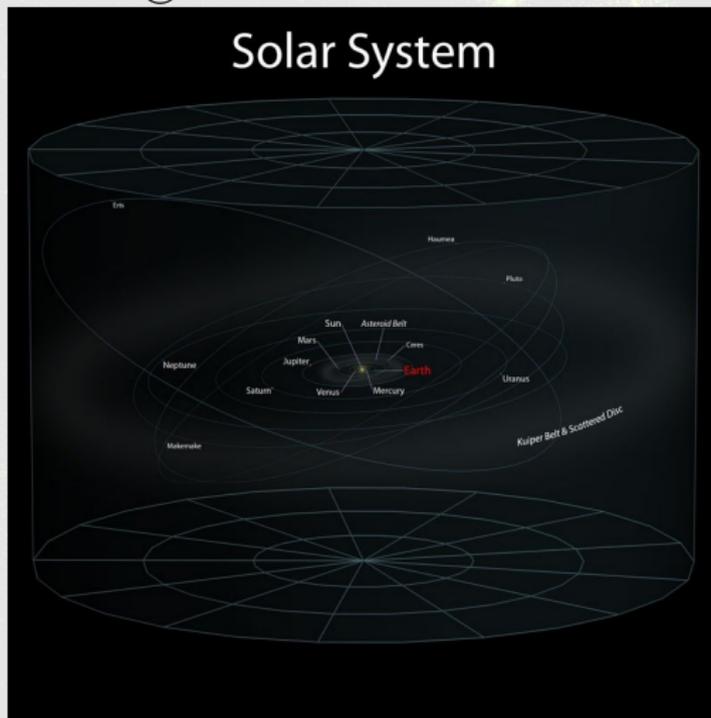
UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE



# SCALE DELL'UNIVERSO

Visita anche il sito: "scaleofuniverse.com"

©JPL, Andrew Z. Colvin.



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





# SCALE DELL'UNIVERSO

Visita anche il sito: "scaleofuniverse.com"

©JPL, Andrew Z. Colvin.



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

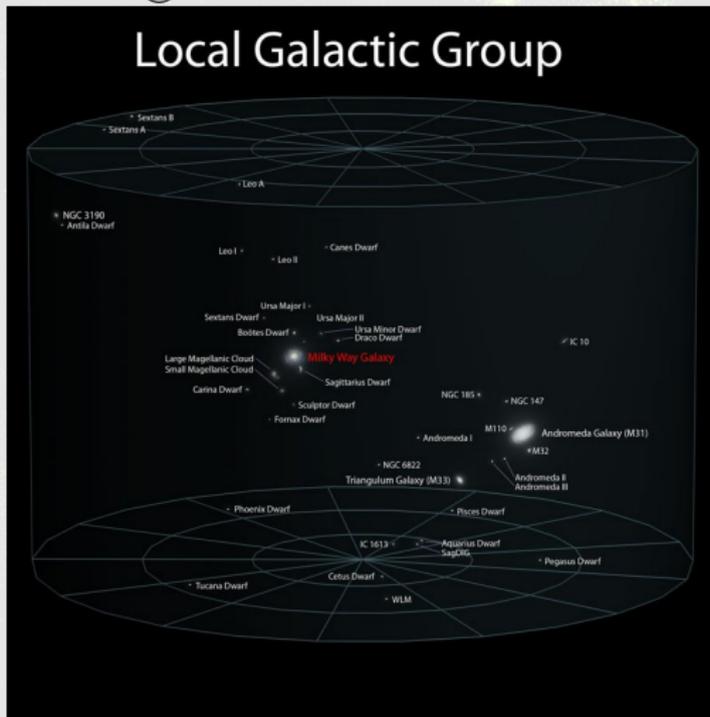


# SCALE DELL'UNIVERSO

Visita anche il sito: "scaleofuniverse.com"

©JPL, Andrew Z. Colvin.

## Local Galactic Group



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

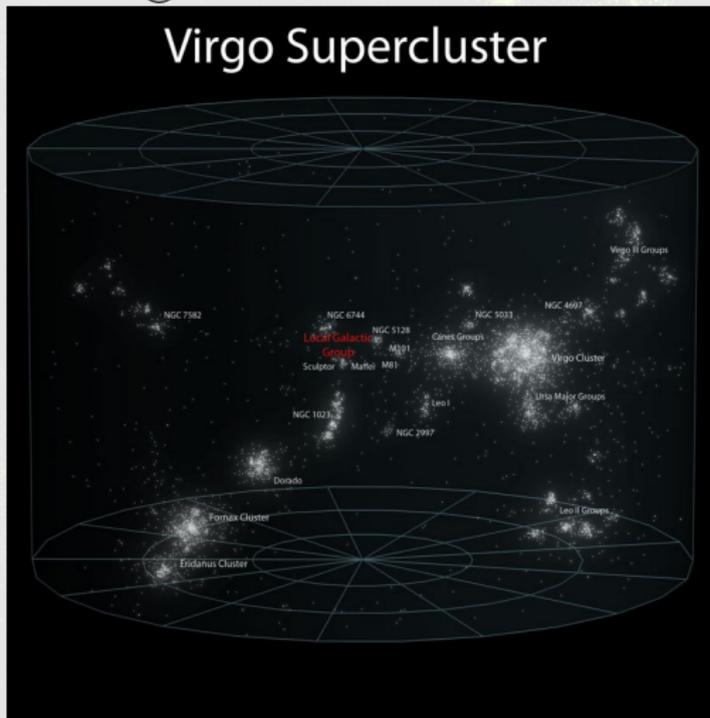


# SCALE DELL'UNIVERSO

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

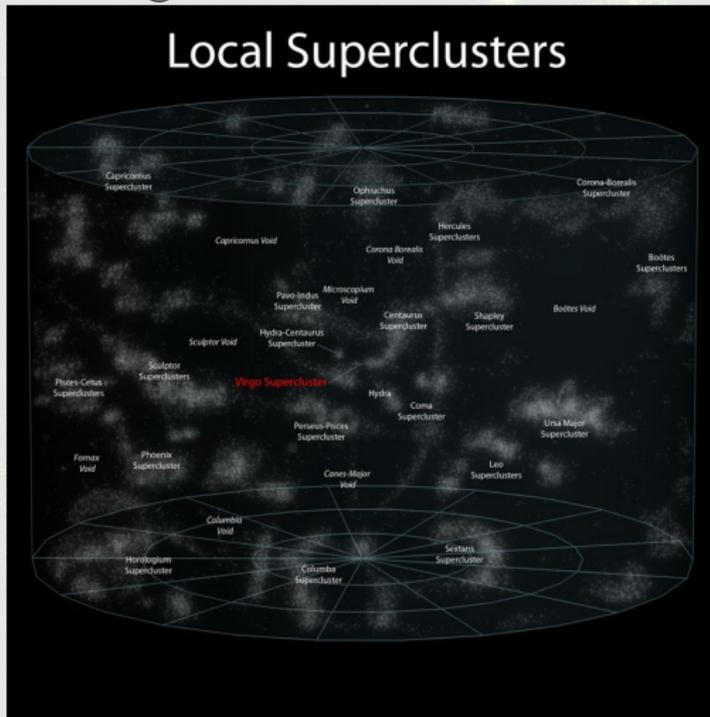


# SCALE DELL'UNIVERSO

Visita anche il sito: "scaleofuniverse.com"

©JPL, Andrew Z. Colvin.

## Local Superclusters



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

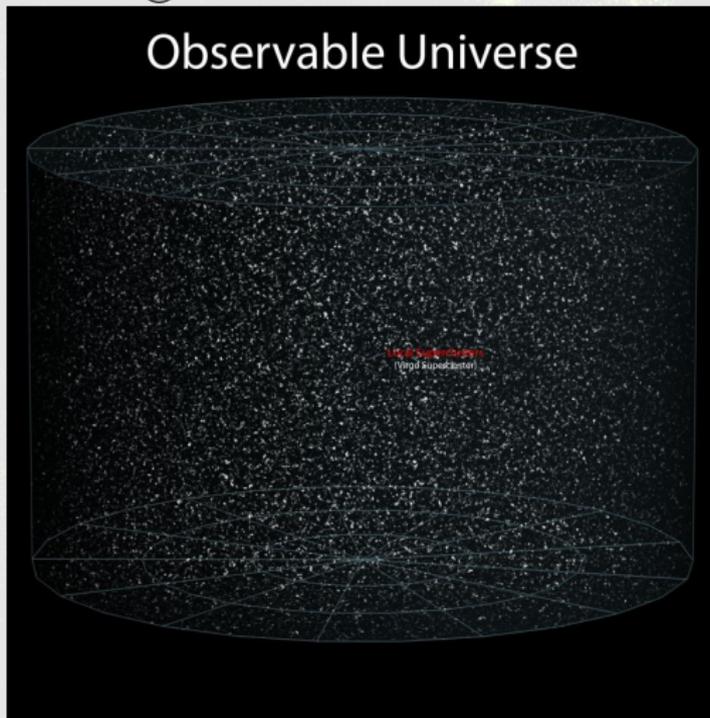


# SCALE DELL'UNIVERSO

Visita anche il sito: "scaleofuniverse.com"

©JPL, Andrew Z. Colvin.

## Observable Universe



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



# 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

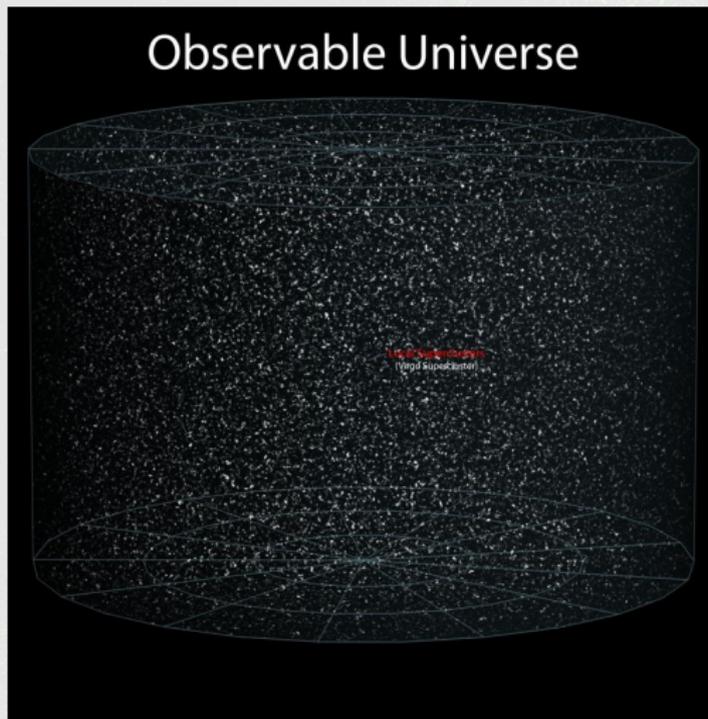
ENERGIA OSCURA

SCOPERTA

ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



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



# RELATIVO E ASSOLUTO I

- ▶ È stato Planck a chiamare la teoria di Einstein "Relatività".
- ▶ Einstein aveva coniato il termine "Teoria delle Invarianti"

Cos'è un'invariante?



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



# 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

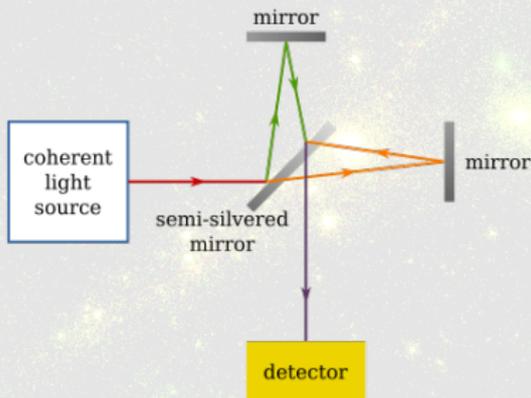
CMB

CONCLUSIONI



# RELATIVO E ASSOLUTO III

- ▶ La meccanica classica postula che spazio e tempo siano assoluti per ogni osservatore (inerziale).
- ▶ Osservazioni dimostrarono che la luce viaggia alla stessa velocità in tutti i sistemi inerziali.



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

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

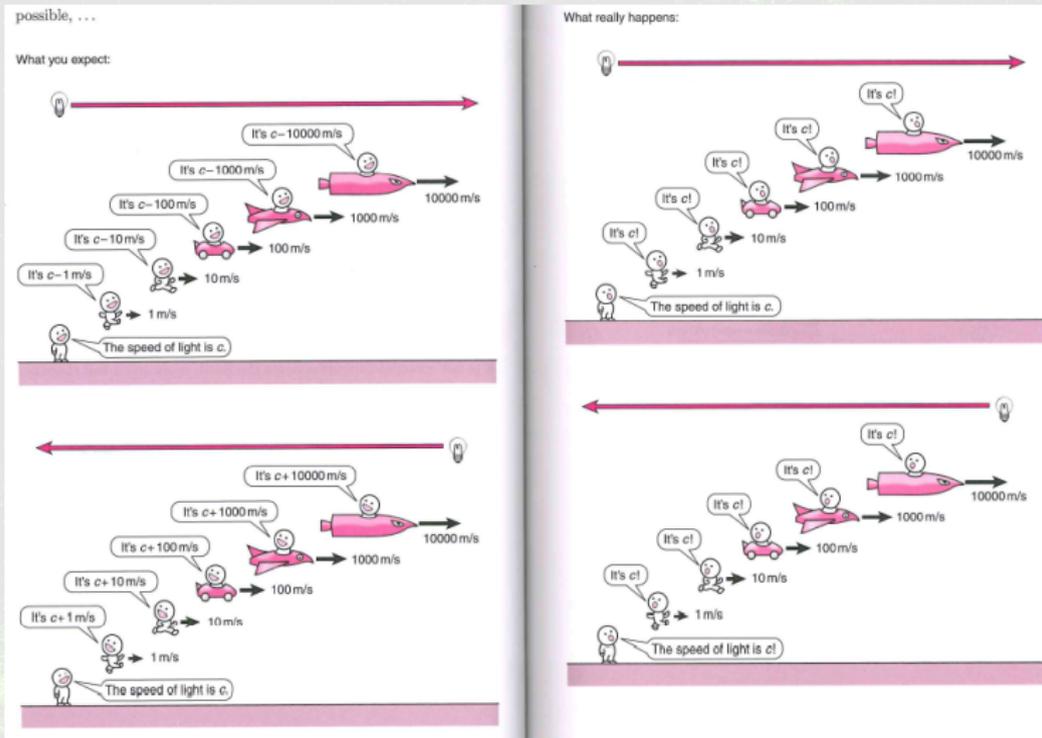


FIGURE: Tatsu Takeuchi, *An Illustrated Guide to Relativity*.



# QUALCOSA DI SBAGLIATO NELL'INVARIANTE INTUITIVA

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

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

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

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.

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

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

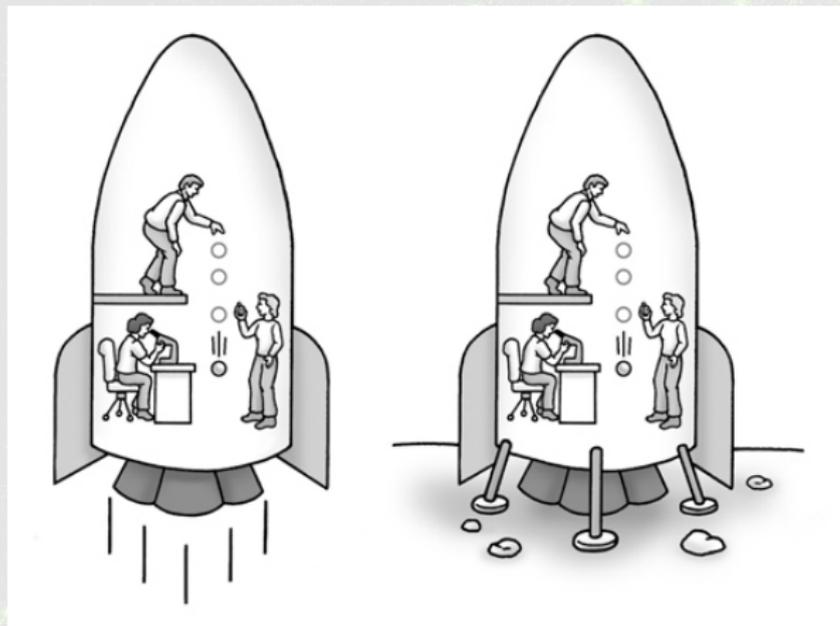


Con la relatività (ristretta), abbandoniamo l'ipotesi di spazio e tempo assoluti per ogni osservatore, a favore di una assoluta velocità della luce.

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



# PRINCIPIO DI EQUIVALENZA



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

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



# LOCALITÀ E NON-LOCALITÀ

Video srvsgr

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



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

Metrica di Minkowski (relatività ristretta)

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

Descrive proprietà locali, dove la gravità può essere trascurata.

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

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

Descrive 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.

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  
COSMOLOGIACOMPONENTI  
DELL'UNIVERSOMATERIA OSCURA  
PANORAMICARICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURAENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI

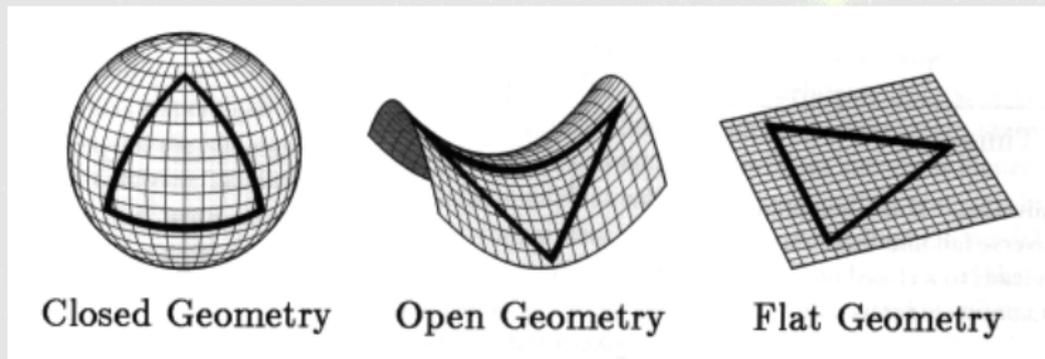


FIGURE: curvatura  $k$  di una geometria

# A CHE SERVE LA METRICA?

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.

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



# SCOPI DELLA COSMOLOGIA I

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

## 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:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \sum_i \rho_i \quad (6)$$

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \Omega_{0,R} a^{-4} + \Omega_{0,M} a^{-3} + \Omega_{0,k} a^{-2} + \Omega_{\Lambda}$$

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



# SCOPI DELLA COSMOLOGIA II

COSMOLOGIA

EDA GERGO

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

- ▶  $H$ : 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



# STORIA D'ESPANSIONE DELL'UNIVERSO

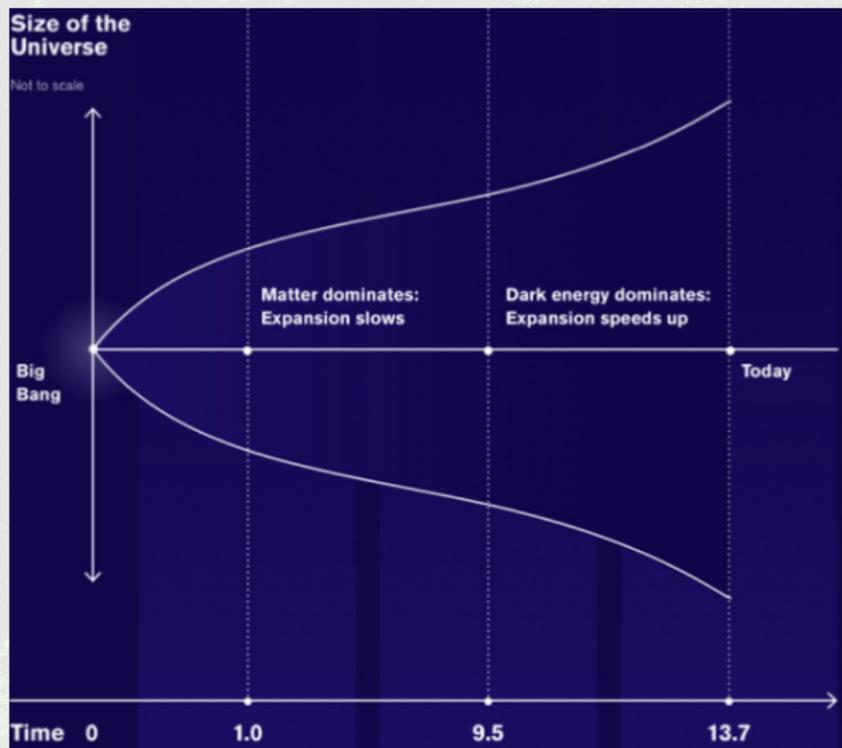


FIGURE: L'asse x e' il tempo in Giga-anni, l'asse y e' il fattore scala  $a$  di espansione dell'Universo, descritto dall'equazione di Friedmann. (© DESC)

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



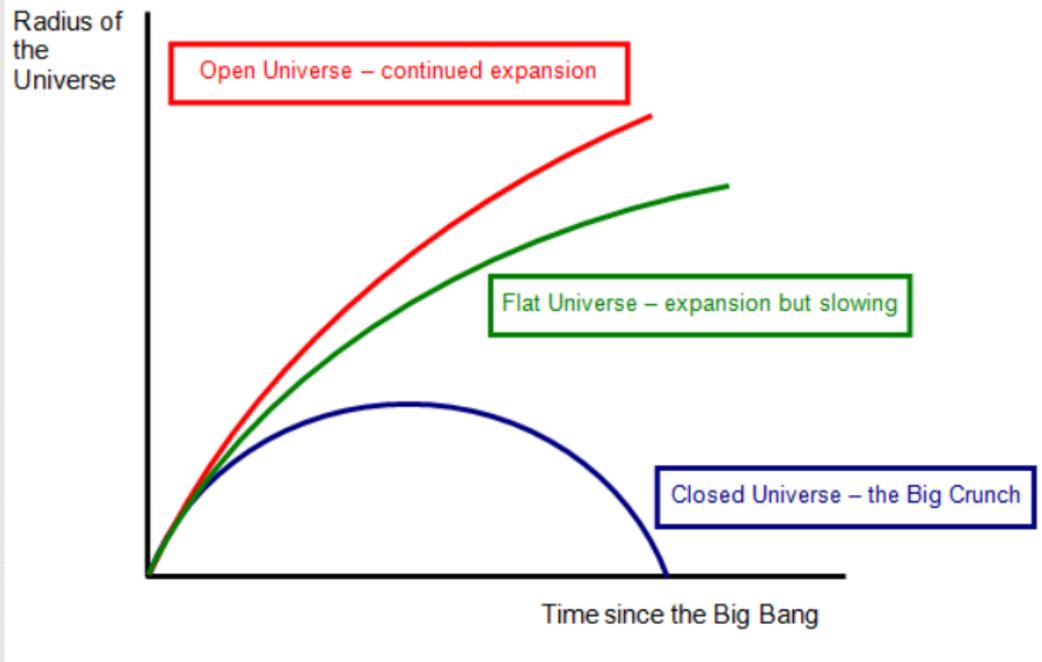


FIGURE: Modelli di espansione di Friedmann.

# COMPONENTI DELL'UNIVERSO

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

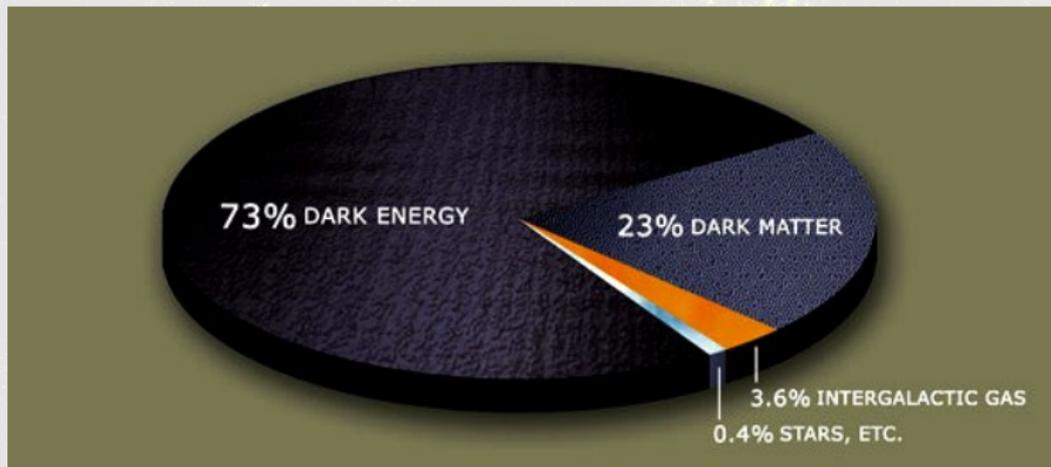


FIGURE: © Planck Collaboration

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ

SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

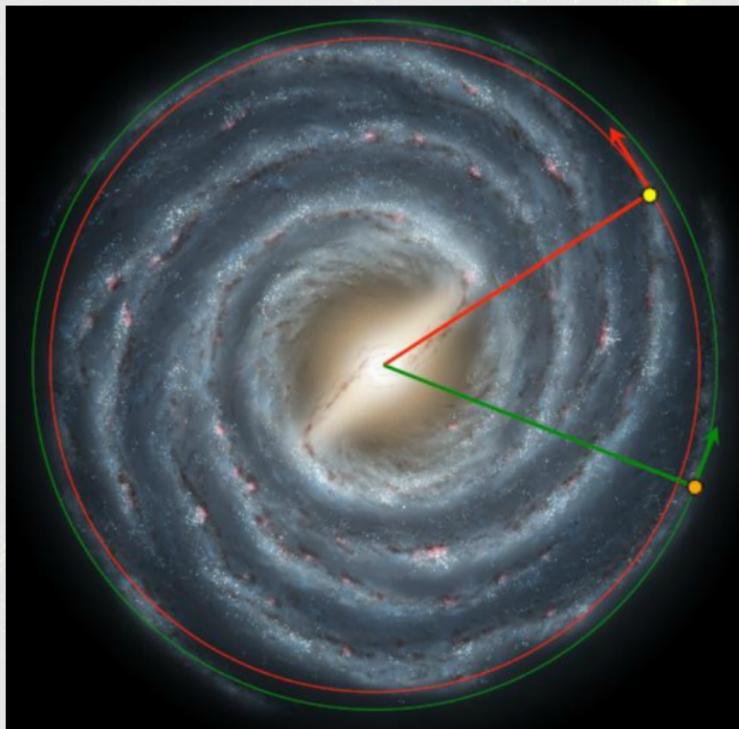
MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



# 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



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

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

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

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

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

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

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

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

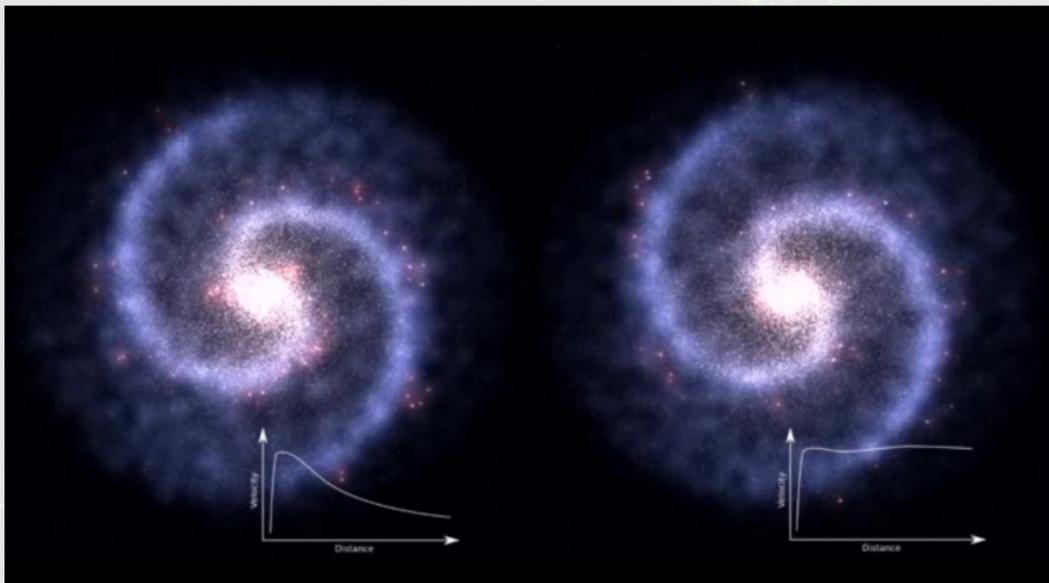
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



# MATERIA OSCURA: COSA CI ASPETTIAMO VS COSA OSSERVIAMO



**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.

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

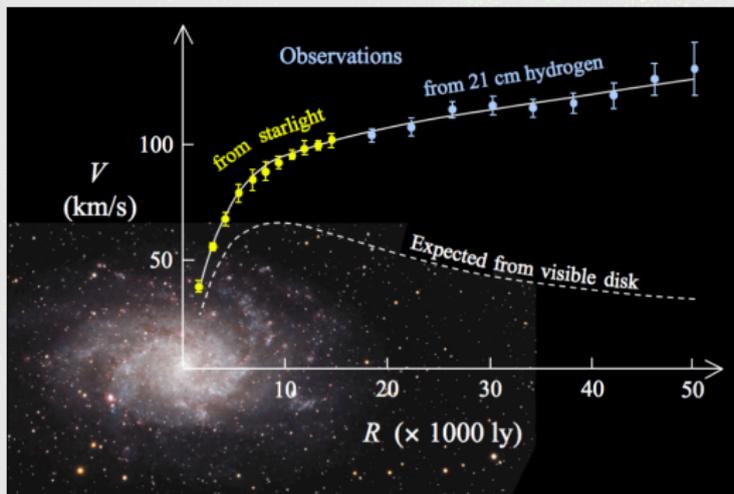
MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

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  
COSMOLOGIA

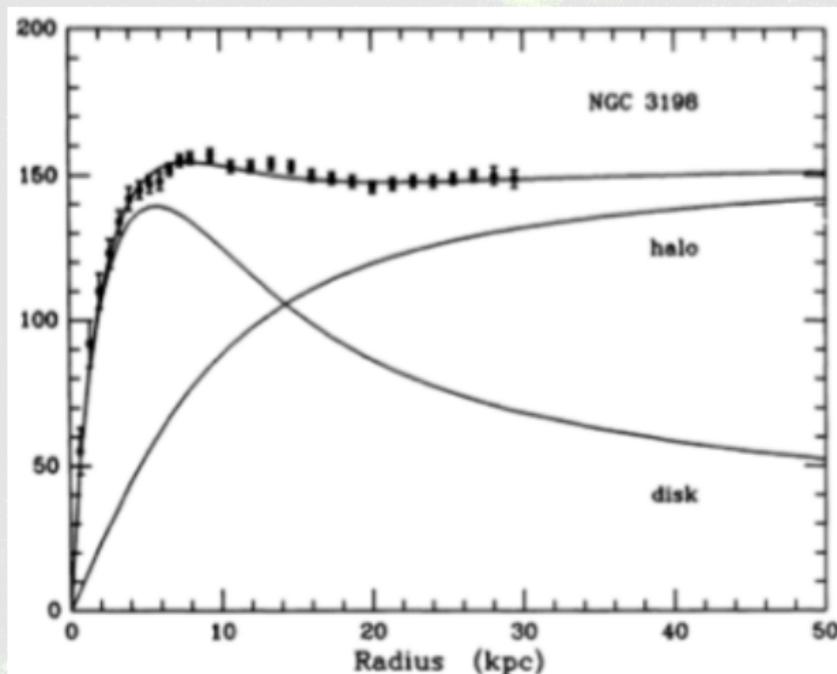
COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

## CMB

## CONCLUSIONI



van Albada, T. S., Bahcall, J. N., Begeman, K., & Sancisi, R., 1985

FIGURE: Curve di rotazione corrette con la materia oscura.

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

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

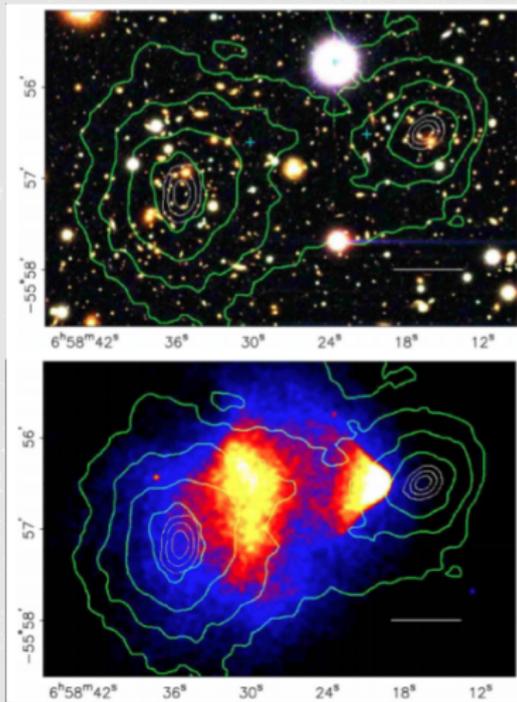
CONCLUSIONI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE



# BULLET CLUSTER



**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.

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



# PROPRIETÀ DELLA MATERIA OSCURA

- ▶ **Stabile:** presente sin da epoche primordiali.
- ▶ **Non-collisionale:** elettromagneticamente 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.

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



# IL GROVIGLIO DI IPOTESI



QCD Axions  
Taken from talk by Tim Tait,  
Snowmass July 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

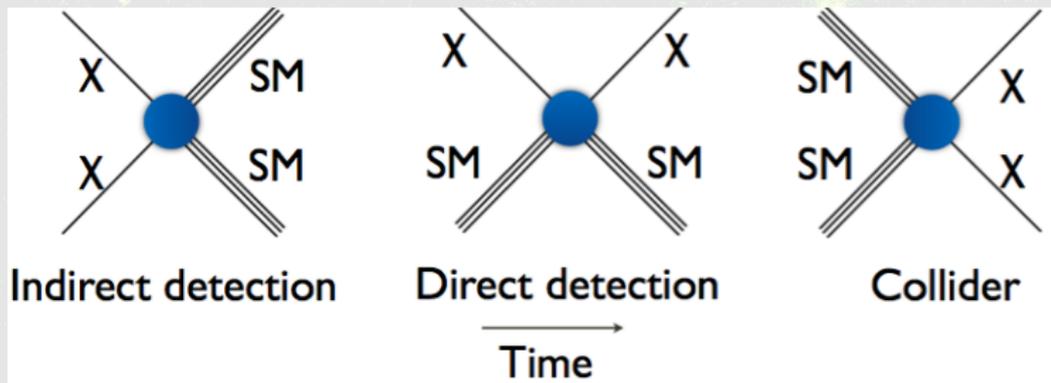
CONCLUSIONI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE



# COME CERCARE LA MATERIA OSCURA?



**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).

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

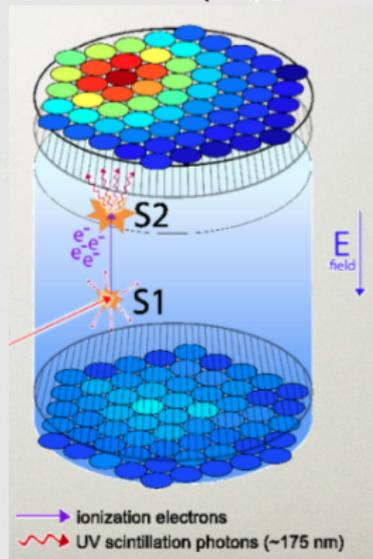
CMB

CONCLUSIONI



# 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.

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

MATERIA OSCURA  
PANORAMICA

RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA

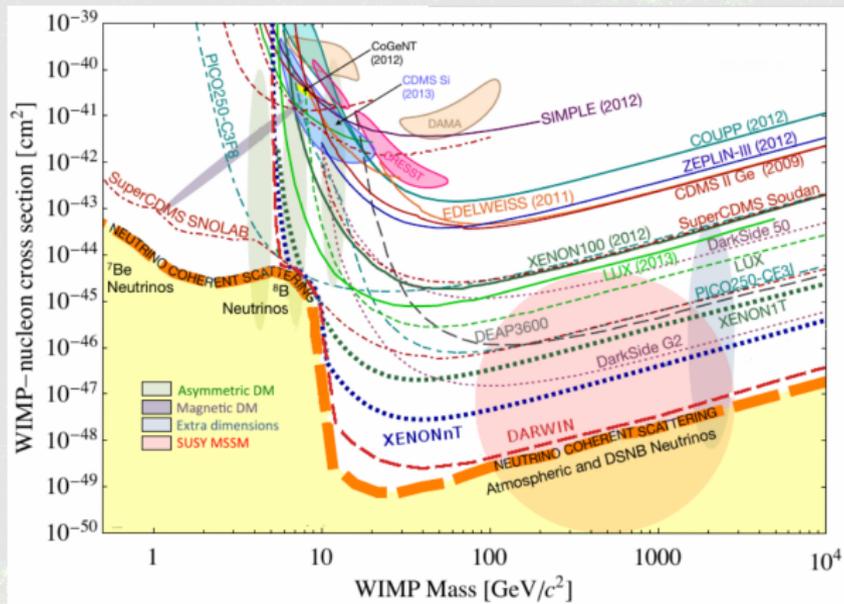
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



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



**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.

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



# 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"*.

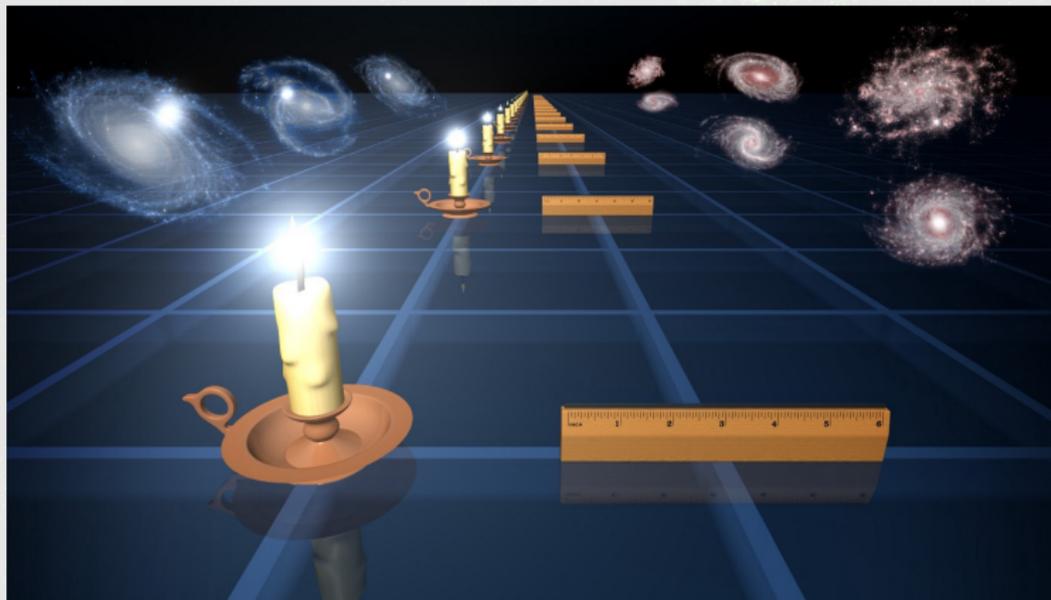
Photos: Copyright © The Nobel Foundation



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE



# 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

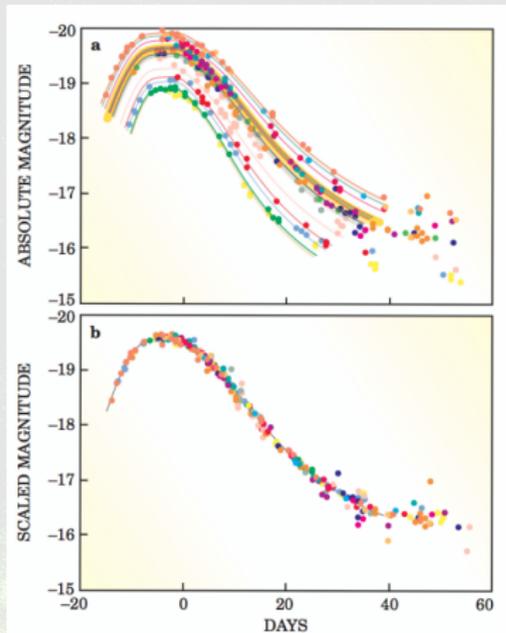
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



# SUPERNOVE DI TIPO IA COME CANDELE STANDARD



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

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

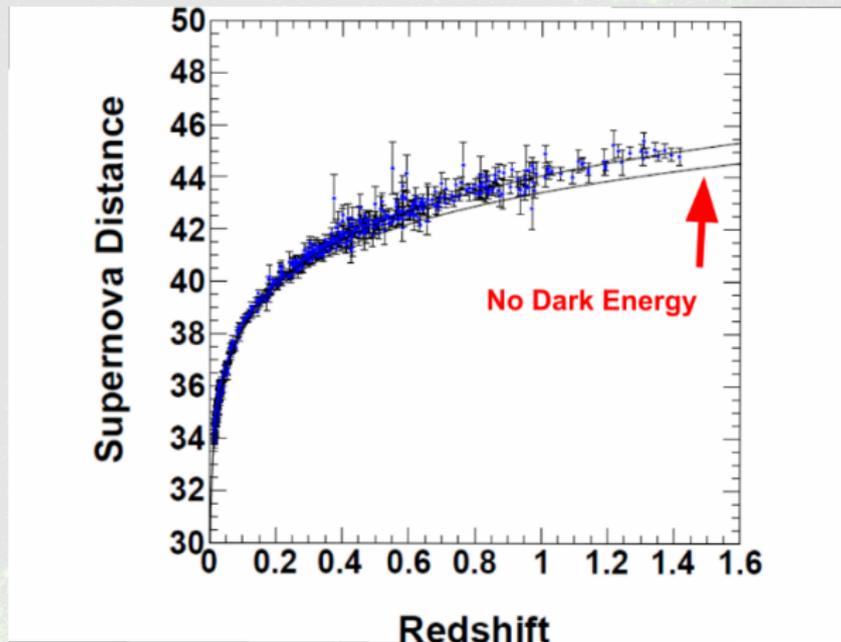
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



# 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  $a = 1/(1+z)$

# ENERGIA OSCURA

Dall'Equazione di Friedmann:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3H_0 c^2} \sum_i \rho_i = \frac{8\pi G}{3H_0 c^2} \left[ \Omega_m a^{-3} + \Omega_e a^{-4} + \Omega_\Lambda a^{-3(1+w)} \right]$$

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.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{1}{6}f - \frac{\ddot{a}}{a}f_R + \frac{\dot{a}}{a}\dot{f}_R = \frac{8\pi G}{3H_0 c^2} \sum_i \rho_i$$

## Quintessenza

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

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3H_0 c^2} \sum_i \rho_i + \frac{1}{2c^2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)$$

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

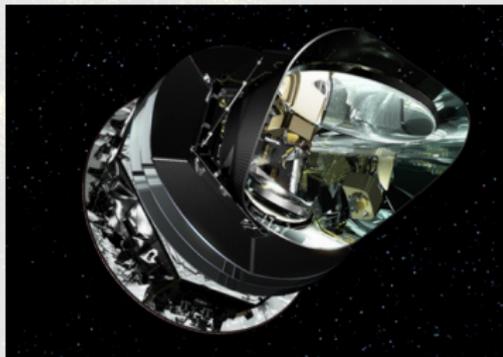


# STORIA DELLA CMB

Scoperta



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



COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

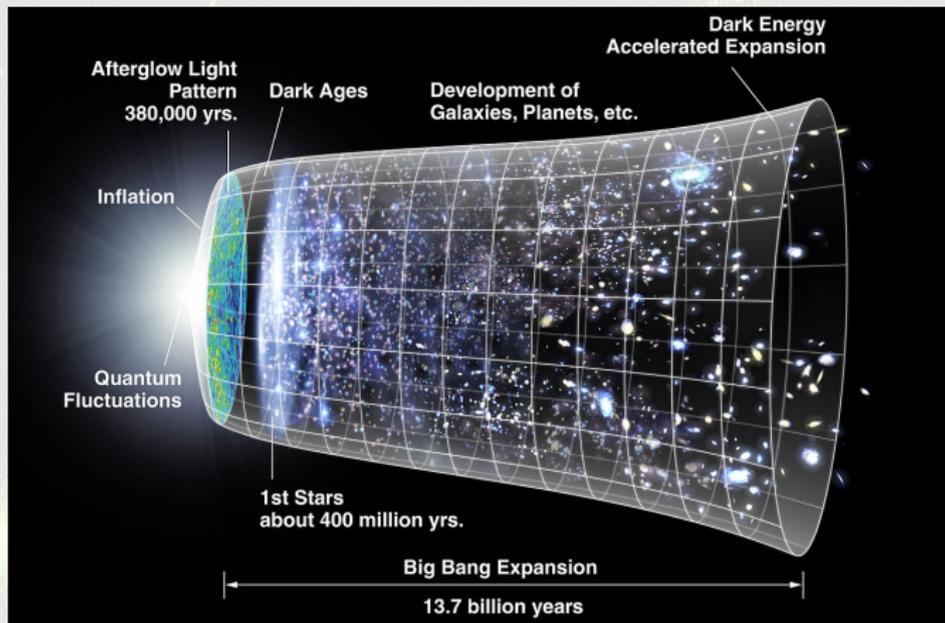
MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



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



COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

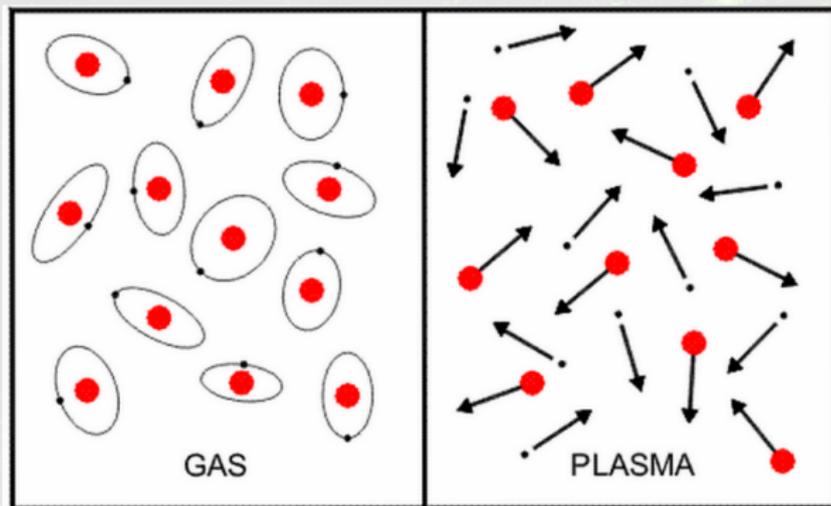
MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI



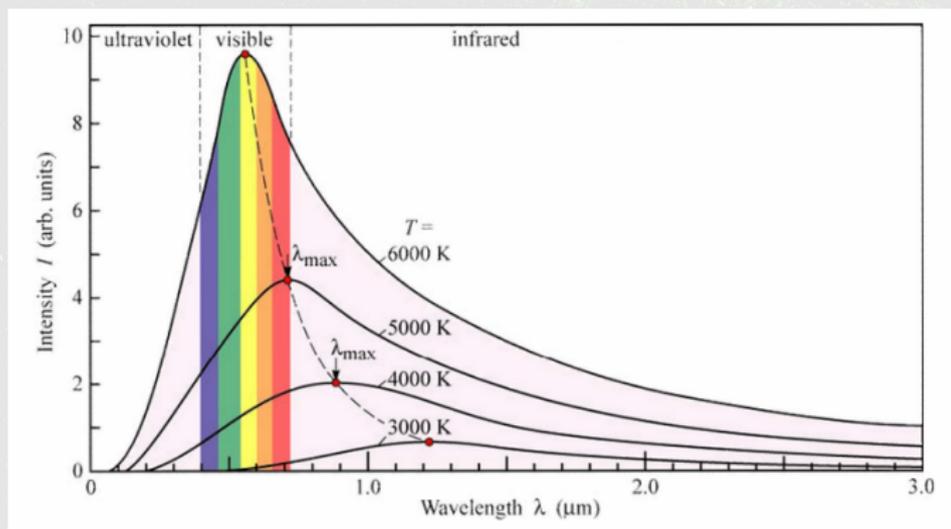
# L'UNIVERSO ERA UN PLASMA



**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. .

# RADIAZIONE DEL CORPO NERO



Il picco massimo e' descritto dalla legge di Wien:

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

Il profilo è governato dalla legge di Stefan-Boltzman:

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

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

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



# 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.

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

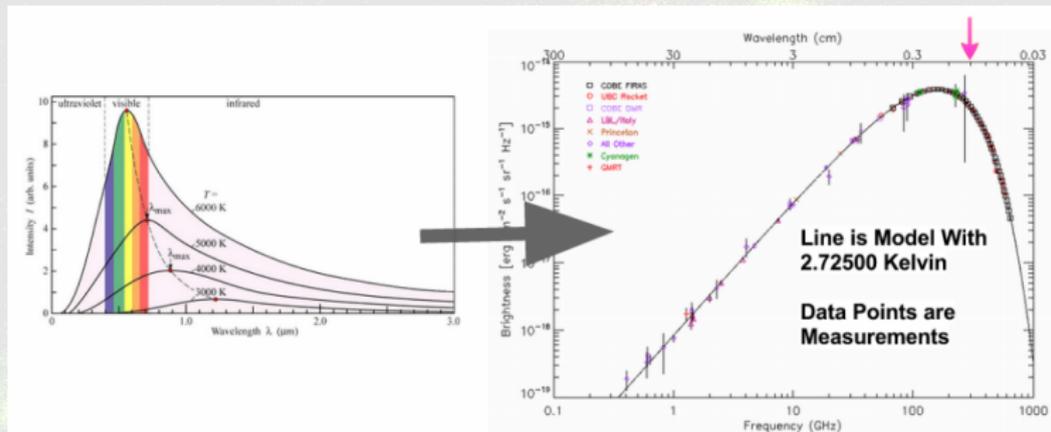
CONCLUSIONI



# 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.



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



# TEMPERATURA DELLA VOLTA CELESTE

COSMOLOGIA

EDA GERGO

INTRODUZIONE

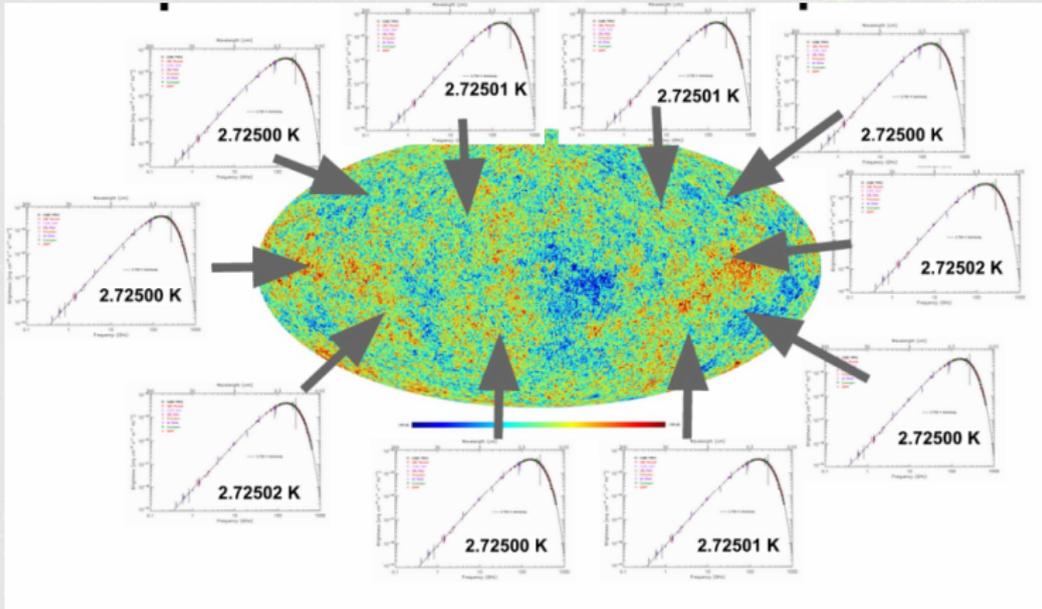
SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

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

CMB

CONCLUSIONI



**FIGURE:** 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

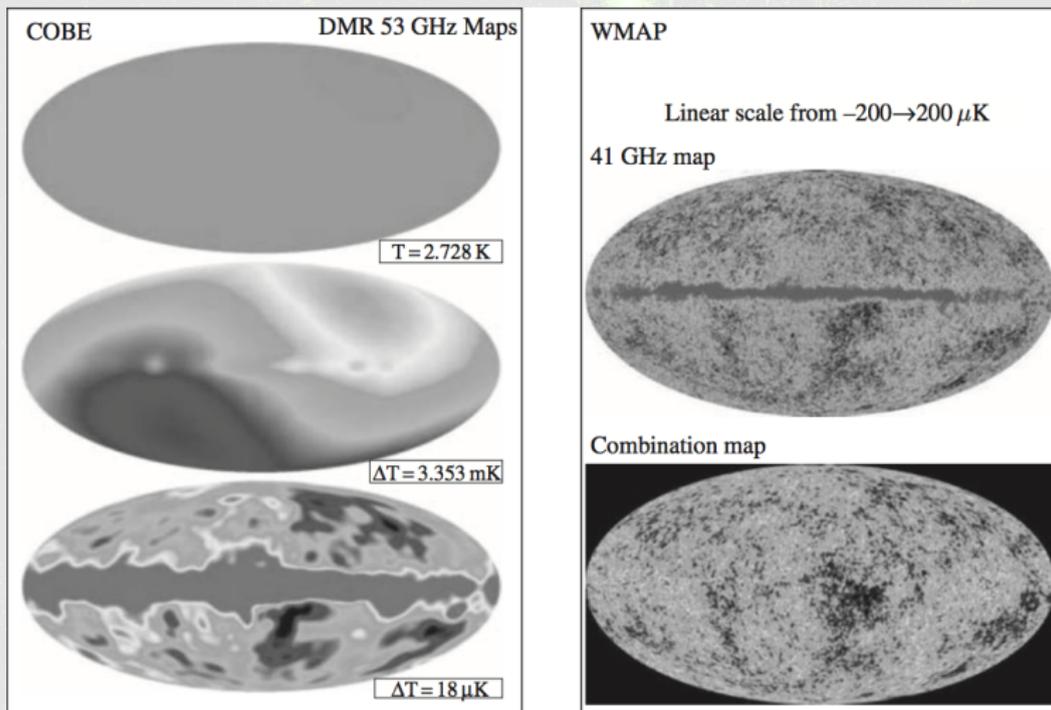
SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

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  $l$ .

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



# ANISOTROPIA DELLA CMB II

COSMOLOGIA

EDA GJERGO

INTRODUZIONE

SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

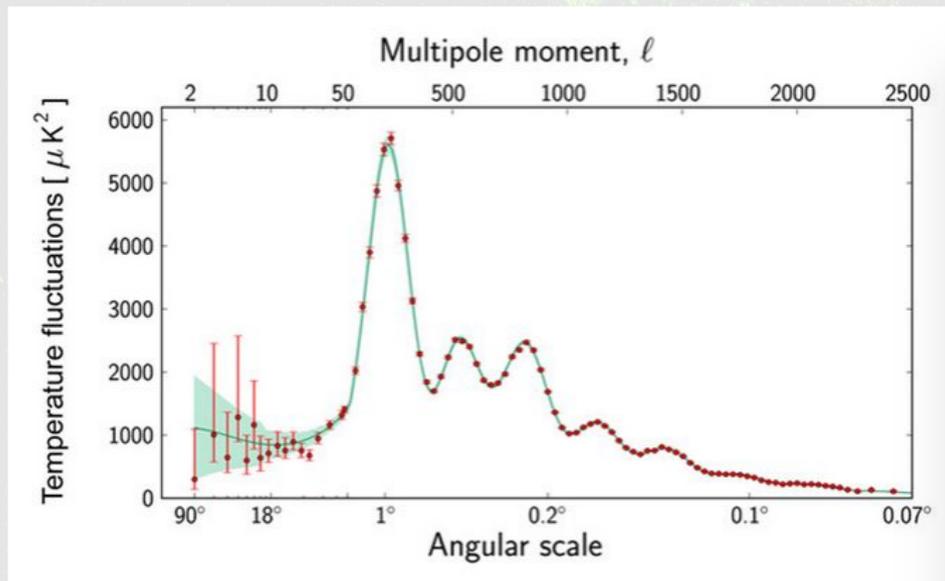
MATERIA OSCURA  
PANORAMICA  
RICERCHE DIRETTE  
DI MATERIA OSCURA  
ENERGIA OSCURA  
SCOPERTA  
ALTERNATIVE

CMB

CONCLUSIONI

UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE

ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA  
INAF  
NATIONAL INSTITUTE FOR ASTRONOMY



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

# COSA PREDICE LA TEORIA CON COMPONENTI DIVERSE? I

COSMOLOGIA

EDA GERGO

INTRODUZIONE

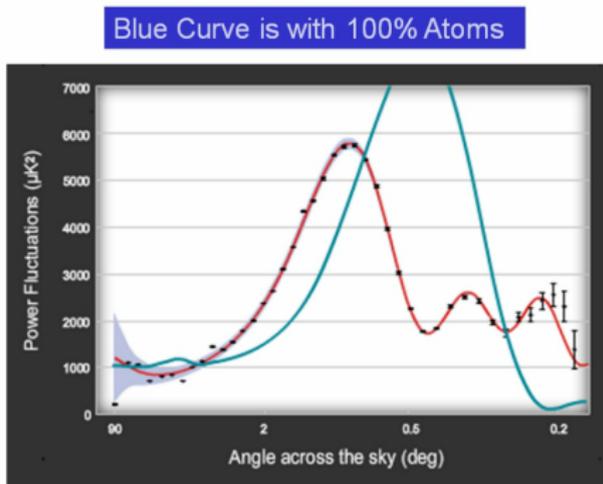
SCALE  
DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA  
COSMOLOGIA

COMPONENTI  
DELL'UNIVERSO

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

CMB

CONCLUSIONI



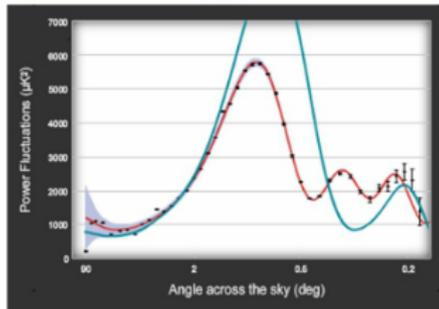
[http://map.gsfc.nasa.gov/resources/camb\\_tool/index.html](http://map.gsfc.nasa.gov/resources/camb_tool/index.html)

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

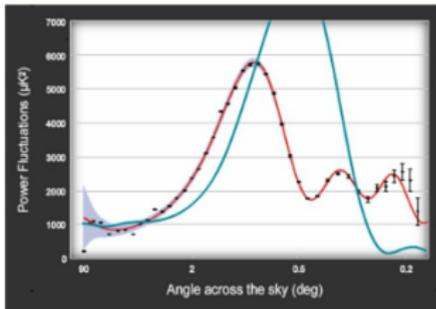


# COSA PREDICE LA TEORIA CON COMPONENTI DIVERSE? II

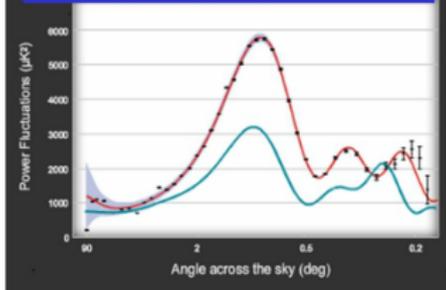
74% Dark Matter, 22% Atoms, 4% Dark Energy



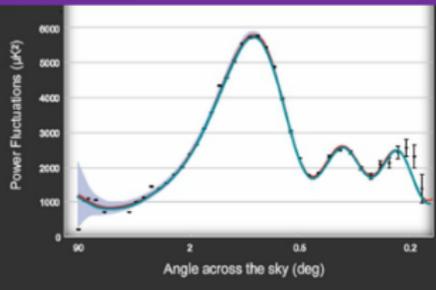
74% Atoms, 22% Dark Energy, 4% Dark Matter



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



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



COSMOLOGIA

EDA GERGO

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



# CONCORDANZA COSMOLOGICA

INTRODUZIONE

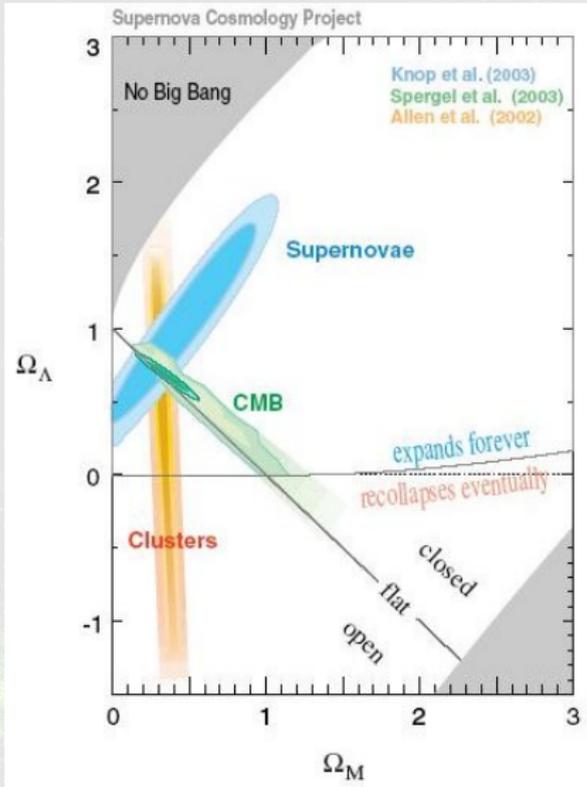
SCALE DELL'UNIVERSO  
RELATIVITÀ  
SCOPI DELLA COSMOLOGIA

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

- ▶ 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.

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.



# LINEA DEL TEMPO COSMOLOGICA

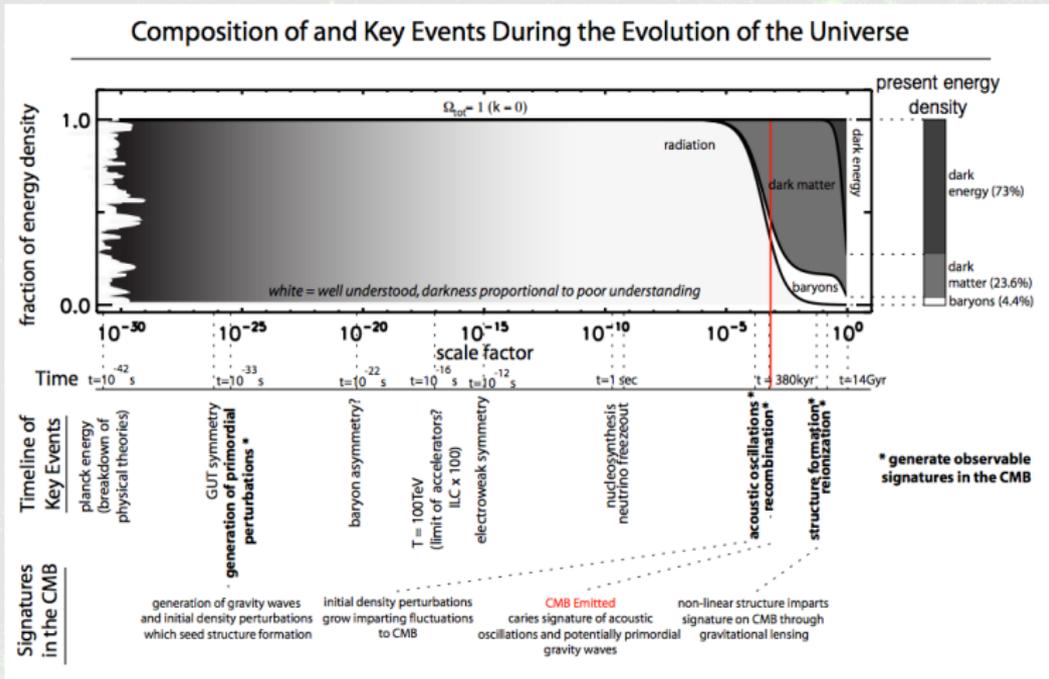


FIGURE: Credit: Jeff McMahon, University of Michigan.



# 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.  |

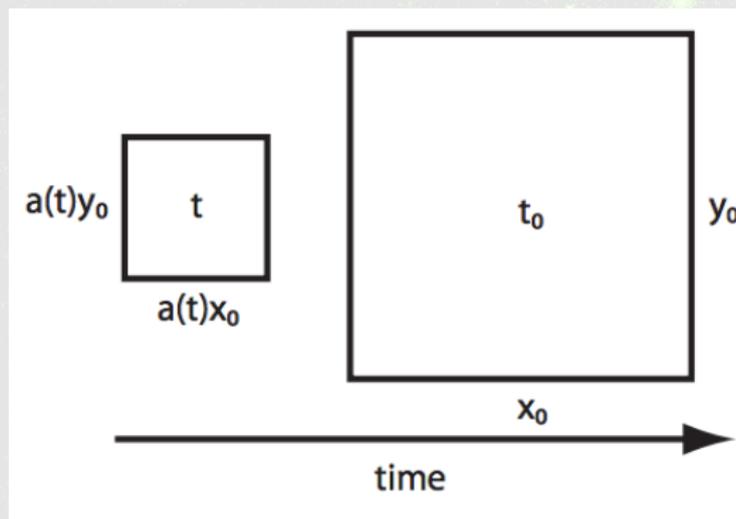
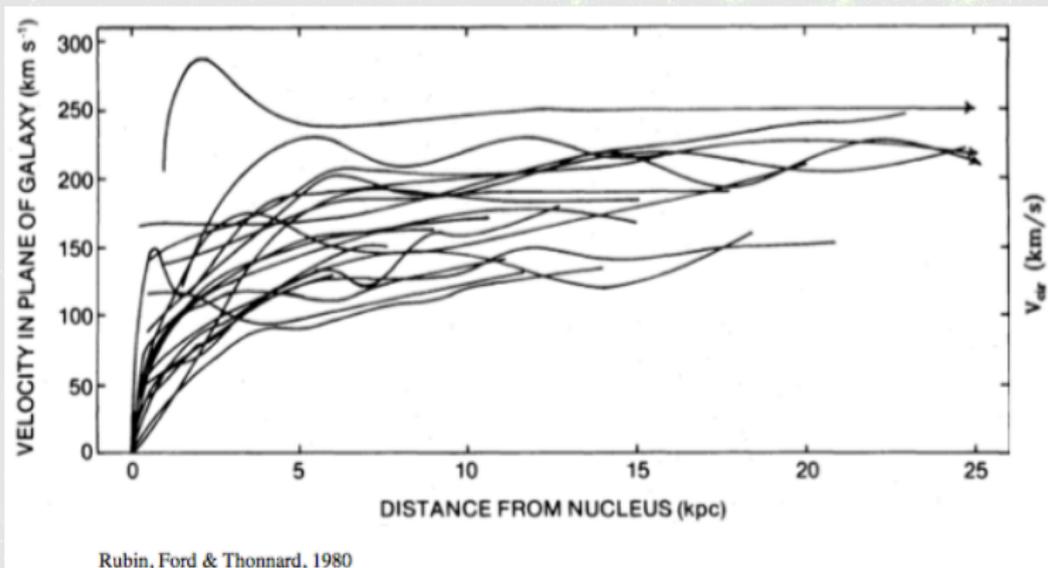


FIGURE: Significato del fattore scala.



Rubin, Ford & Thonnard, 1980

FIGURE: Several galaxy rotation curves. Flat profile.