



# Introduzione al problema della Materia Oscura

Mariano Cadoni

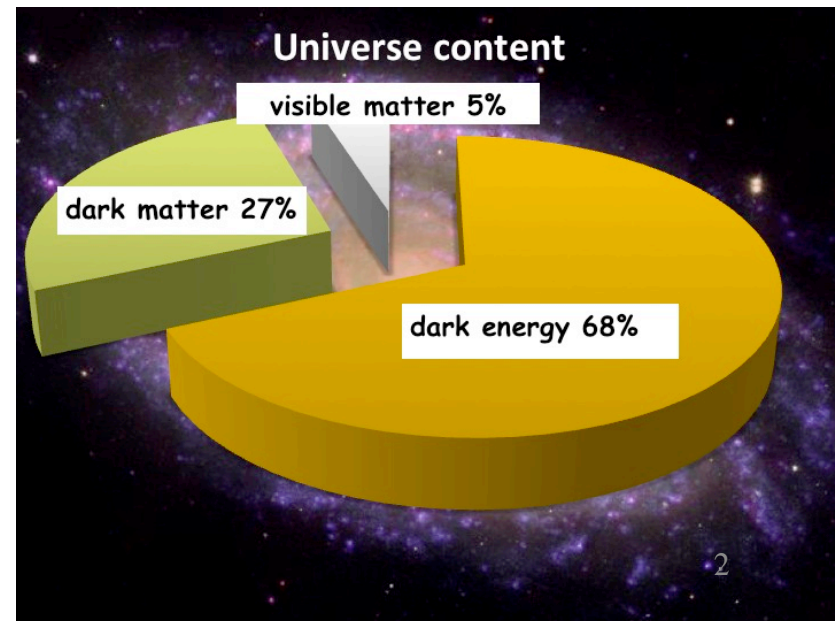
Dipartimento di Fisica  
Università di Cagliari

MINI-WORKSHOP “LA MATERIA OSCURA” DARK MATTER DAY  
27-OTTOBRE 2017, CAGLIARI

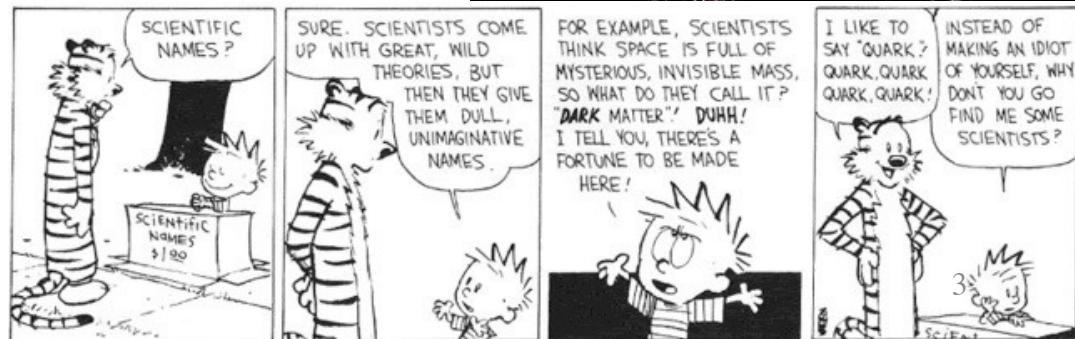
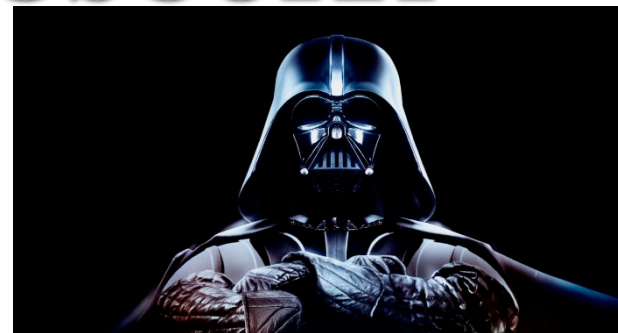
- ◆ Il problema della **MASSA MANCANTE** nell'universo è uno dei problemi irrisolti più importanti della fisica
- ◆ Secondo le nostre odierne teorie ed osservazioni fisiche solo il 5%

della materia dello  
universo è visibile

**Di cosa è fatto il  
Restante 95% ?**



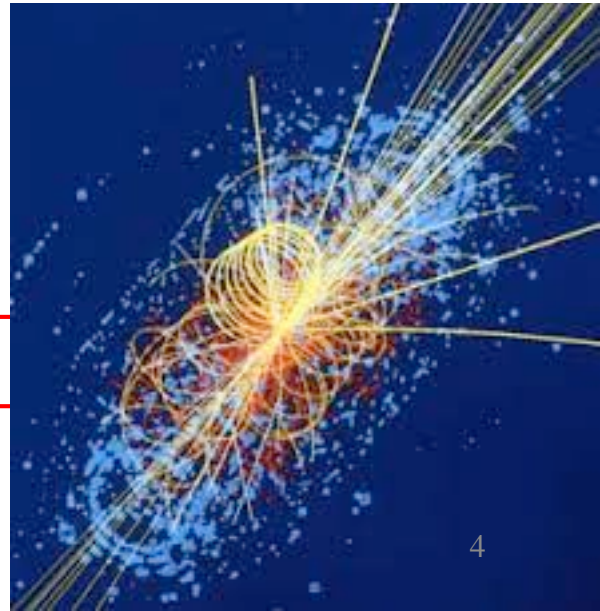
Per risolvere il problema i fisici hanno ipotizzato la presenza di forme esotiche di materia. Per sottolineare la natura misteriosa contrapposta a quella visibile i fisici le hanno chiamate **MATERIA OSCURA** ed **ENERGIA OSCURA**



- Problema fortemente intricato perchè coinvolge simultaneamente l'infinitamente piccolo (Modello Standard delle Particelle elementari [ $10^{-15}$  m], primi istanti dopo il Big Bang) e l'infinitamente grande (Galassie [ $10^5$  AL], clusters, modello

$\Lambda$ CDM in  
cosmologia

[14 Miliardi AL]



# Sommario

- Interazioni fondamentali, **modello standard delle particelle elementari**, **cosmologia**
- Quali sono le evidenze dell'esistenza della materia oscura?
  - ◆ Curve rotazionali, Dispersione velocità
  - ◆ Lensing
  - ◆ Formazione strutture
  - ◆ **Di cosa è fatta la materia oscura?**
- Esistono spiegazioni alternative?

# Interazioni fondamentali

- In natura esistono 4 Interazioni fondamentali: **elettromagnetica, Debole, forte, gravitazione**

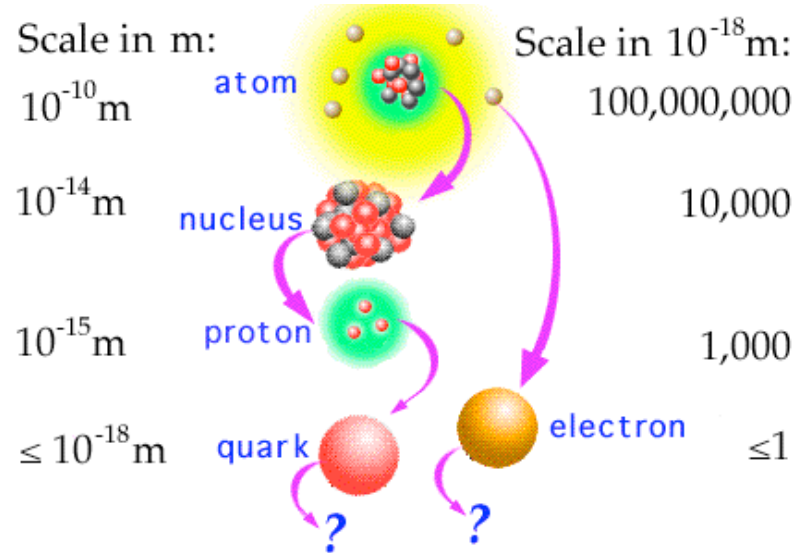
**Fundamental Force Particles**

Force	Particles Experiencing	Force Carrier Particle	Range	Relative Strength*
<b>Gravity</b> acts between objects with mass	all particles with mass	graviton (not yet observed)	infinity	much weaker ↓ much stronger
<b>Weak Force</b> governs particle decay	quarks and leptons	$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$ (W and Z)	short range	
<b>Electromagnetism</b> acts between electrically charged particles	electrically charged	$\gamma$ (photon)	infinity	
<b>Strong Force**</b> binds quarks together	quarks and gluons	$g$ (gluon)	short range	

# MODELLO STANDARD

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)				
	I	II	III	
mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.44 \text{ GeV}/c^2$	0
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson
				<b>H</b> Higgs



Il micromondo è dominato dalle **interazioni debole, forte ed EM**. IL MS descrive il modo in cui le **particelle elementari** formano tutta la materia **visibile (barionica)** esistente. Quindi tutte le strutture (anche quelle astrofisiche) su piccole scale.

# GRAVITAZIONE

E' LA QUARTA INTERAZIONI FONDAMENTALE





■ La gravitazione ha **tre** caratteristiche peculiari

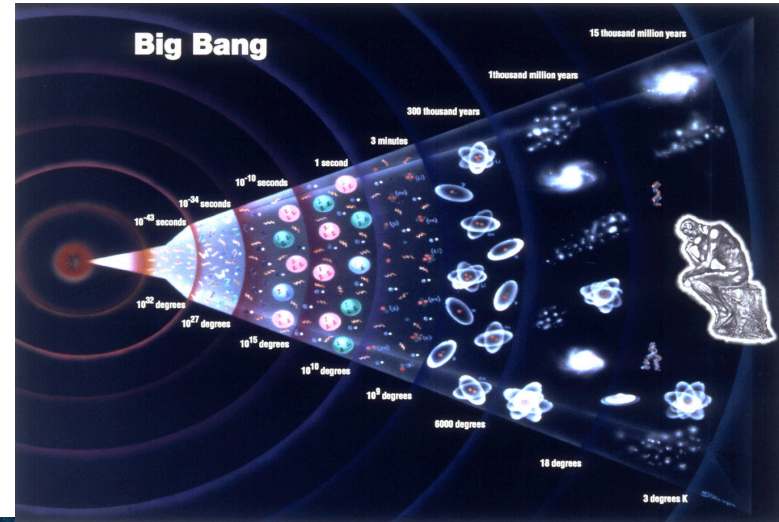
Universalità: agisce **nello stesso modo** su tutti i corpi ( massa inerziale=massa gravitazionale)

Sempre attrattiva: Non esistono cariche (masse) di segno opposto

Debolissima :La forza agente tra due masse di 1 kg a distanza di 1 m è solo di circa  $10^{-10}$  Newton

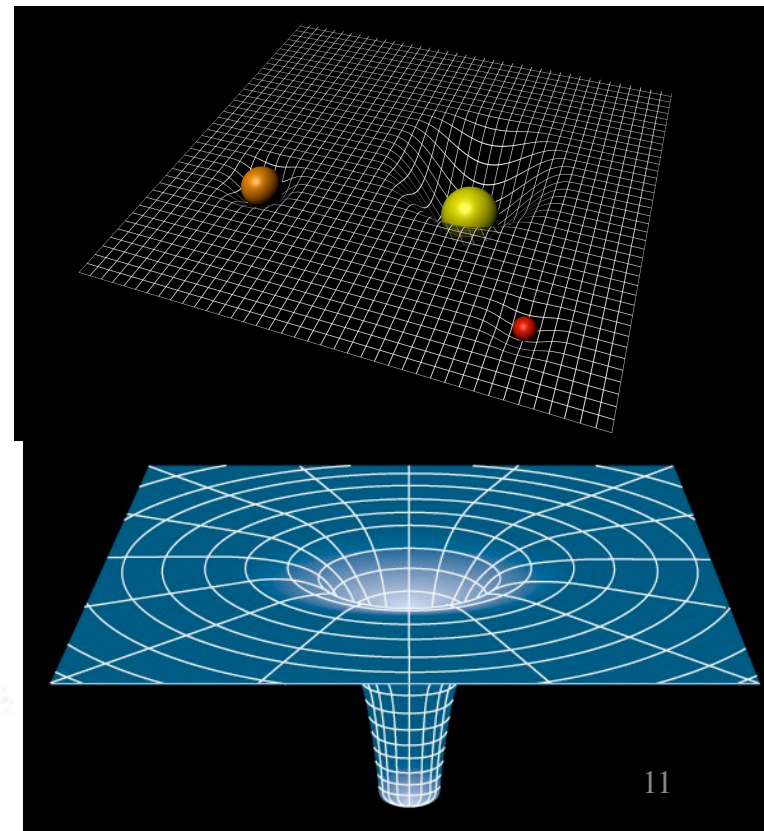
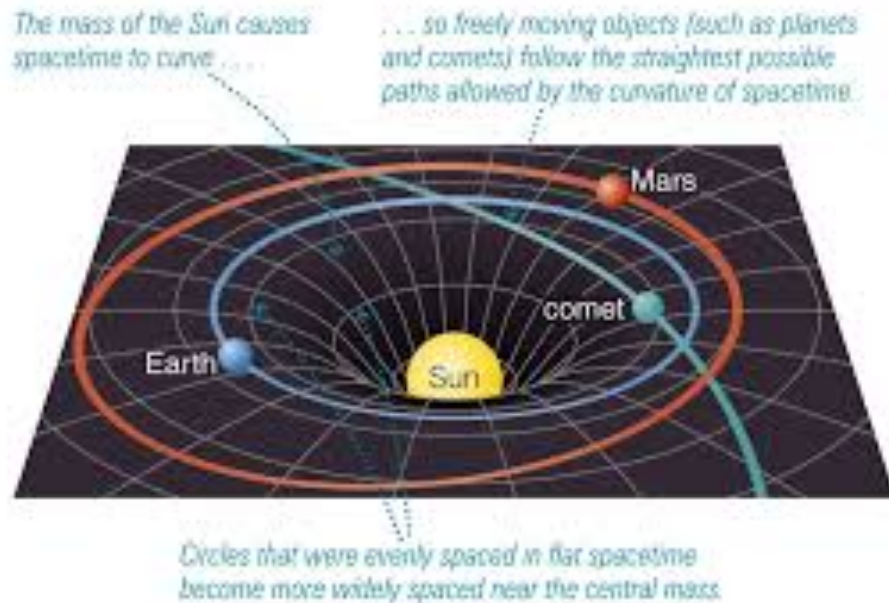
# CONSEGUENZE

- ◆ Determina la struttura e l'evoluzione su larga scala dell'universo



■ LA SUA AZIONE PUÒ ESSERE DESCRITTA IN TERMINI PURAMENTE GEOMETRICI COME MODIFICA DEL “TESSUTO” DELLO SPAZIO-TEMPO: **RELATIVITÀ GENERALE DI**

**EINSTEIN**



# COSMOLOGIA

■ LA TEORIA DI EINSTEIN DECRIVE STRUTTURA ED EVOLUZIONE DELL'UNIVERSO, PARTENDO DAL BIG BANG

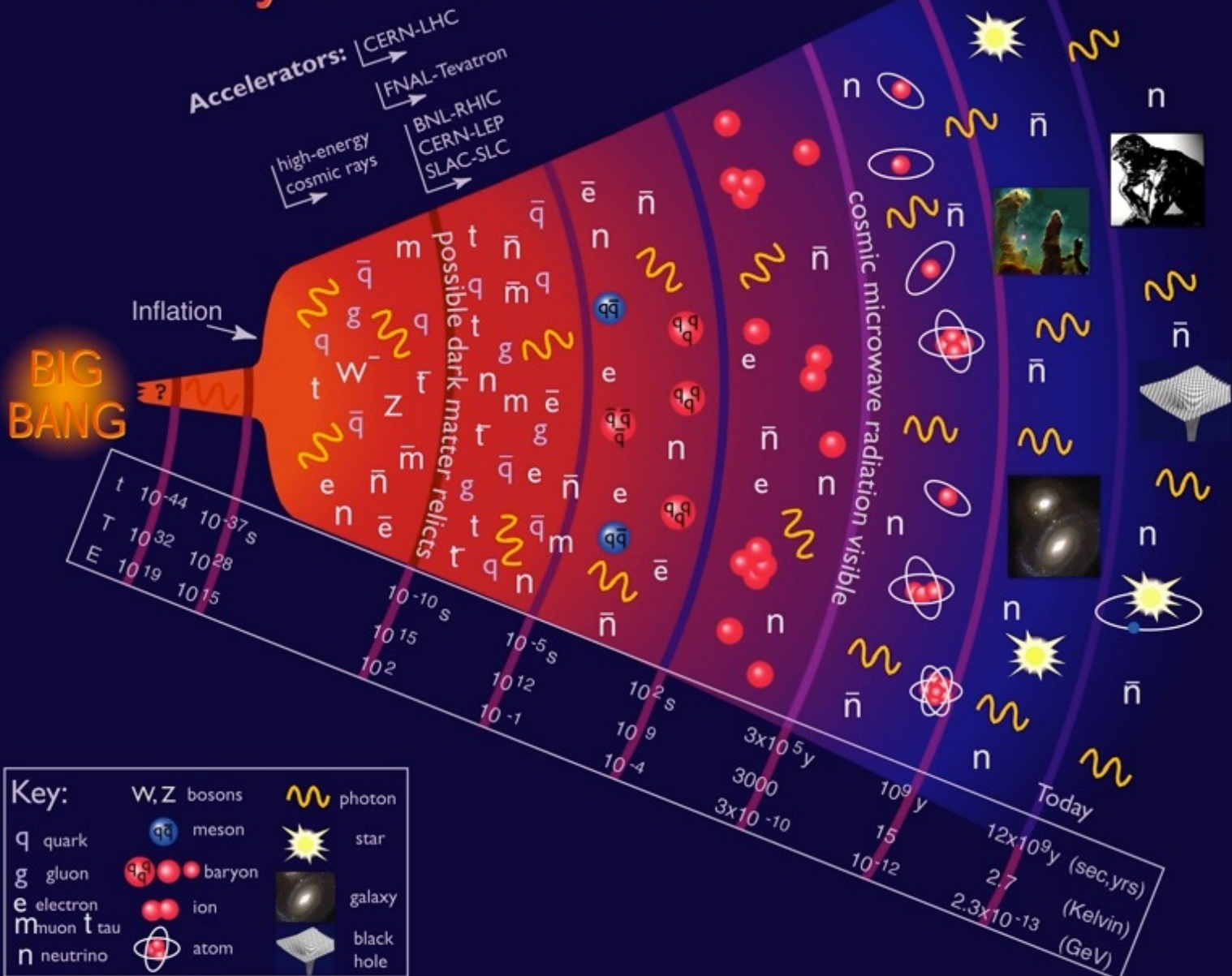


- NELLA COSMOLOGIA **MICRO E MACRO SI INCONTRANO!**
- LE 4 INTERAZIONI FONDAMENTALI DELLA NATURA DEVONO PARLARSI
- ESISTE ANCHE UN **MODELLO STANDARD DELLA COSMOLOGIA ( $\Lambda$ CDM)** CHE DESCRIVE TUTTA LA STORIA DELL'UNIVERSO

- A PARTENDO DA 14 MILIARDI DI ANNI FA ABBIAMO UN UN UNIVERSO IN ESPANSIONE, SPAZIALMENTE PIATTO, SU LARGA SCALA OMOGENEO ED ISOTROPO, IN CUI SI FORMANO POI DISOMOGENEITA' E TUTTE LE STRUTTURE ASTROFISICHE SU LARGA E SU PICCOLA SCALA

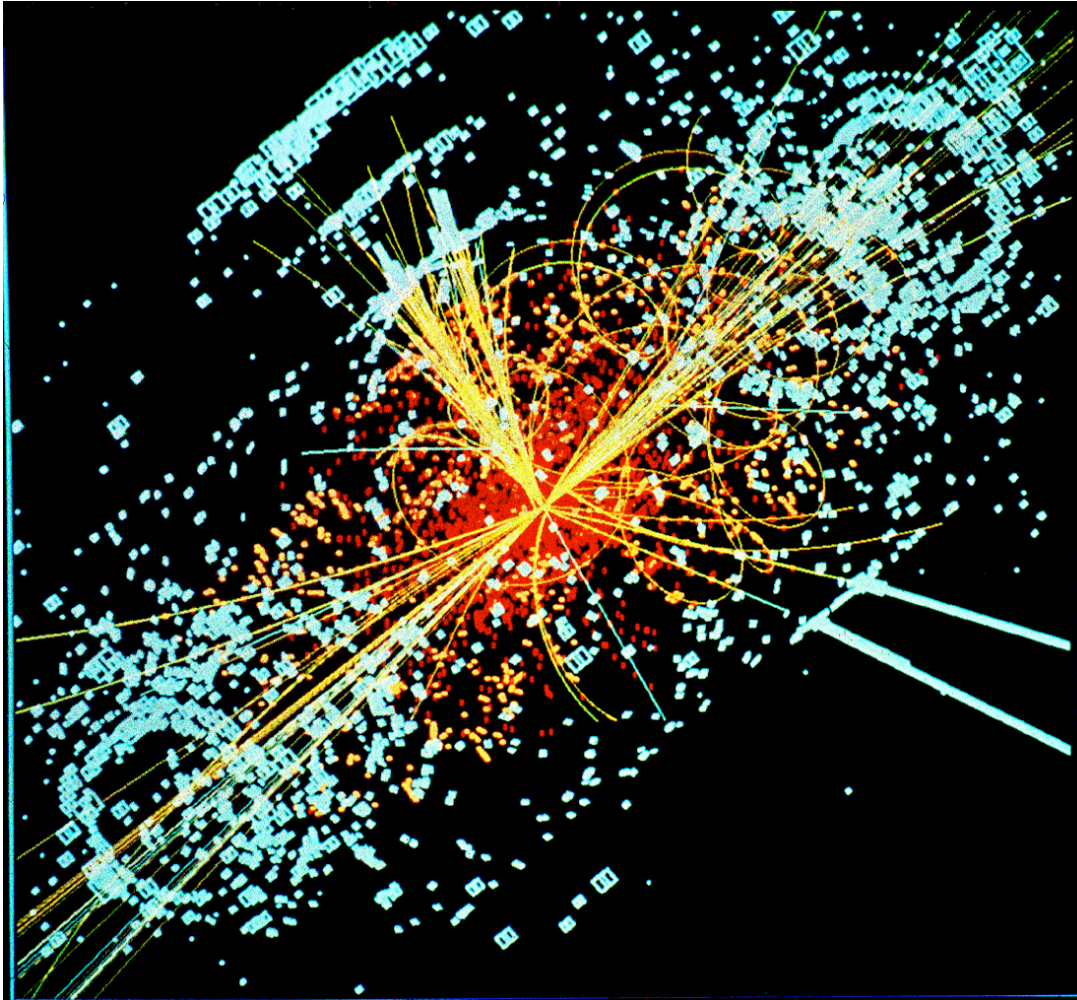


# History of the Universe



Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

■ IL MODELLO STANDARD DELLE PARTICELLE ELEMENTARI E' STATO VERIFICATO DAGLI ESPERIMENTI NEGLI ACCELERATORI (LHC ETC.)





■ IL **MODELLO COSMOLOGICO  $\Lambda$ CDM** E' STATO VERIFICATO DALLE OSSERVAZIONI DEI SATELLITI E TELESCOPI (PLANCK, HUBBLE SPACE TELESCOPE, ETC.)

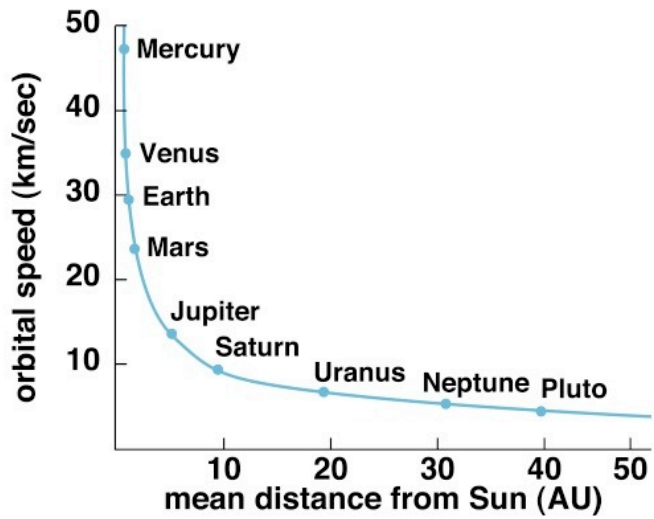
## ■ **PROBLEMA**

LO SCHEMA, SIA IN COSMOLOGIA CHE A SCALE INTERMEDIE (GALATTICHE) NON FUNZIONA SE TUTTA LA MATERIA VIENE COSTRUITA DAL **MS** DELLE PARTICELLE (**MATERIA VISIBILE O BARIONICA**)  
**ESISTENZA MATERIA OSCURA?**

# CURVE ROTAZIONALI E DISPERSIONE VELOCITÀ SU SCALE GALATTICHE

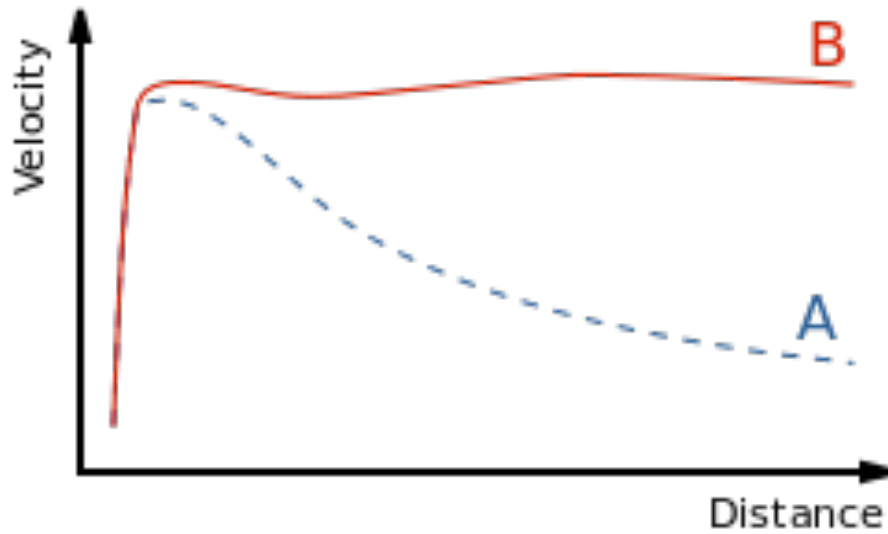


■ SE VOGLIAMO SAPERE QUANTA MASSA C'E' IN UNA GALASSIA POSSIAMO PROCEDERE NELLO STESSO MODO CON CUI POSSIAMO "PESARE" IL SOLE?

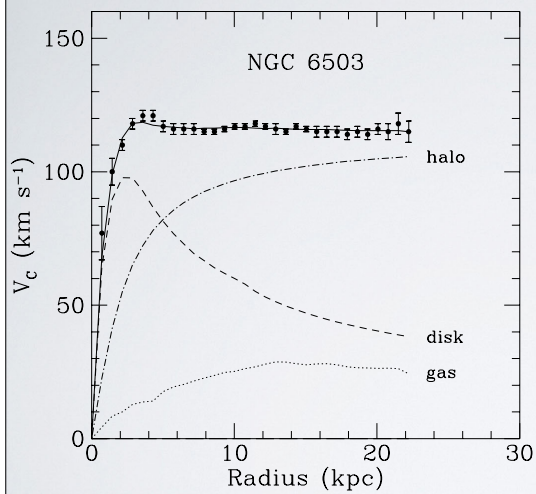


$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GmM}{r^2}$$

- FUNZIONA ANCHE PER IL MOTO DEI BRACCI DELLE GALASSIE INTORNO AL CENTRO (CURVE ROTAZIONALI) E OPPORTUNAMENTE GENERALIZZATO (TEOREMA DEL VIRIALE) ANCHE PER GLI AMMASSI DI GALASSIE (DISPERSIONE DELLA VELOCITA')
- MA É IN CONTRASTO CON LE OSSERVAZIONI DELLA QUANTITA' DI MATERIA LUMINOSA [RUBIN, FORD (1960-70), Zwicky (1933), TULLY –FISHER]

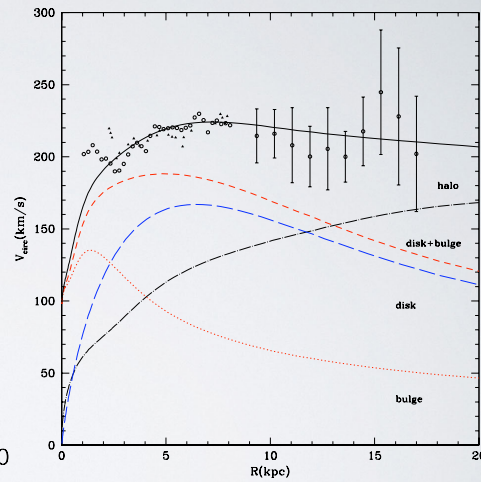


spiral galaxy example:



from Begemann, Broeils & Sanders, MNRAS 249, 523 (1991)

Milky Way:



from Klypin, Zhao & Somerville, ApJ 573, 597 (2002)

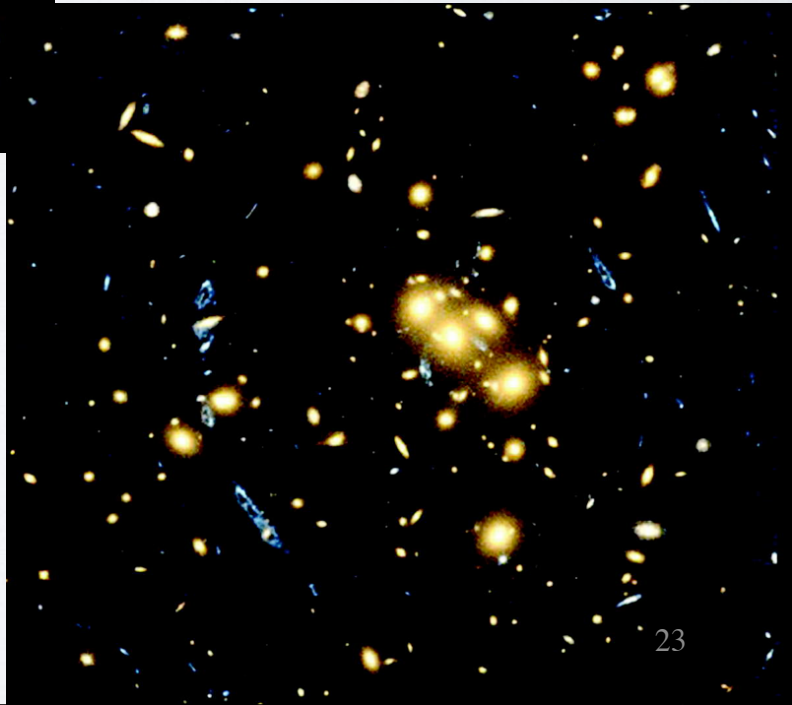
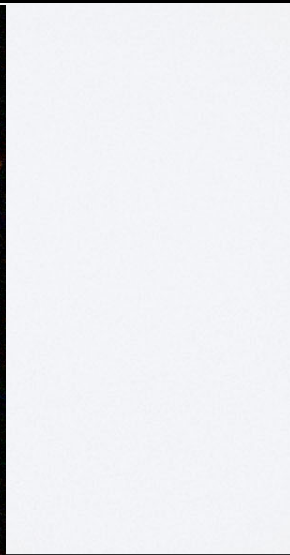
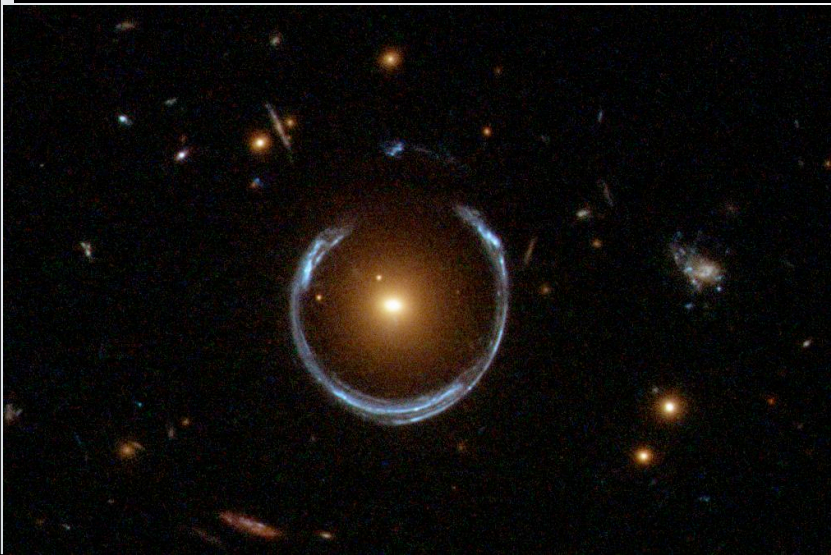
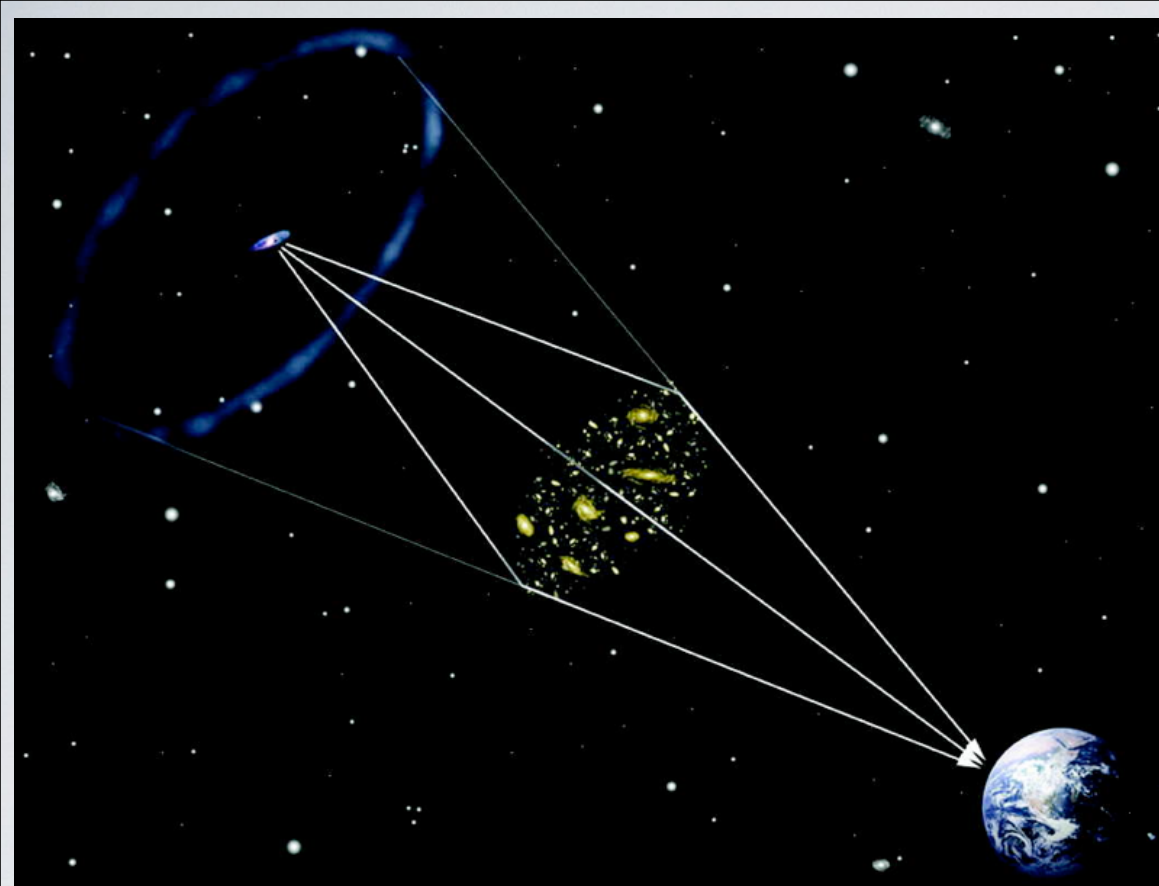
- ◆ PER FAR TORNARE I CONTI SERVE ALMENO 5-6 VOLTE LA QUANTITA' DI MATERIA CHE SI VEDE! **MATERIA OSCURA?**
- ◆ DA NOTARE CHE L'APPIATTIMENTO DELLA CURVA PUO' ESSERE SPIEGATO DA (**MOND**)

$$M(r) = kr$$

LA MANCANZA DI MASSA E' CONFERMATA ANCHE DAL **LENSING GRAVITAZIONALE**

# Gravitational lensing

Hubble view of CL0024+1654



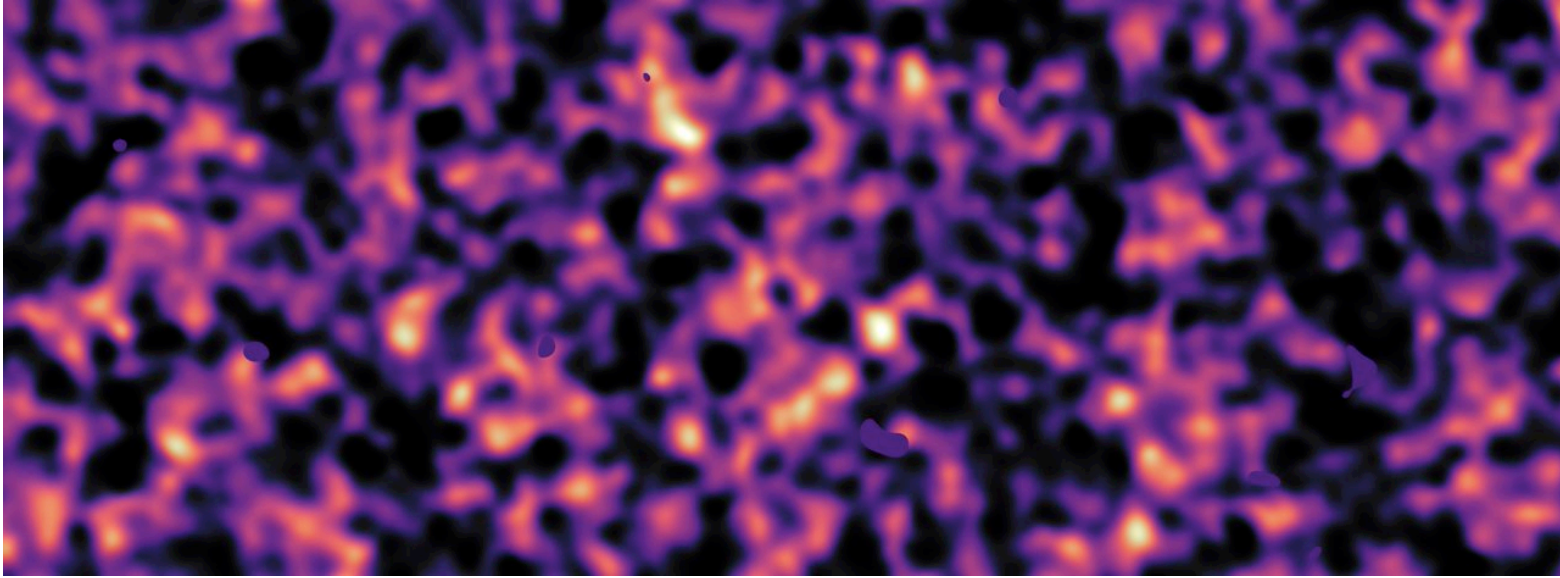


Immagine di tre milioni di galassie distanti 6 miliardi di anni luce ricostruita usando il fatto che la materia oscura (regioni viola) curva la luce [osservatorio Paranal Cile]



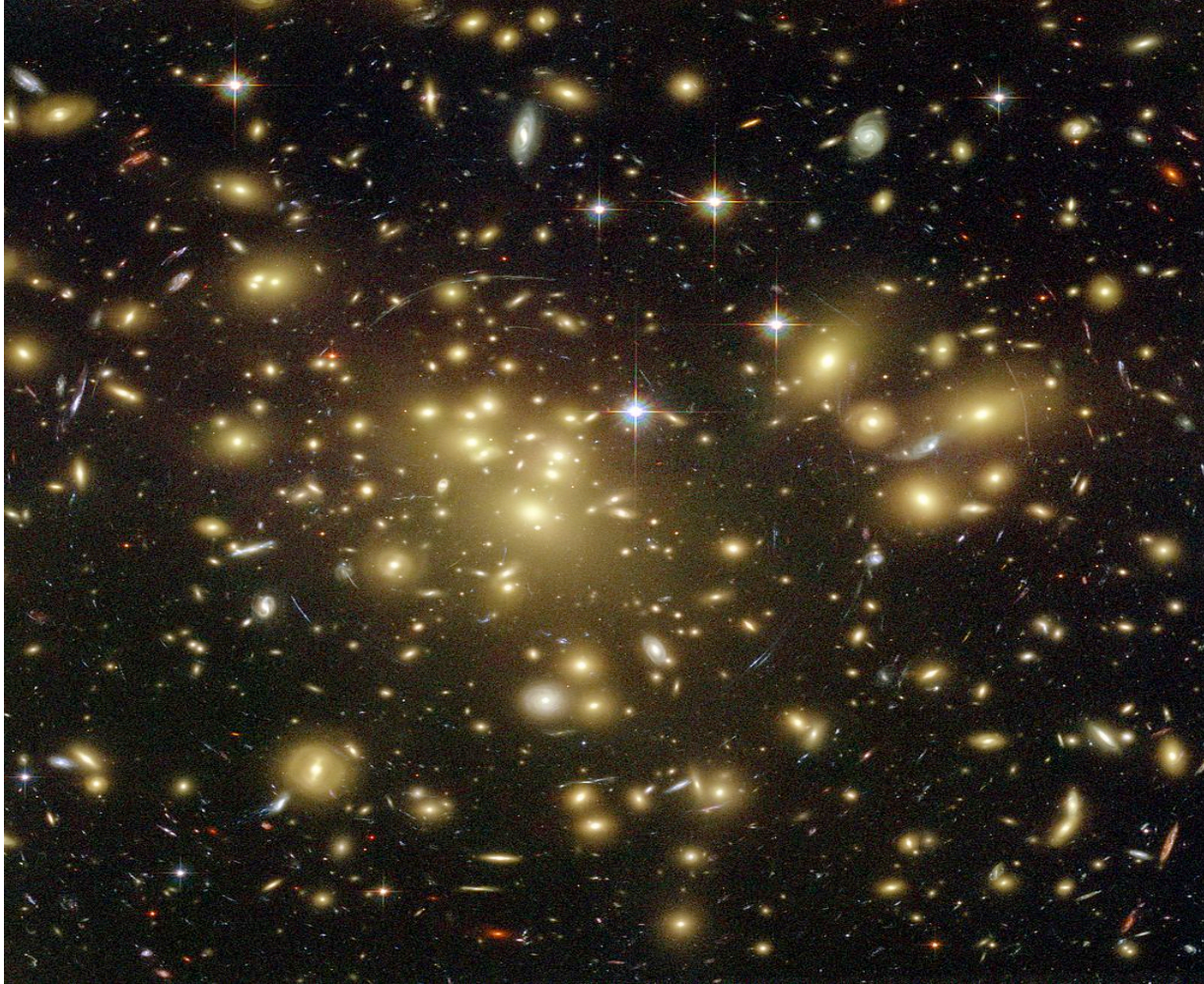
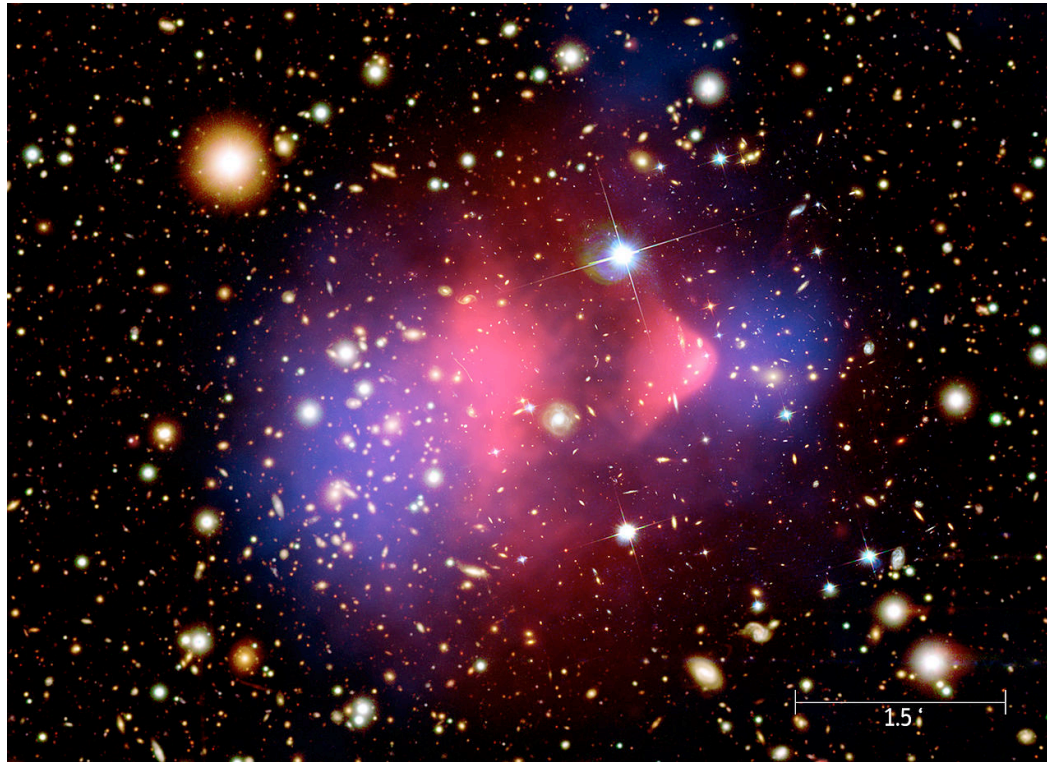


Immagine del **Galaxy cluster Abell 1689** fatta dal Hubble space Telescope. La gravità di 3 miliardi di stelle + **Materia oscura** agisce come una lente larga 2 milioni di anni luce. Gli oggetti piu' lontani distano 13 Miliardi di AL ( $z=6$ ).

# BULLET CLUSTER



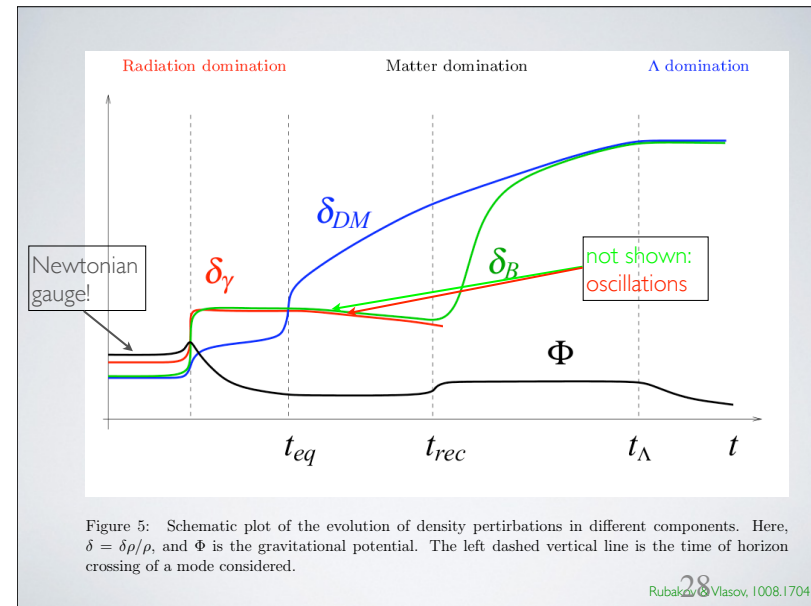
DUE CLUSTER CHE COLLIDONO 1E 0657-56. L'ALONE DI MATERIA OSCURA (BLU), RICOSTRUITO TRAMITE IL LENSING DEGLI OGGETTI SULLO SFONDO, E' DE TUTTO DISLOCATO RISPETTO ALLA MATERIA VISIBILE, BARIONICA (ROSA).

# FORMAZIONE STRUTTURE

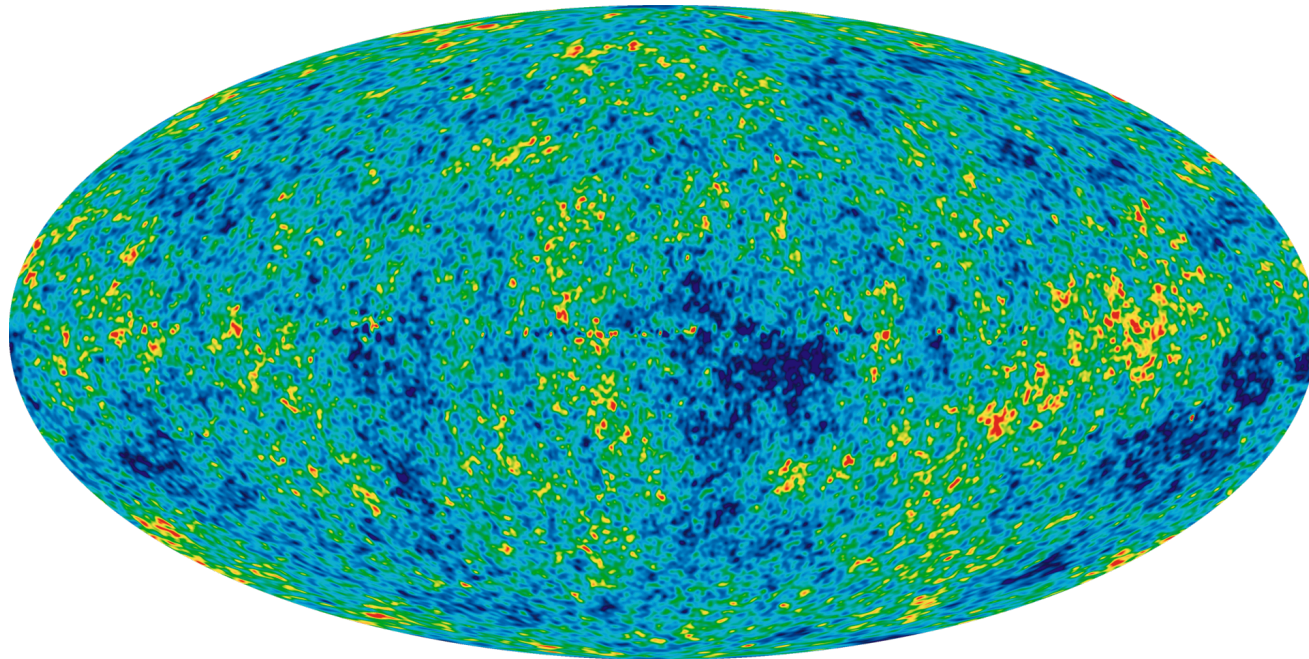
- LA FORMAZIONE DI STRUTTURE NELL'UNIVERSO PRIMORDIALE AVVIENE DOPO IL BIG BANG A PARTIRE DA PICCOLE PERTURBAZIONI DI DENSITÀ NELL'UNIVERSO OMOGENEO CHE CRESCONO FINO A FORMARE STELLE, GALASSIE, CLUSTERS

SE IL PLASMA PRIMORDIALE FOSSE STATO SOLO  
COMPOSTO DA MATERIA VISIBILE L'INTERAZIONE  
CON LA RADIAZIONE AVREBBE CANCELLATO  
QUESTE PERTURBAZIONI

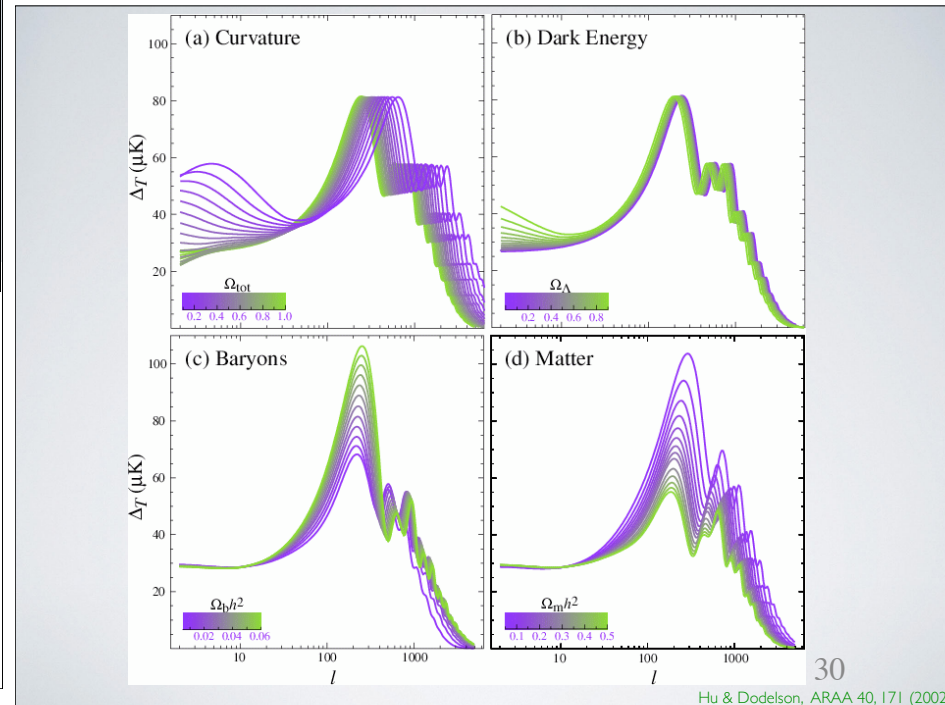
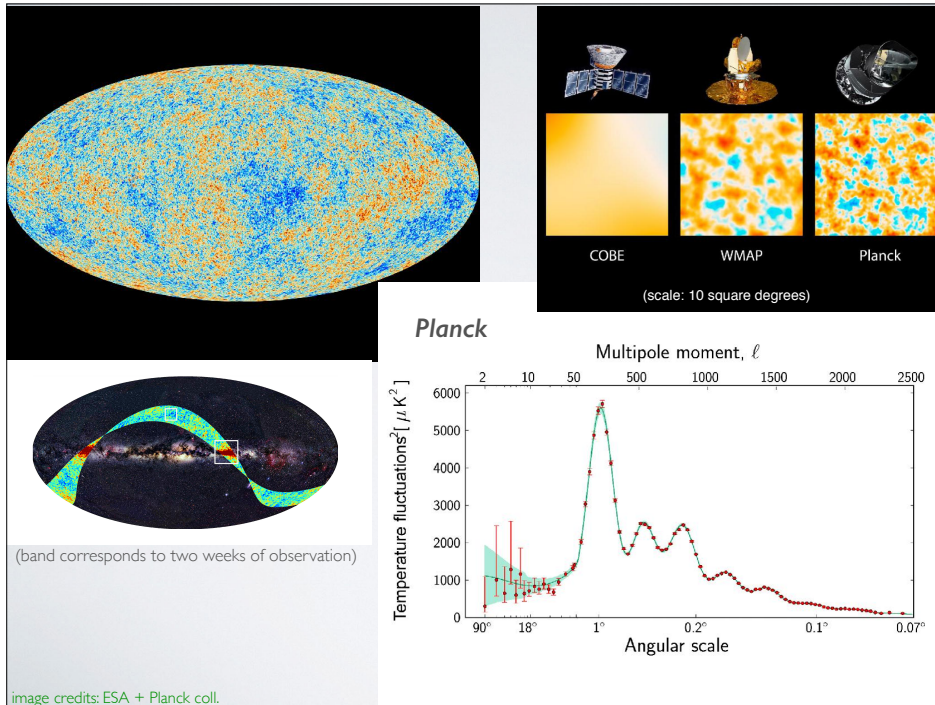
LA PRESENZA DI MATERIA OSCURA, CHE NON  
INTERAGISCE CON LA RADIAZIONE AGISCE  
COME UNA BUCA DI POTENZIALE RENDENDO  
POSSIBILE LA FORMAZIONE DELLE STRUTTURE

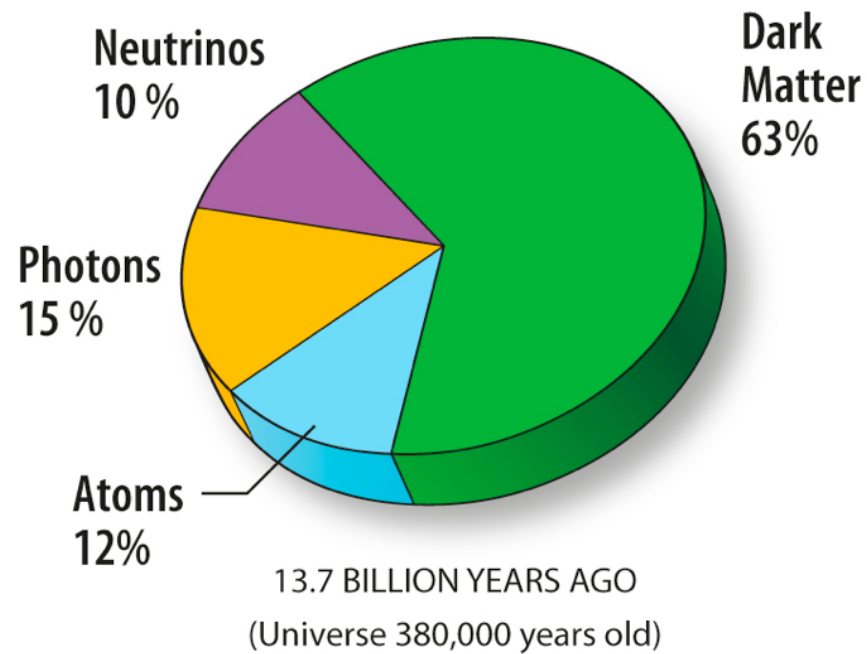
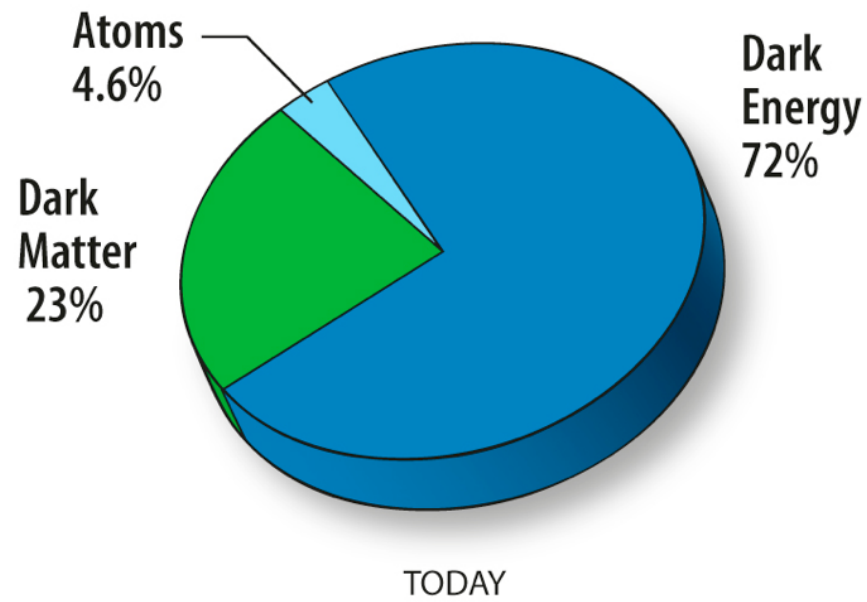


- L'INFORMAZIONE SULLE PERTURBAZIONI PRIMORDIALI È CONTENUTA NELLE ANISOTROPIE DELLA **RADIAZIONE COSMICA DI FONDO** (la radiazione fossile che osserviamo oggi, originata 380.000 dopo il BB quando materia e radiazione si sono separati)



- MATEMATICAMENTE QUESTO PUO' ESSERE DESCRITTO USANDO LO "SPETTRO" DELLA CMB
- IL PRIMO PICCO DA INFORMAZIONI SULLA **MATERIA VISIBILE**, QUELLI SUCCESSIVI SULLA **MATERIA OSCURA**

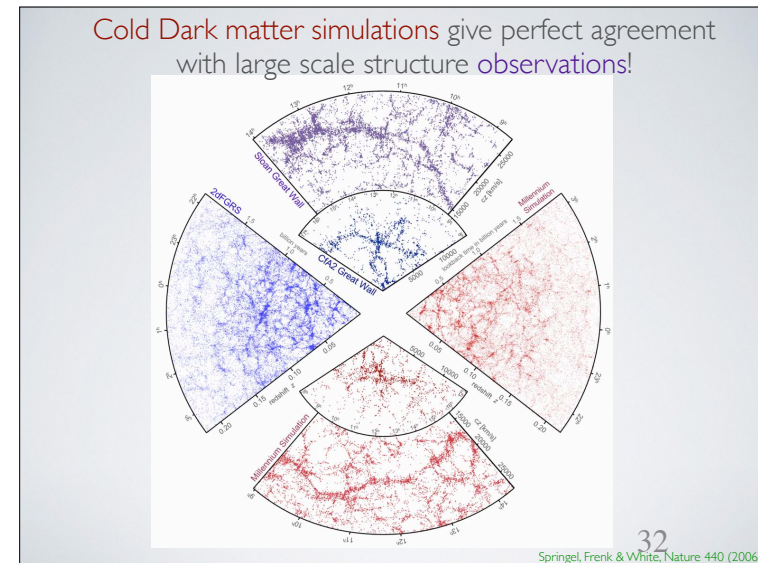




# MATERIA OSCURA CALDA O FREDDA?

- ◆ PER LA FORMAZIONE DELLE STRUTTURE È MOLTO IMPORTANTE SE LA MATERIA OSCURA PRIMORDIALE FOSSE **CALDA O FREDDA** ( PIÙ PRECISAMENTE BISOGNEREBBE PARLARE DI CAMMINO LIBERO MEDIO)
- ◆ LE OSSERVAZIONI PREFERISCONO DI GRAN LUNGA MATERIA OSCURA FREDDA (**CDM=COLD DARK MATTER**)

(Vedi Seminario Paolo Serra)





## DI COSA E' FATTA LA MATERIA OSCURA?

- CI SONO FORTI INDICAZIONI PROVVENIENTI DA TUTTE LE SCALE NEL NOSTRO UNIVERSO SULL'ESISTENZA DI UNA FORMA NON VISIBILE DI MATERIA MEDIAMENTE 5 VOLTE LA MATERIA VISIBILE (E' MOLTO MENO NELLA NOSTRA GALASSIA E DIVENTA 1000 PER LE DWARF )
- MA SAPPIAMO MOLTO POCO SULLA SUA NATURA

1. **DEVE ESSERE ELETTRICAMENTE NEUTRA**  
(altrimenti sarebbe visibile)
2. **NON DEVE AVERE CARICA DI COLORE**  
(nessuna interazione forte, altrimenti cambierebbe la **NUCLEOSINTESI PRIMORDIALE**)
3. **INTERAGIRE MOLTO DEBOLMENTE CON I BOSONI DEL SETTORE DEBOLE**  
(altrimenti sarebbe già stata rivelata dagli esperimenti)
4. **INTERAZIONE CON MATERIA BARIONICA SOLO GRAVITAZIONALE**<sup>34</sup>

FORMA DI MATERIA MOLTO ESOTICA: SE UN CALCIATORE FATTO DI MATERIA BARIONICA DA UN CALCIO AD UN PALLONE DI MATERIA OSCURA IL PIEDE PASSA ATTRAVERSO IL PALLONE SENZA INCONTRARE ALCUNA RESISTENZA!



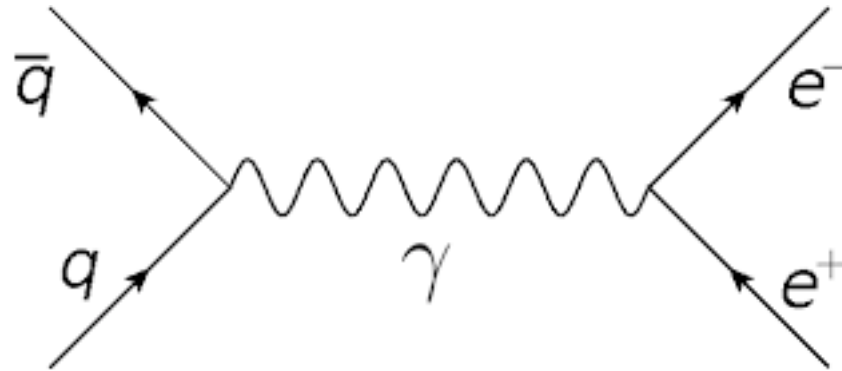
- PARTICELLA ELEMENTARE CANDIDATO PIU' PROMETTENTE: **WEAK INTERACTING MASSIVE PARTICLE (WIMP)** PRESENTE NELL'UNIVERSO PRIMORDIALE

- **COME HANNO FATTO LE WIMPS A SOPRAVVIVERE ED ESSERE COSI' ABBONDANTI OGGI?**

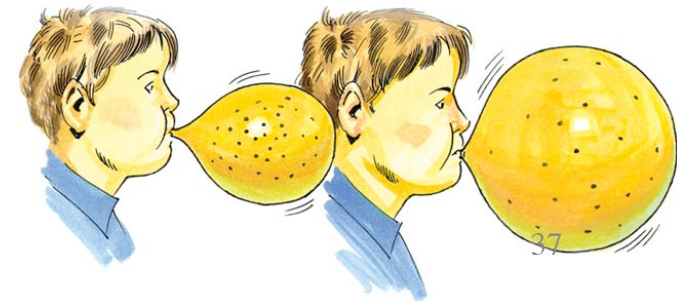
- ***IL MIRACOLO DELLE WIMPS***

- ◆ NELL'UNIVERSO PRIMORDIALE ESISTE UN MECCANISMO UNIVERSALE CHIAMATO **DISACCOUPIAMENTO CHIMICO O CONGELAMENTO**

# PARTICELLA ED ANTIPARTICELLA WIMP SI ANNICHILANO



QUANDO LA VELOCITA' DI INTERAZIONE  
 $\Gamma = \sigma v n$  DIVENTA MINORE DELLA VELOCITA'  
DI ESPANSIONE DELL'UNIVERSO  $H$  LA  
DENSITA'  $n$  RIMANE COSTANTE SINO AD  
OGGI (CONGELAMENTO)



**MIRACOLO:** SE NELLA FORMULA METTIAMO LE MASSE ( $\sim 100$  GEV) E GLI ACCOPPIAMENTI TIPICI DELLA SCALA ELETTRODEBOLE **TROVIAMO LA DENSITA' DI MATERIA OSCURA CHE CI SERVE  $\sim 24\%$**

**CANDIDATI PER WIMP:** PARTICELLE SUPERSIMMETRICHE (NEUTRALINO, SNEUTRINO), ASSIONI, NEUTRINI STERILI, PARTICELLE DI KALUZA-KLEIN....

**SOLO GLI ESPERIMENTI** COME PER ESEMPIO **DARK SIDE AL GRAN SASSO** POTRANNO DARE LA RISPOSTA ALLA DOMANDA SE LA PARTICELLA ELEMENTARE CHE FORMA LA MATERIA OSCURA ESISTA VERAMENTE (vedi seminario Marco Razeti e Walter Bonivento)

# ESISTONO SPIEGAZIONI ALTERNATIVE?

- L'IPOTESI DELL'ESISTENZA DELLA **MATERIA OSCURA** PER SPIEGARE IL PROBLEMA DELLA **MASSA MANCANTE** E' QUELLA PIU' CONSERVATIVA.
- INOLTRE DAL PUNTO DI VISTA EPISTEMOLOGICA E' LA CLASSICA ***IPOTESI AD HOC***
- **ALTERNATIVA:** MODIFICARE LA RELATIVITÀ GENERALE DI EINSTEIN A GRANDI DISTANZE (I test della RG coprono solo scale che vanno dal micron a 10 AL)

■ SONO STATE PROPOSTE DIVERSE TEORIE ALTERNATIVE DI QUESTO TIPO: **MOND**, **TEORIE F(R)**, **TEVES....**

(vedi seminario di Matteo Tuveri)

■ IN GENERE QUESTE TEORIE RIPRODUCONO BENE LE CURVE ROTAZIONALI ED IL LENSING ( BULLET CLUSTER A PARTE)



- QUESTO TIPO DI TEORIE HANNO MOLTE DIFFICOLTÀ SUL VERSANTE COSMOLOGICO ( **FORMAZIONE DI STRUTTURA, LARGA SCALA ETC.** )
- SONO MOLTO VINCOLATE ANCHE DALLE ULTIME OSSERVAZIONI DI ONDE GRAVITAZIONALI E GAMMA RAY BURSTS DA SISTEMI DI STELLE A NEUTRONI

## IN CONCLUSIONE:

■ L'IPOTESI **MATERIA OSCURA** SEMBRA  
RISOLVE PRATICAMENTE TUTTI I  
PROBLEMI MA

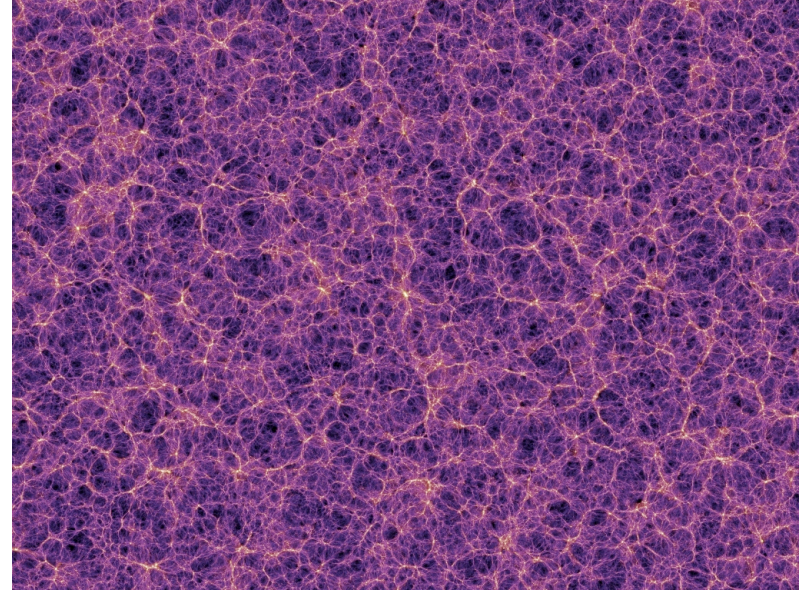
- ◆ E' UN IPOTESI AD HOC
- ◆ **PARTICELLA ELEMENTARE CHE  
DOVREBBE COSTRUIRLA NON  
ANCORA OSSERVATA**
- ◆ NON RISOLVONO IL PROBLEMA  
DELL'ENERGIA OSCURA

# ■ MODIFICHE SU LARGA SCALA DELLA RELATIVITÀ GENERALE

- ◆ CONCETTUALMENTE PIÙ ATTRAENTI
- ◆ PROBLEMA ENERGIA OSCURA PIÙ SEMPLICE DA ATTACCARE

MA

- ◆ NON RIESCONO A RISOLVERE TUTTI I PROBLEMI IN PARTICOLARE FORMAZIONE DI STRUTTURE E COSMOLOGIA



GRAZIE PER  
L'ATTENZIONE!!!

