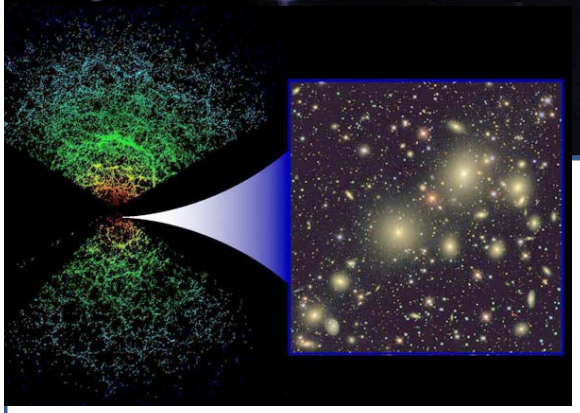
Luce sull'universo:
da LHC alla cosmologia
Valeria Pettorino
Scuola Internazionale Superiore
di Studi Avanzati (SISSA), Trieste

Scale molto diverse



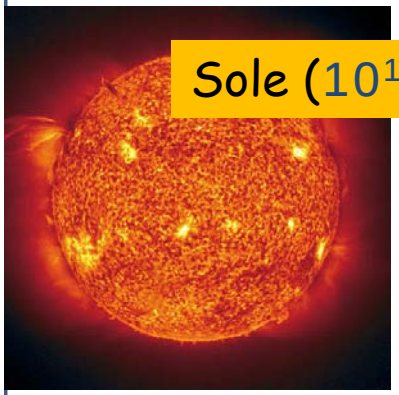
Cosmologia (10^{26})

Galassie (10^{20})

10^{20}

Astrofisica

Sole (10^{11})



10^{10}

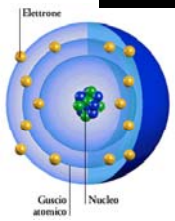
Terra (10^{6})

1

Essere umano

Dimensioni (m)

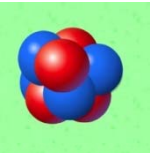
Chimica



10^{-10}

Fisica atomica (10^{-10})

Fisica nucleare (10^{-15})



10^{-20}

LHC e fisica delle particelle (10^{-19})

Parleremo di…

1. Com'è fatta la materia che c'è nell'Universo?
2. Perché la materia ha massa? Bosone di Higgs e LHC
3. Materia oscura e cosmologia
4. Materia e Antimateria
5. Energia oscura

Parleremo di…

1. Com'è fatta la materia che c'è nell'Universo?
2. Perché la materia ha massa? Bosone di Higgs e LHC
3. Materia oscura e cosmologia
4. Materia e Antimateria
5. Energia oscura

Com'è fatto l'Universo?

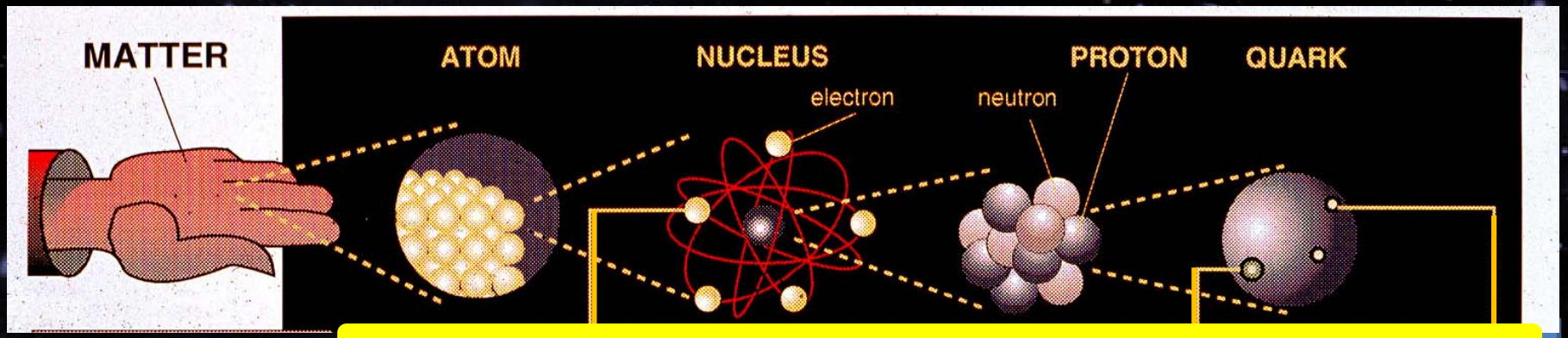
È possibile spiegare l'enorme diversità dei fenomeni che ci circondano in modo semplice?

Esistono degli elementi fondamentali a partire dai quali possiamo costruire tutto il nostro mondo?

Il Modello Standard

Pochi elementi fondamentali da cui si costruisce *tutto*:

12 particelle (6 quarks e 6 leptoni)
4 forze fondamentali
(e particelle mediatrici)



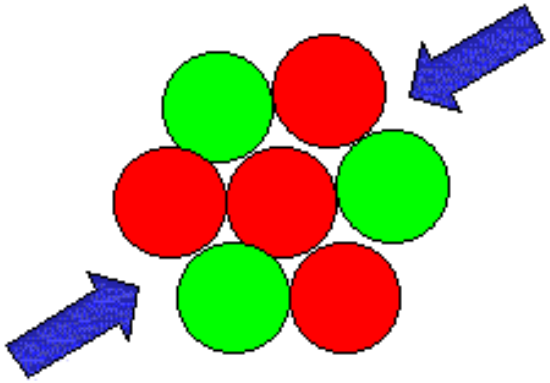
Tutta la materia ordinaria appartiene a questo gruppo

Queste particelle sono esistite subito dopo il Big Bang

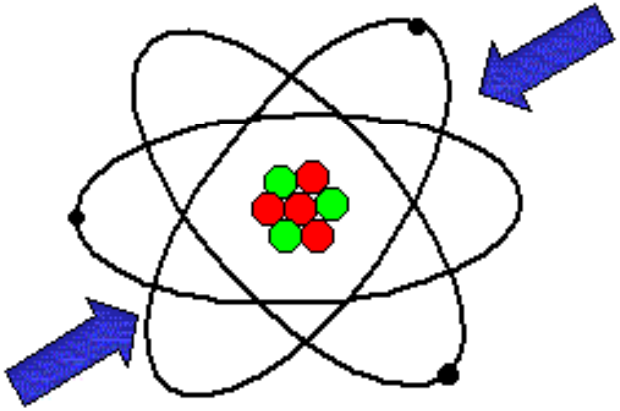
Ora si trovano solo nei raggi cosmici o sono prodotte negli acceleratori

6 LEPTONI		6 QUARKS	
Elettrone Carica elettrica -1 Responsabile dell'elettricità e delle reazioni chimiche	**Neutrino elettronico** Neutro. Interagisce raramente con la materia	**up** Carica elettrica 2/3 I protoni hanno due quarks up	**down** Carica elettrica -1/3 ..e un quark down
Muone Un parente (più pesante) dell'elettrone	**Neutrino elettronico** Creato con i muoni quando qualche particella decade	**Charm**	**Strange**
Tau Ancora più pesante.	**Neutrino elettronico** Ancora non osservato direttamente,	**Top**	**Bottom**

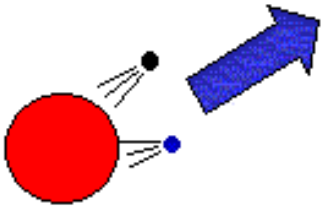
Le quattro forze fondamentali



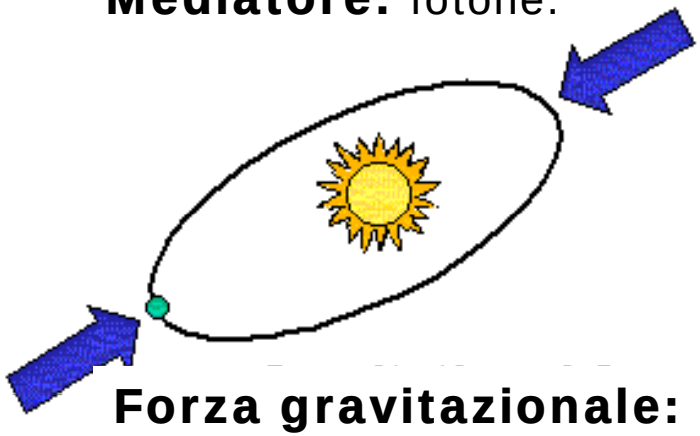
Forza forte:
tiene insieme il nucleo, forma ADRONI (protoni, neutroni).
Mediatore: gluone.



Forza elettromagnetica:
atomi, luce, elettricità, ...
Agisce su particelle cariche.
Mediatore: fotone.



Forza debole:
Radioattività, combustione nel sole
Mediatori: W, Z



Forza gravitazionale:
sistema solare, galassie, buchi neri
Mediatore: gravitone

Che bel modello!

ma… non è tutto!

Come fanno le particelle ad acquistare massa?

Valeria Pettorino, Brera, 21.09.11

Parleremo di…

1. Com'è fatta la materia che c'è nell'Universo?
2. Perché la materia ha massa? Bosone di Higgs e LHC
3. Materia oscura e cosmologia
4. Materia e Antimateria
5. Energia oscura

Il campo di Higgs

Immaginate una stanza piena di persone che chiacchierano tranquille tra loro.

Un famoso cantante arriva alla festa: attraversa la stanza attirando a sé un gruppo di ammiratori.

Le persone riempiono lo spazio come il campo di Higgs.

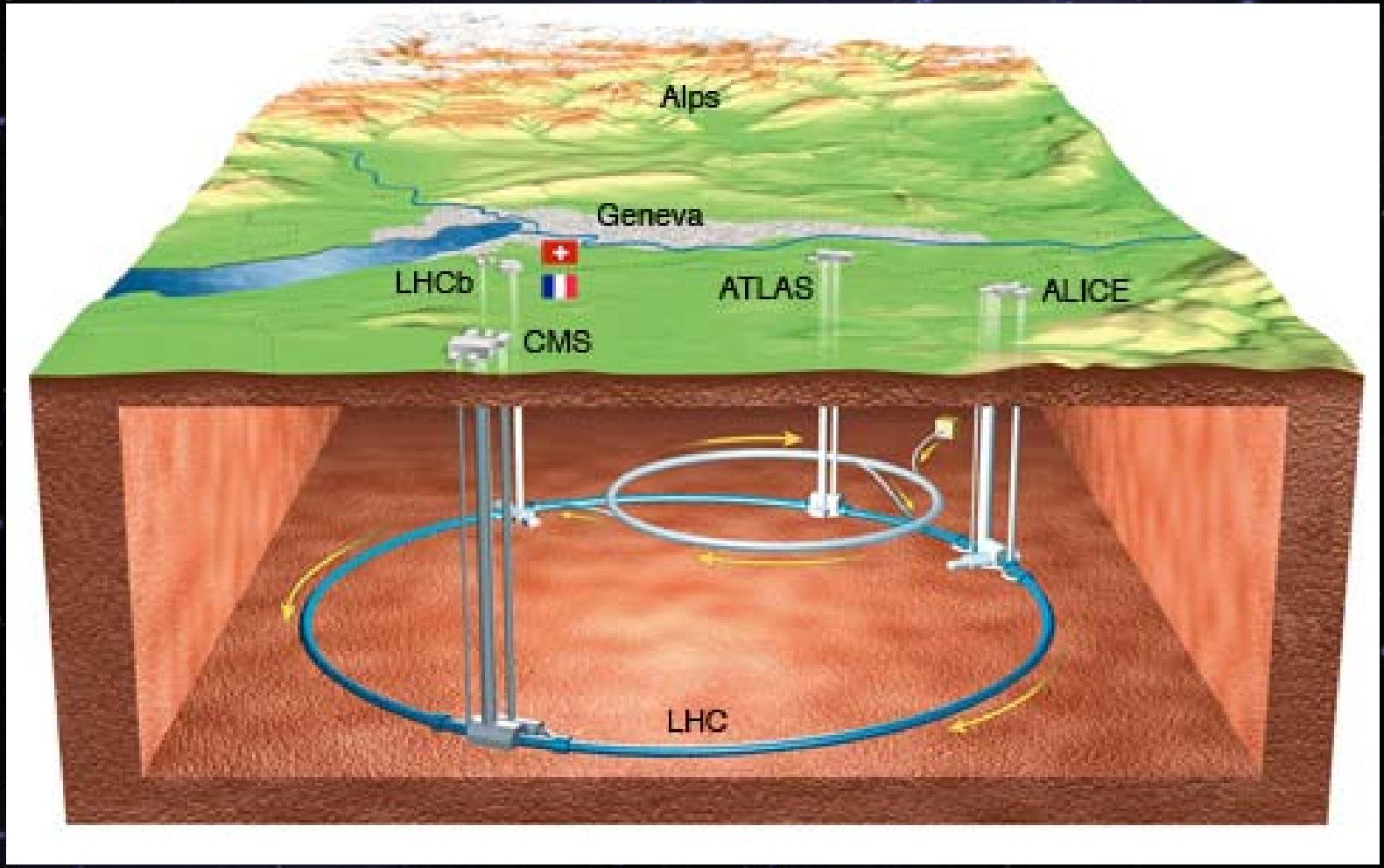
Questo fa sì che il cantante rallenti, incontrando resistenza ai suoi movimenti: cioè, acquista massa!

Peter Higgs in visita ad ATLAS (CERN)

Il 'messaggero' di questo campo è il bosone di Higgs. Una nuova particella. Massa almeno 130 volte più grande di quella del protone

ATLAS Experiment © 2011 CERN
Discovery Quest

Large Hadron Collider



Large Hadron Collider

Large: 27 km circonferenza e largo 3.8 m;
tunnel 100 m sotto terra (tra 50 e 175 m);
Più di 80 paesi coinvolti, circa 10000 fisici.
Costo totale: 20 anni, 4 miliardi di euro,
15 milioni di GB di dati all'anno (20km di CD all'anno).

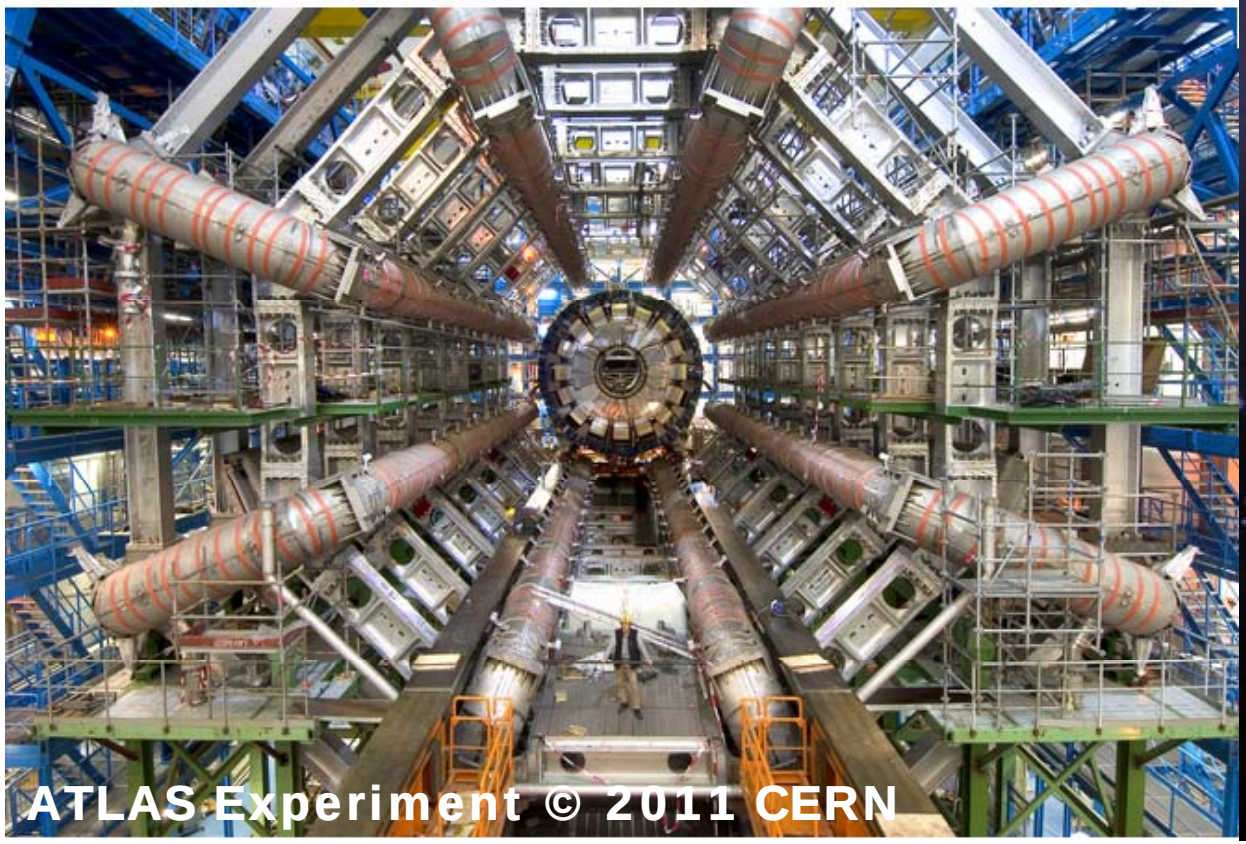
Hadron: gli adroni sono particelle formate da quarks (es. protoni e neutroni). LHC accelera protoni o ioni di piombo (possono essere accelerate particelle cariche e che non decadono).
In LHC, due fasci di protoni vengono accelerati a grandi energie (7 TeV per fascio). 300 trilioni di protoni per un fascio!
Da una bottiglia di gas hidrogeno: 1 cm^3 contiene 60 trilioni di protoni.

Collider:
i due fasci di protoni viaggiano in direzioni opposte e vengono fatti scontrare in quattro punti dell'anello.

ATLAS

Rivelatore destinato allo studio di nuova fisica: Higgs, SUSY, extra dimensioni.

Il più grande rivelatore mai costruito: 46m lunghezza, 25m altezza, 25 m larghezza, 7000 tonnellate.

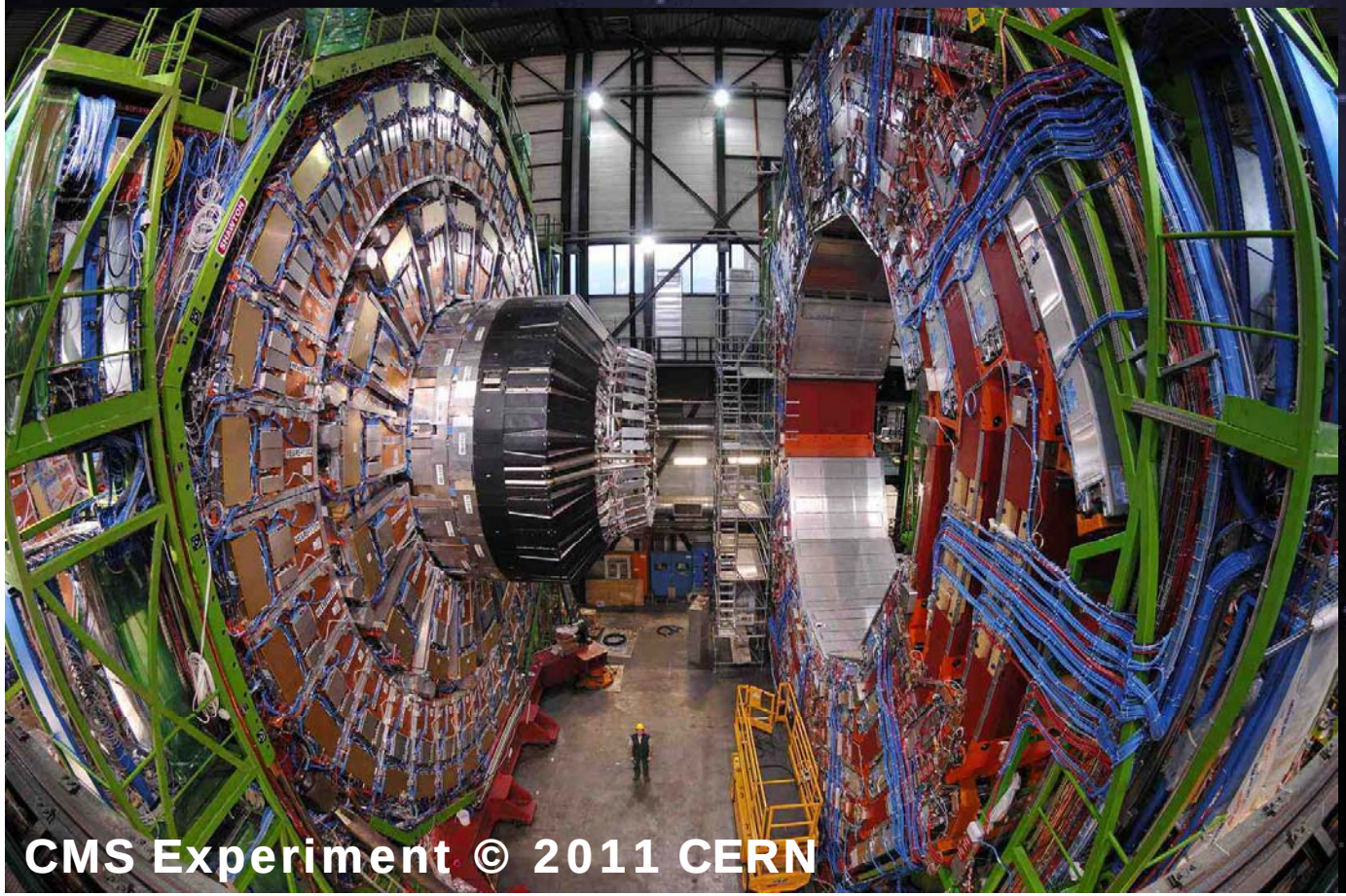


1900 persone da 164 istituti in 35 paesi (aprile 2007).

CMS

Rivelatore destinato allo studio di nuova fisica: Higgs, SUSY, extra dimensioni.

21m lunghezza, 15m altezza, 15 m larghezza, 12500 tonnellate.

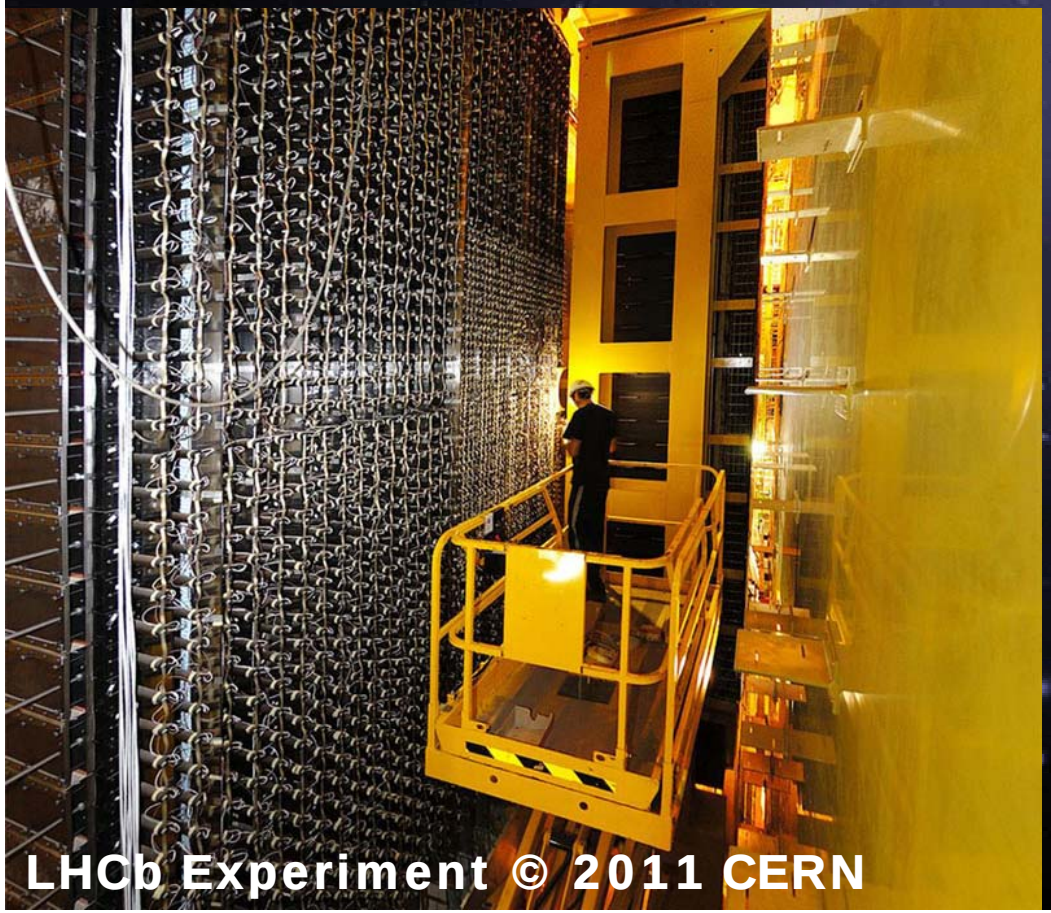


2000 persone da 181 istituti in 38 paesi (maggio 2007).

LHCb

Rivelatore destinato allo studio della asimmetria tra materia e antimateria nelle interazioni di particelle B (contenenti quarks b).

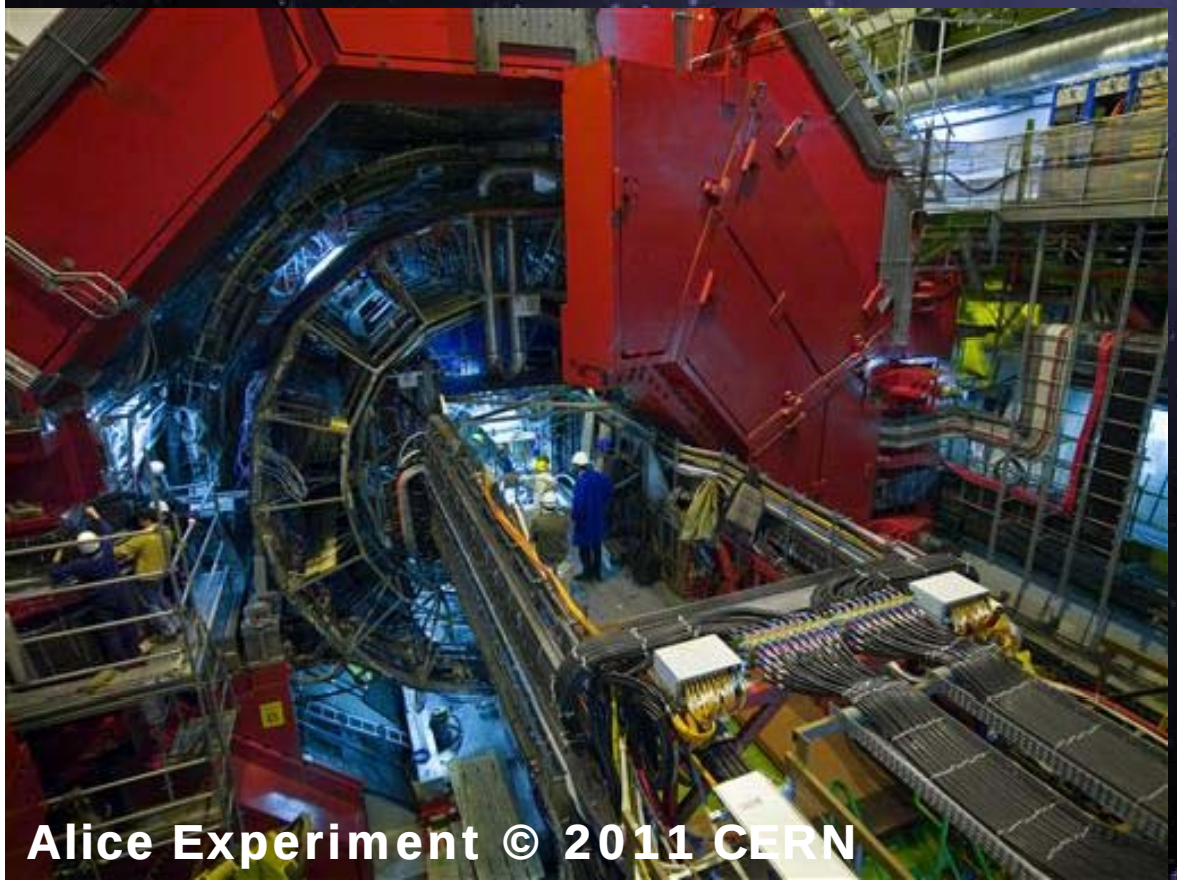
20m lunghezza, 10m altezza, 13 m larghezza, 5600 tonnellate.



650 persone da 47 istituti in 14 paesi (maggio 2007).

ALICE

Specializzato per lo studio di collisioni di ioni di piombo.
Studierà le proprietà del plasma primordiale di gluoni e quarks: stato della materia in cui la temperatura e densità sono così alte che quarks e gluoni non formano adroni.



26m lunghezza, 16m altezza, 16 m larghezza, 10000 tonnellate.

Più di 1500 persone provenienti da 104 istituti di 31 paesi (Luglio 2007)

LHC e collisioni

Collisioni tra particelle: energia complessiva di 14 TeV per i protoni, 7TeV per fascio; ioni 1150 TeV.

Energie mai raggiunte prima in laboratorio!

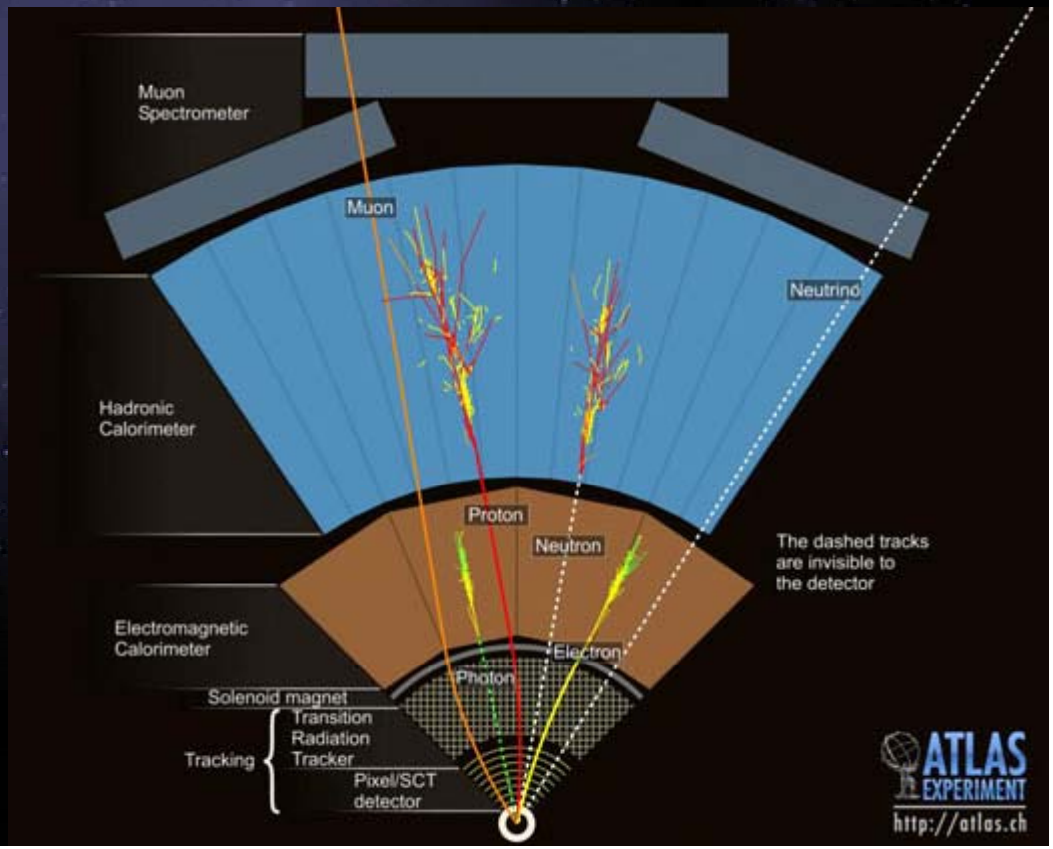
Attraverso collisioni tra particelle i fisici cercano di creare nuove particelle:
tra esse cercano la particella di Higgs

LHC e collisioni

Circa 600 milioni di collisioni tra protoni al secondo quando LHC opera alla massima intensità. Poche centinaia di eventi vengono poi studiati in dettaglio.

Combinando informazioni dai diversi strati del rivelatore è possibile ricostruire il tipo di particella

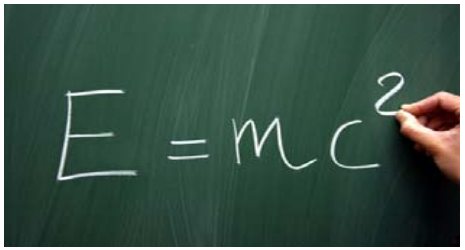
- particelle con carica opposta verrano deviate dal campo magnetico in direzione opposta.
- Particelle con maggiore velocità viaggiano su percorsi più rettilinei, quelle meno veloci possono fare spirali.
- elettroni sono leggeri, perdono energia rapidamente; p penetrano di più; fotoni visti solo nei calorimetri, quando si convertono in e + ebar. Neutroni misurati indirettamente: trasferiscono la loro energia a p che poi vengono misurati.



LHC ed energia

LHC (Large Hadron Collider) raggiungerà energie che si sono avute 10^{12} s dopo il Big Bang.

Per creare una particella di una certa massa m, serve almeno un'energia E



Quotidianamente abbiamo a che fare con energie molto più alte.

1 TeV è l'energia di moto di una zanzara!

La cosa straordinaria di LHC è che questa energia è concentrata in uno spazio 10^{-15} m, circa dieci milioni di milioni di volte più piccolo di una zanzara.

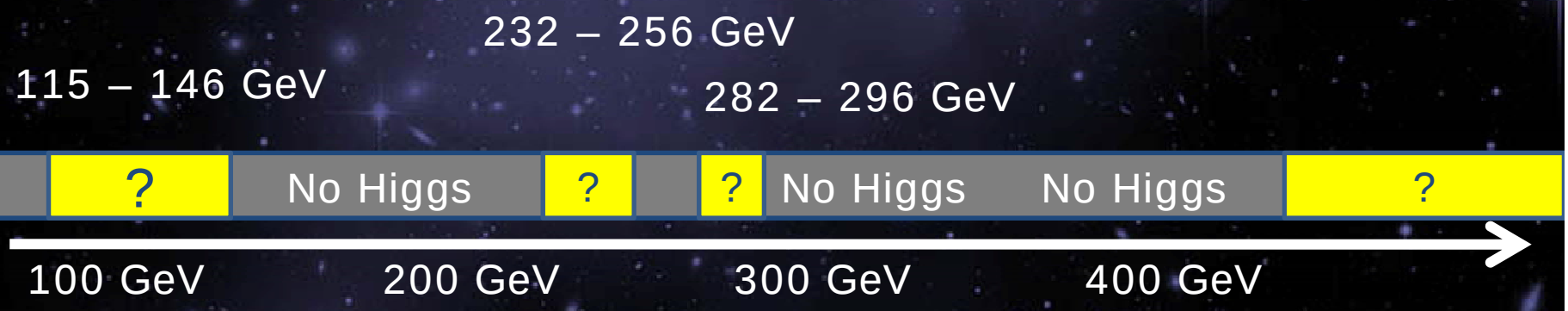
I protoni faranno il giro completo 11000 volte al secondo.

Una normale molecola atmosferica: circa 0,03 eV.
Particelle generate in un'esplosione nucleare: 0,3 - 3 MeV.

Primi risultati di LHC

Il 30 marzo 2010 ha avuto inizio la presa dati con energia nel centro di massa di 7 TeV

Ultimi risultati presentati 22-27 agosto 2011 a Mumbay



LHC

Il numero di Higgs prodotti dipende dal modello. Previsti circa uno ogni poche ore

Se non si trova l'Higgs ad LHC:

- è ancora più pesante di quello che LHC può rilevare?
- Non esiste? Nuova teoria sull'origine delle masse?

Parleremo di…

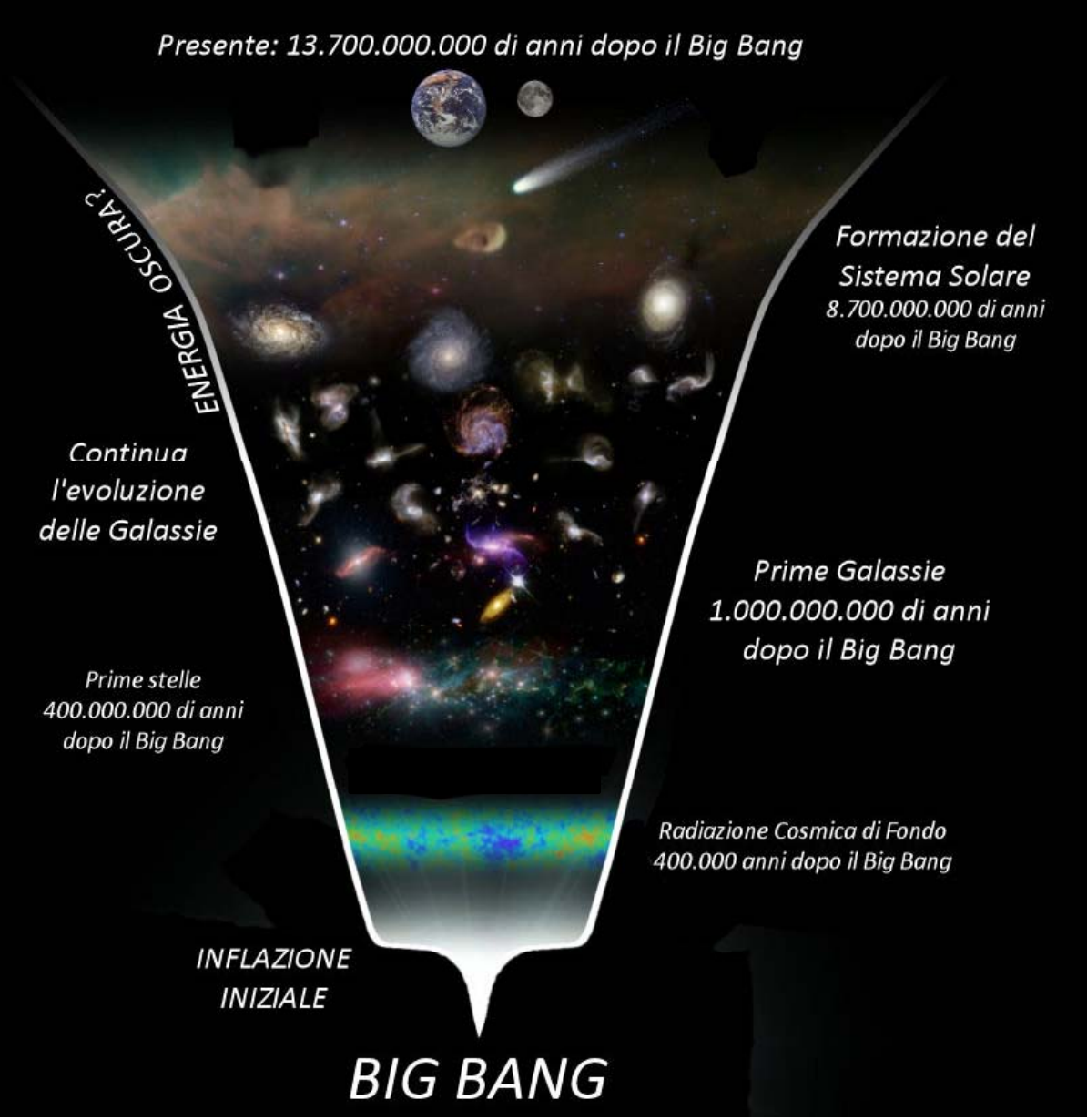
1. Com'è fatta la materia che c'è nell'Universo?
2. Perché la materia ha massa? Bosone di Higgs e LHC
3. Materia oscura e cosmologia
4. Materia e Antimateria
5. Energia oscura

Cosmologia

Studio delle origini, dell'evoluzione e del contenuto dell'Universo

Hubble Space Telescope

Breve storia dell'Universo



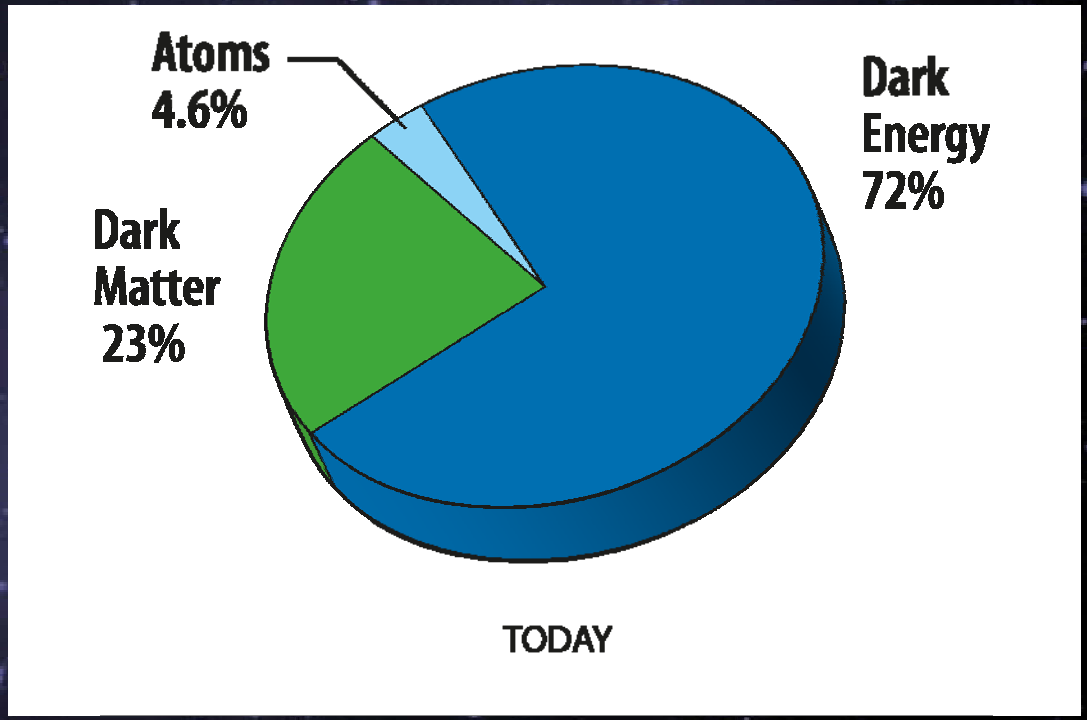
Estrapolando all'indietro nel tempo, possiamo prevedere che l'Universo ha avuto origine da uno stato a densità e temperatura molto alte

Età dell'Universo: 13-14 miliardi di anni

Universo e componenti oscure

L'Universo oggi

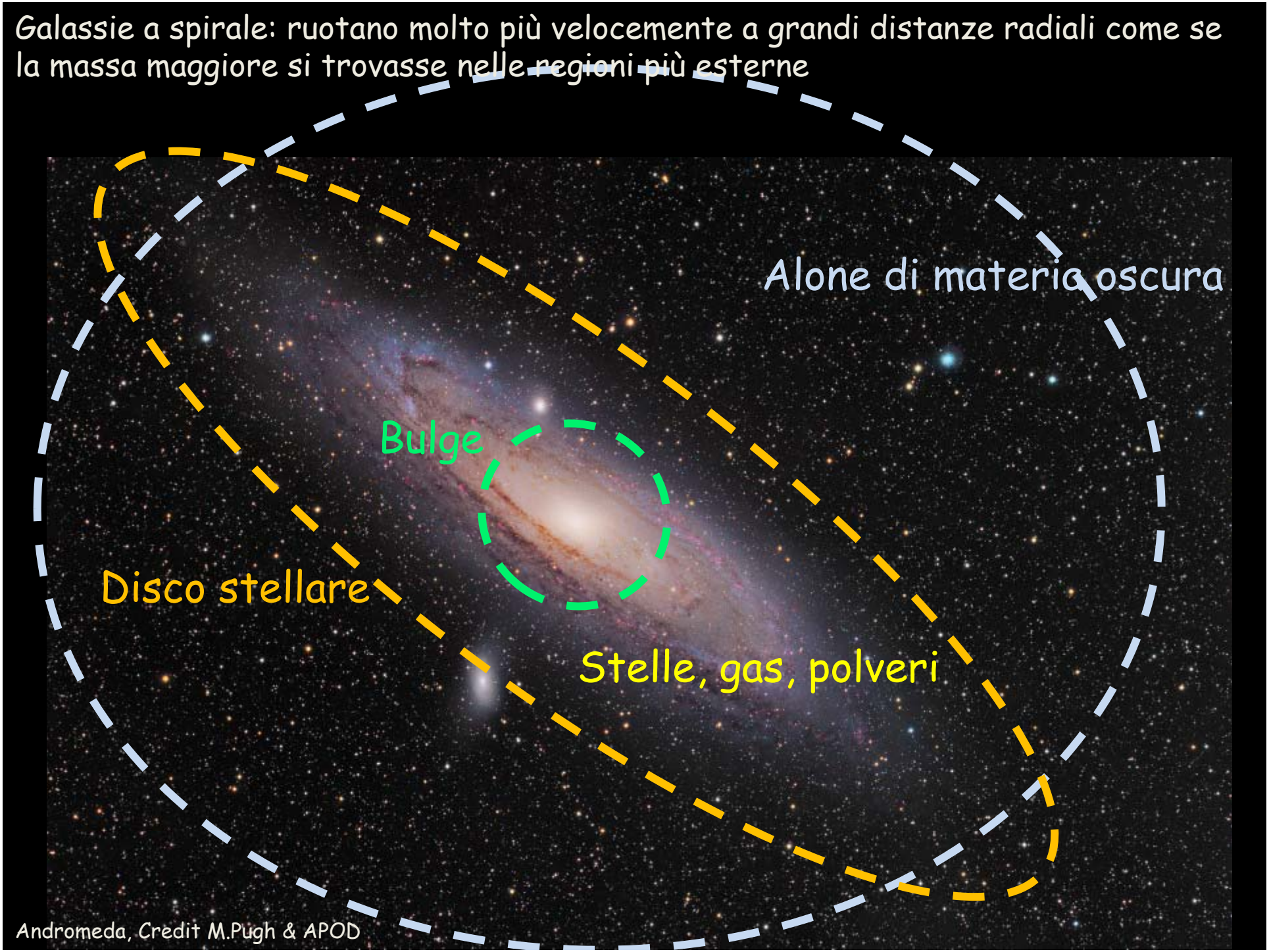
Circa l'85% della materia visibile è sotto forma di gas caldo intergalattico.



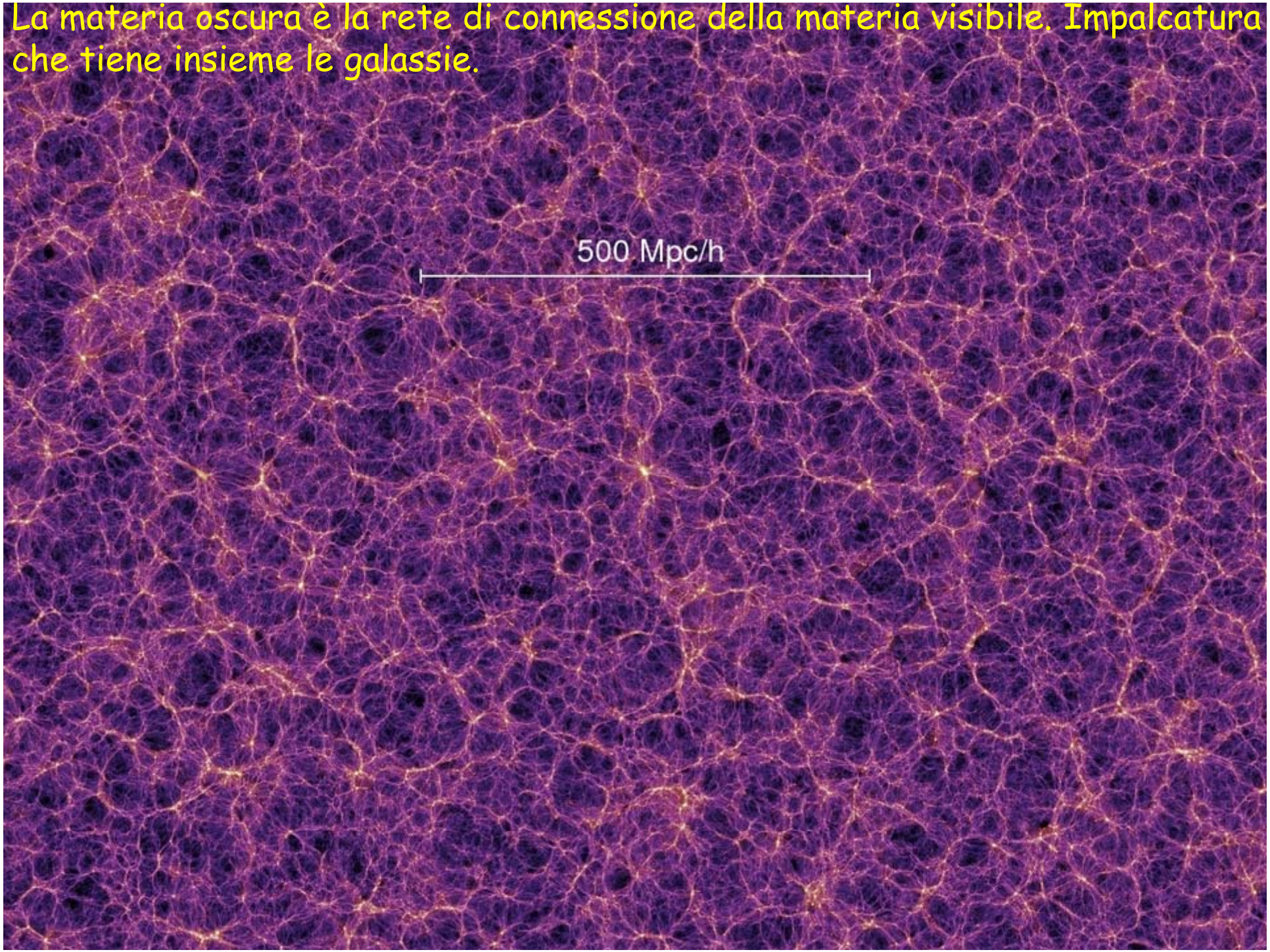
Materia non luminosa: rivelata finora in modo indiretto attraverso la forza di gravità. Forma strutture in cui cadono le particelle barioniche.

L'energia oscura contrasta la gravità e non forma strutture.

Galassie a spirale: ruotano molto più velocemente a grandi distanze radiali come se la massa maggiore si trovasse nelle regioni più esterne

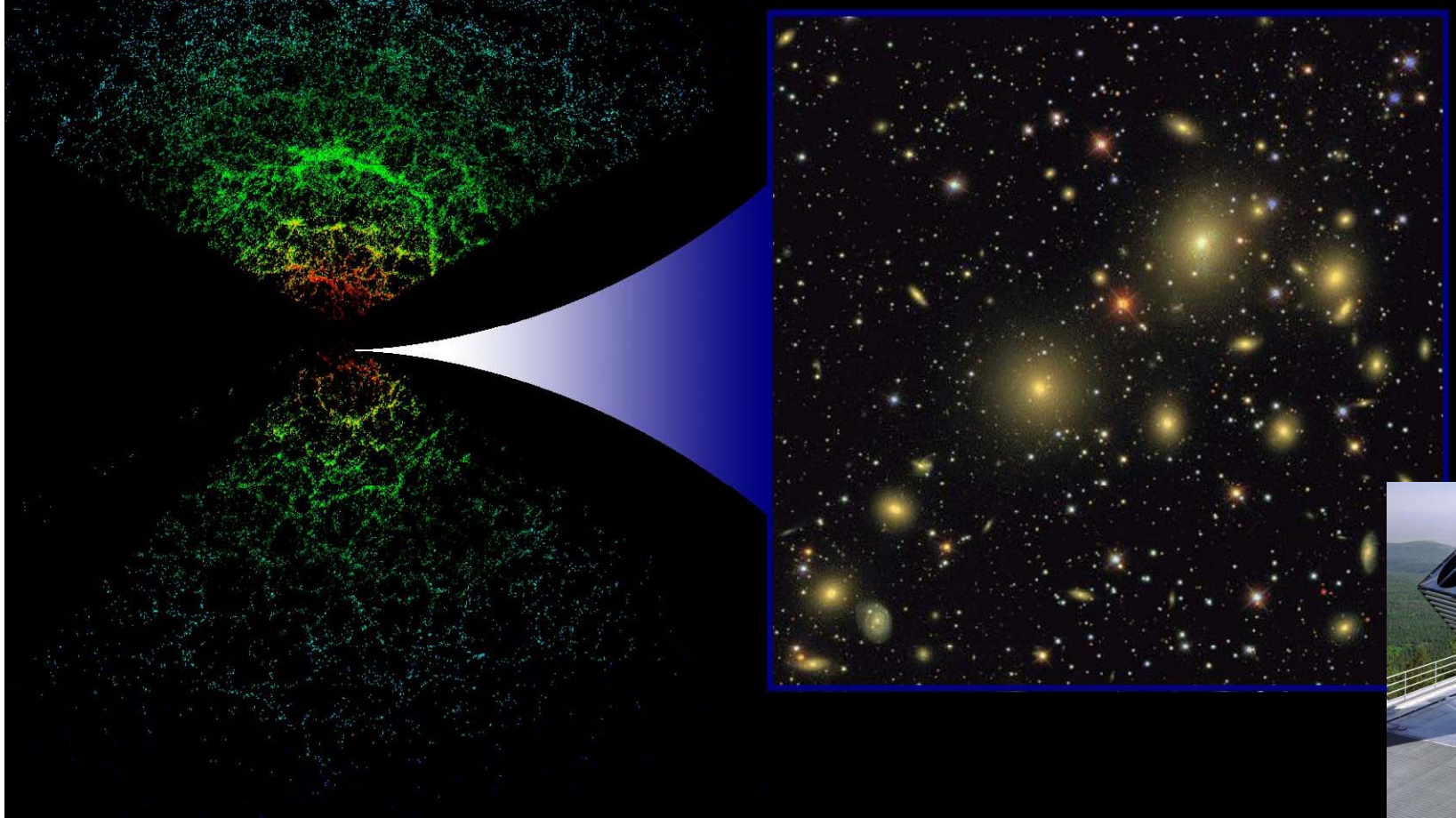


La materia oscura è la rete di connessione della materia visibile. Impalcatura che tiene insieme le galassie.



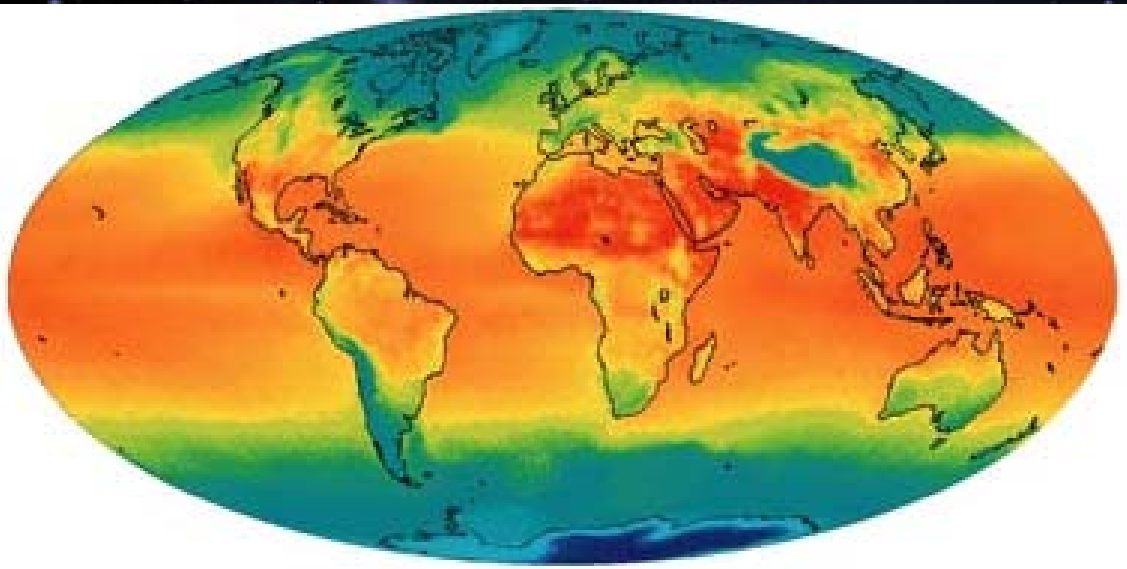
Strutture su larga scala osservate

Credit & Copyright: Sloan Digital Sky Survey Team, NASA, NSF, DOE

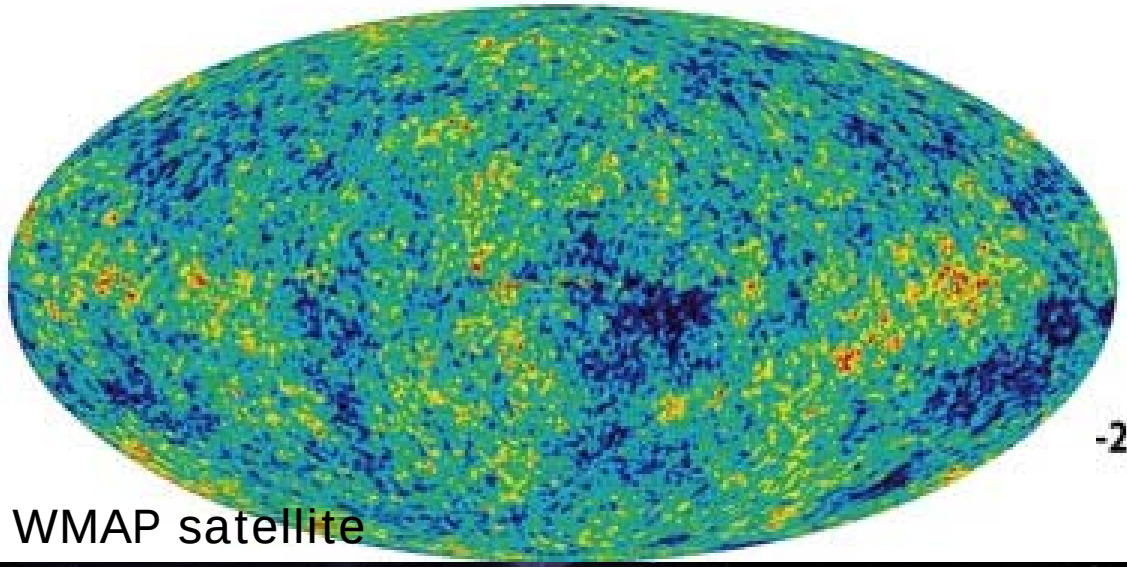


3D - SDSS

Radiazione cosmica di fondo (CMB)



Temperatura terrestre



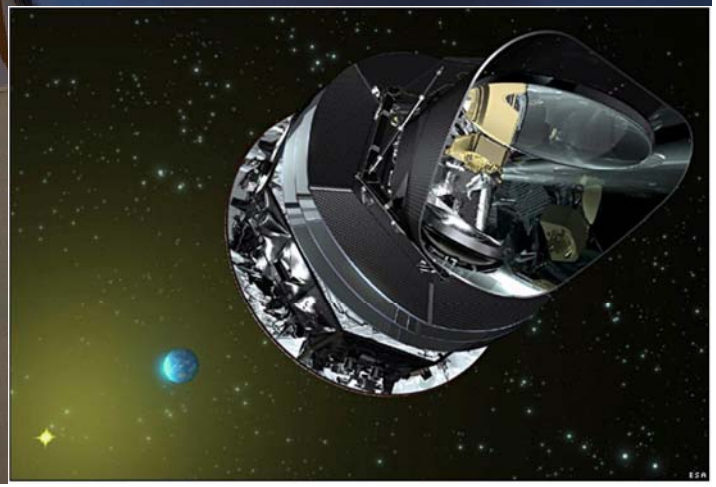
Temperatura della CMB

WMAP satellite

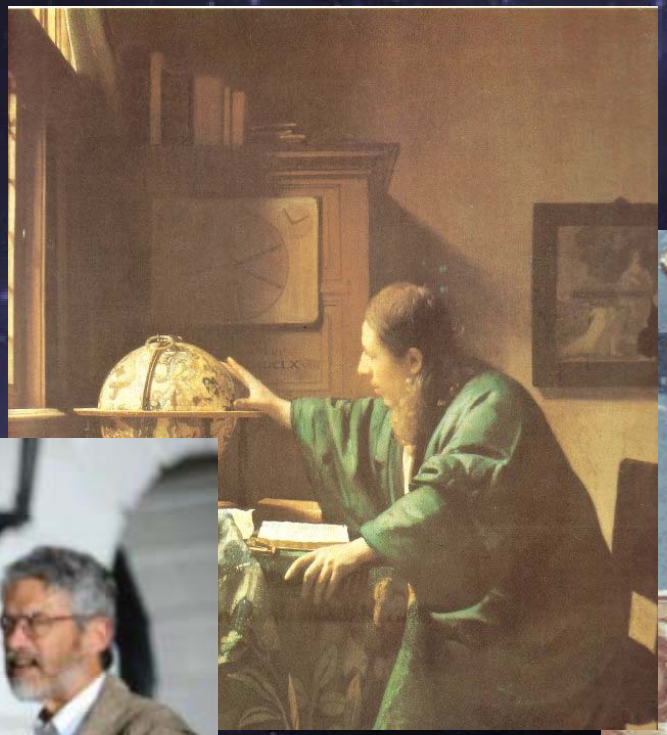
Satellite PLANCK

Missione spaziale ESA
Lanciato nel giugno 2009

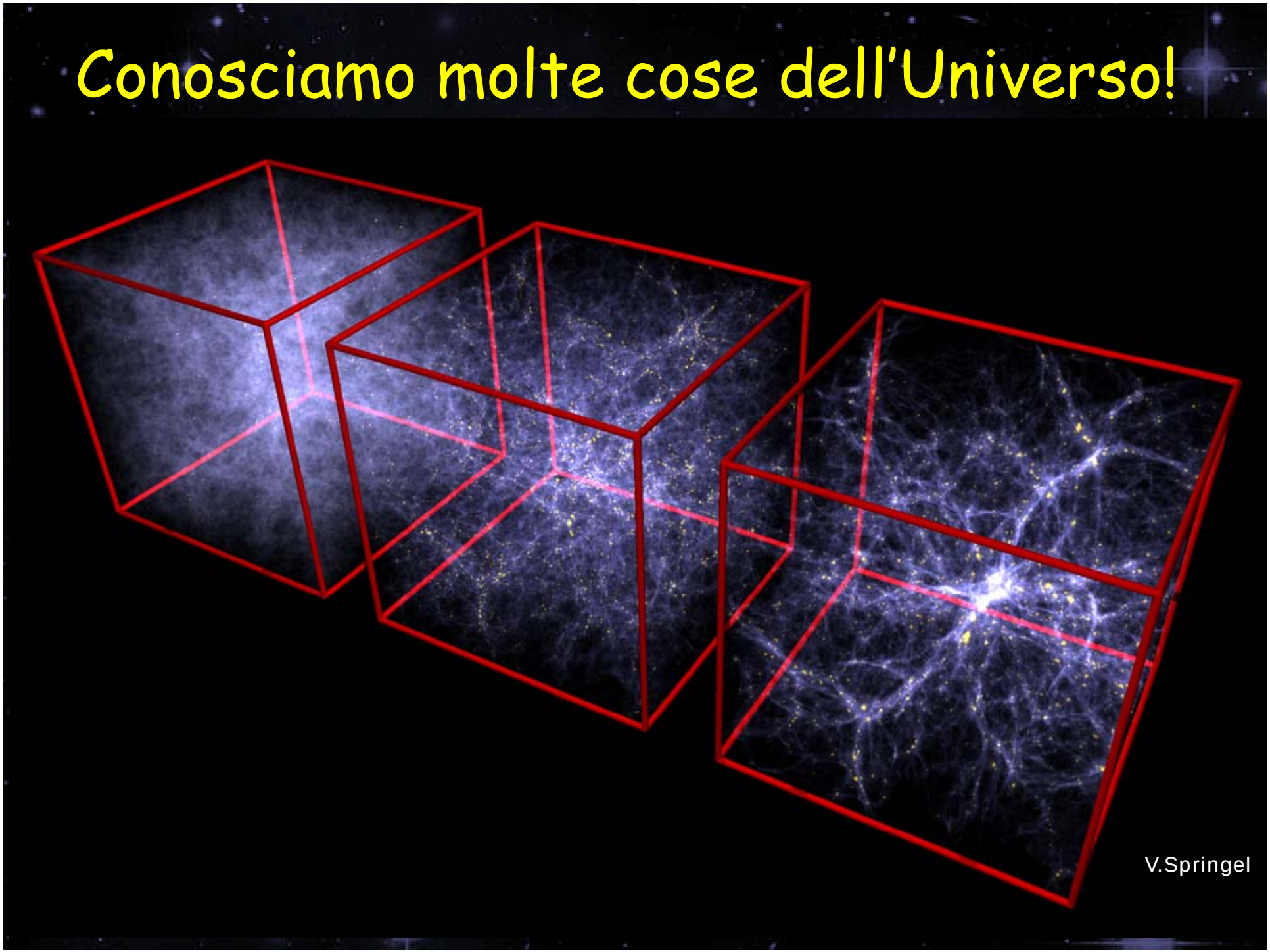
Planck che osserva il cielo



Non più un singolo astronomo



Conosciamo molte cose dell'Universo!



LHC e la materia oscura

La cosmologia ha dato indicazioni sulla presenza di materia oscura (velocità di rotazione delle galassie, CMB, ...) e su alcune sue proprietà.

Cosa può dirci LHC?

Materia oscura e candidati

WIMPS

Neutralino

Gravitino

Kaluza Klein Dark Matter

Assioni

Neutrini sterili

Hidden Dark Matter

SuperWIMPs

Materia oscura e proprietà

Interagisce con la gravità

Fredda: ovvero le particelle si muovono a bassa velocità (<0.1c) rispetto alla velocità della luce (Cold Dark Matter, CDM).

Non è fatta di quarks e leptoni

Ha una vita lunga, non decade facilmente

Si tratta di una o più particelle nuove, non previste dal modello standard!

Materia oscura e proprietà

Non abbiamo molte indicazioni sulla massa

Masse intorno ai 100 GeV sono più motivate (circa 10^{-28} kg)

Non ancora osservate!

Supersimmetria

Ogni particella ha una particella partner.

Spin diverso: momento angolare instrinseco legato alla rotazione della particella intorno al proprio asse.

Bosoni ⟷ **Fermioni**

Simmetria tra particelle mediatrici di forze e particelle di materia

LHC e materia oscura

Se SUSY è vera, il Big Bang ha prodotto tante particelle SUSY. Molte sono decadute ma la più leggera è sopravissuta:

la particella di materia oscura

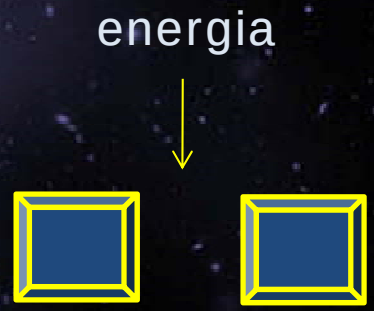
LHC ricrea, su scala più piccola, le condizioni nell'Universo dopo il Big Bang per capire com'è fatto l'Universo oggi.

Può produrre materia oscura e ricostruire le sue proprietà

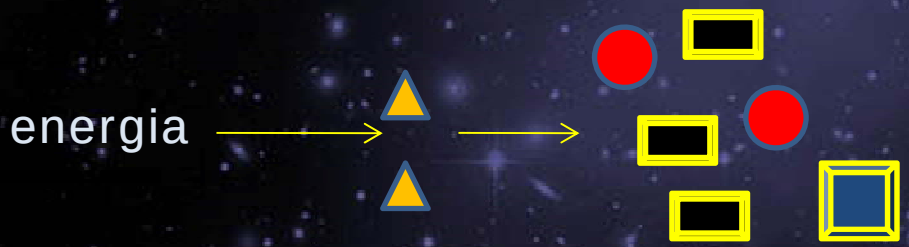
LHC e materia oscura

Energia sufficiente a produrre coppie di WIMPS.
Produzione diretta è però invisibile!

E quindi come vediamo se si è creata materia oscura?



Produzione indiretta e energia mancante



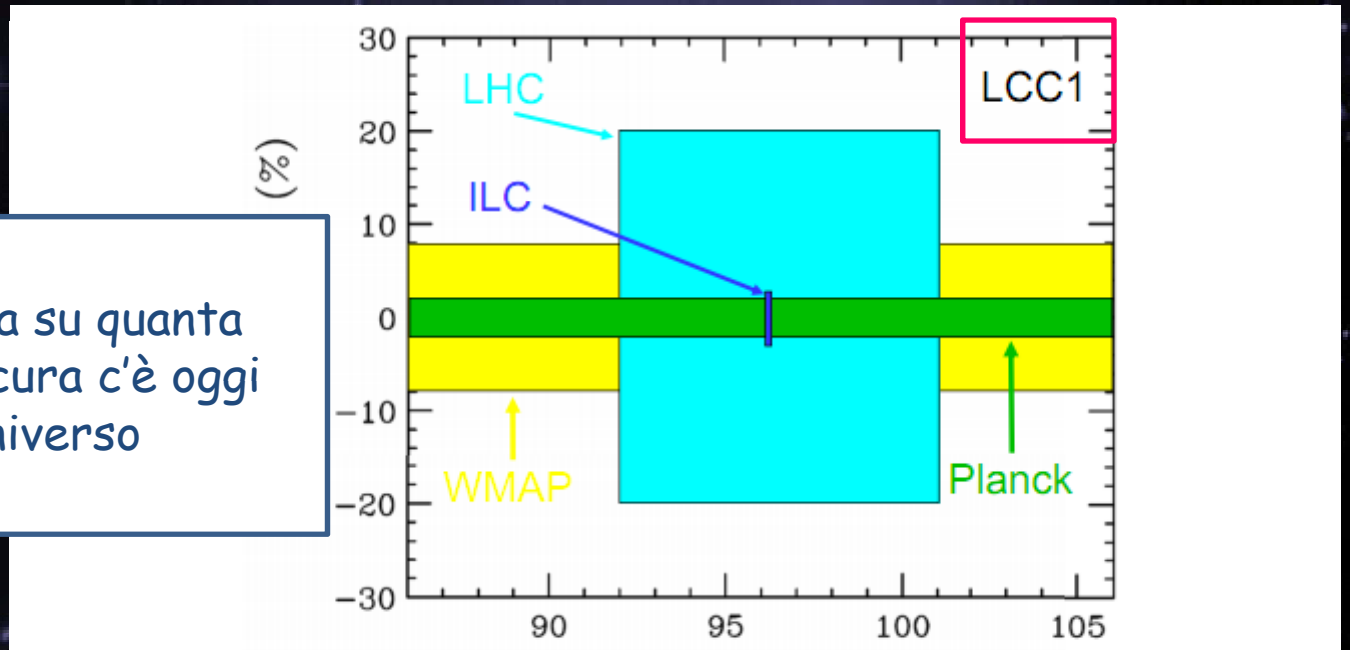
Se manca energia vuol dire che una particella stabile si è formata ed è riuscita a fuggire dal rivelatore

Ricostruiamo le particelle emesse e il modo in cui decadono. Se una WIMP è stabile può riuscire a fuggire. Misuriamo energia mancante.

Non basta: serve che sia in accordo con le previsioni della cosmologia.
Serve misurare le proprietà della materia oscura con precisione sufficiente a calcolare l'abbondanza della materia oscura

LHC e cosmologia

In cosmologia, satelliti come WMAP e PLANCK indicano quanta materia oscura c'è nell'Universo (entro un certo intervallo) ma non danno indicazioni sulla massa. Gli acceleratori danno informazioni soprattutto sulla massa.



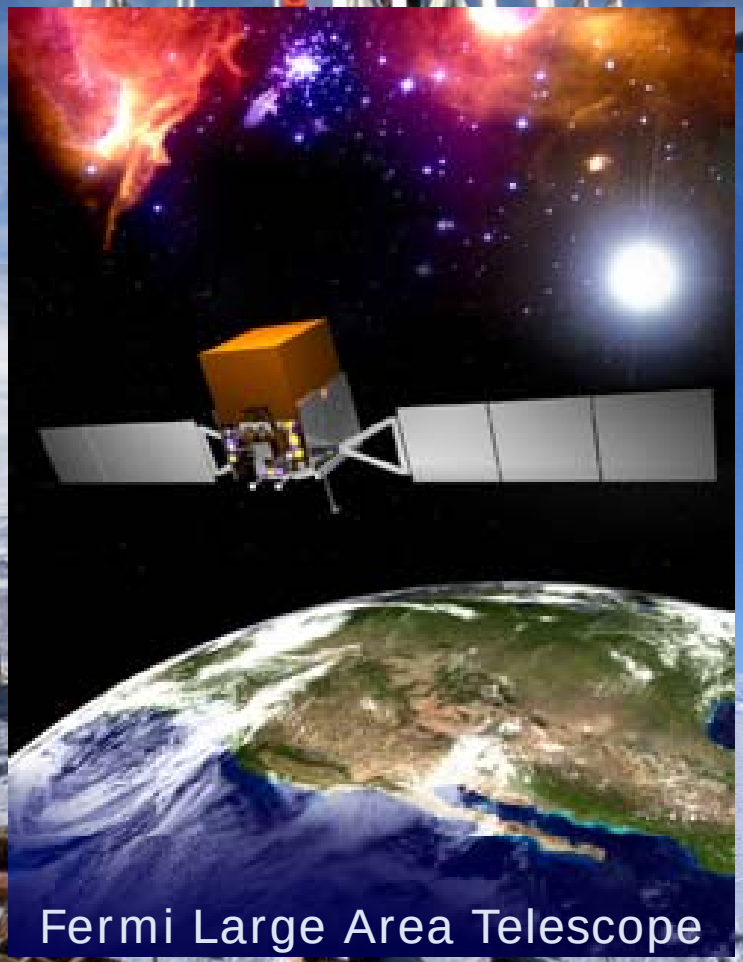
Incertezza su quanta materia oscura c'è oggi nell'universo

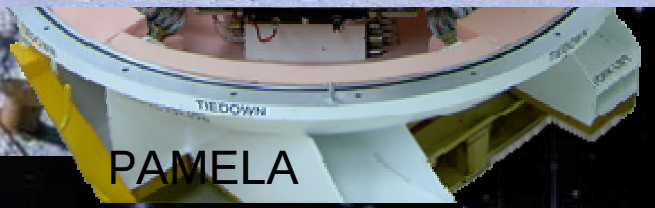
Massa della materia oscura

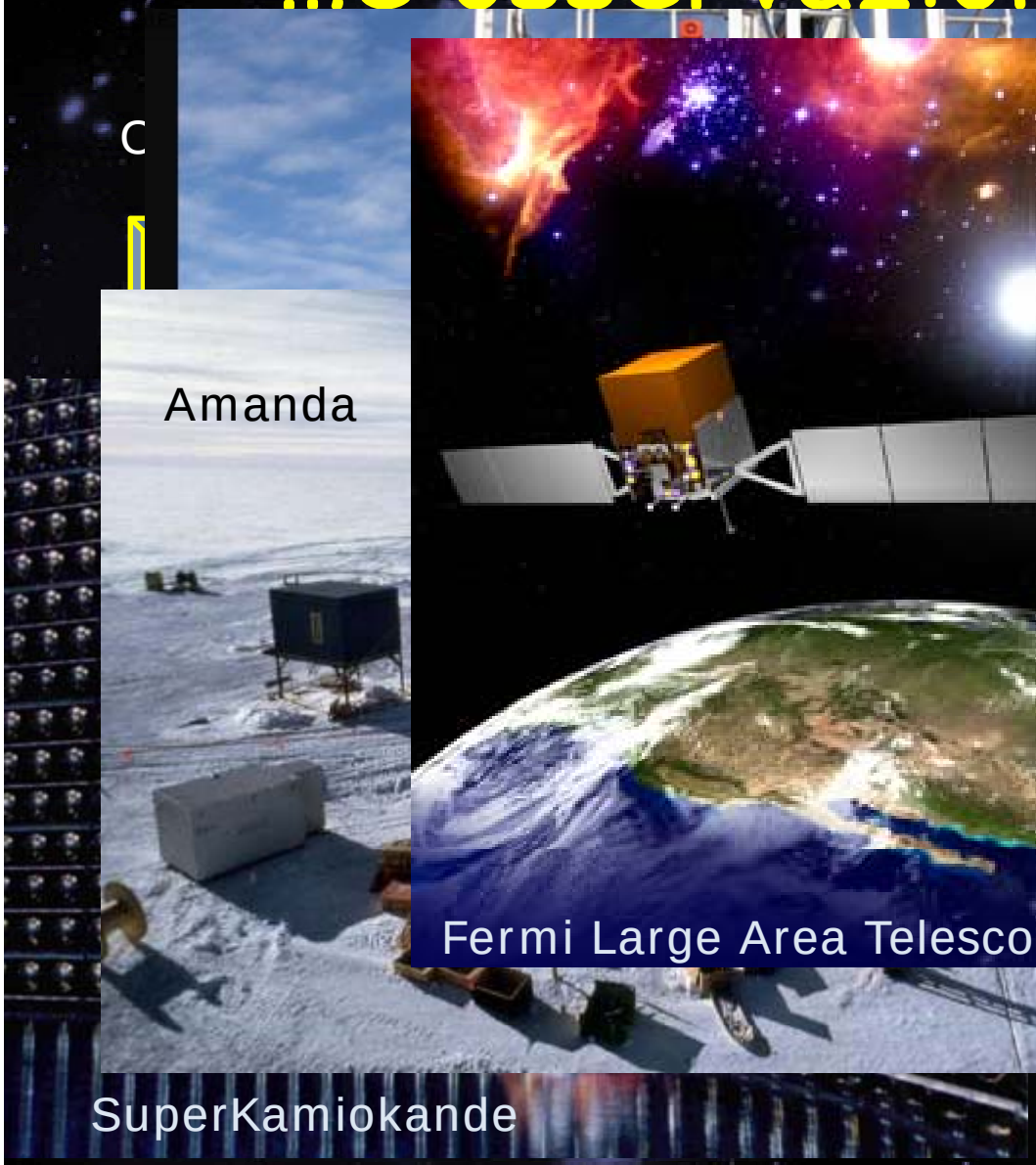
Feng 2010, **arXiv:1003.0904**

XENON, Gran SASSO
oimbra). E. Aprile, M. Yamashita, R. Santorelli (Columbia)
CDMS, Soudan Undergound Lab, Minnesota

...e osservazioni indirette







LHC, osservazioni dirette e osservazioni indirette…

possono dare informazioni su regioni diverse dei parametri dei modelli di materia oscura

Parleremo di…

1. Com'è fatta la materia che c'è nell'Universo?
2. Perché la materia ha massa? Bosone di Higgs e LHC
3. Materia oscura e cosmologia
4. Materia e Antimateria
5. Energia oscura

Antimateria e il mondo perduto

Energia

Particella di materia

Particella di antimateria

Stessa massa ma carica opposta:

es. elettrone e positrone

Antimateria prodotta in LHC (routine da 50 anni!) e naturalmente quando i raggi cosmici collidono con particelle nell'atmosfera terrestre

Antimateria e il mondo perduto

Prodotte in eguale quantità dopo il Big Bang.

Perché non c'è stata annichilazione tra materia e antimateria, lasciando solo radiazione?

Perché il nostro mondo è fatto di materia?
Non erano perfettamente uguali all'inizio: c'era un po' più di materia che è sopravvissuta?

Materia e antimateria decadono in modo diverso?

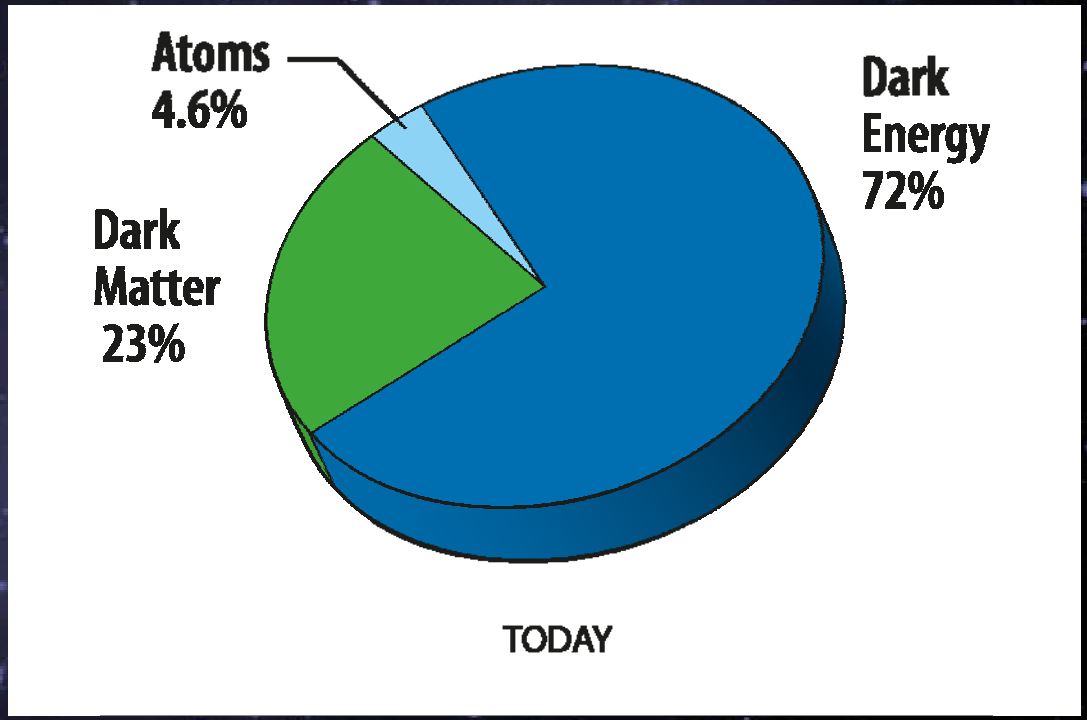
LHCb dedicato al decadimento di quark e antiquark b.

Parleremo di…

1. Com'è fatta la materia che c'è nell'Universo?
2. Perché la materia ha massa? Bosone di Higgs e LHC
3. Materia oscura e cosmologia
4. Materia e Antimateria
5. Energia oscura

L'Universo oggi

Circa l'85% della materia visibile è sotto forma di gas caldo intergalattico.

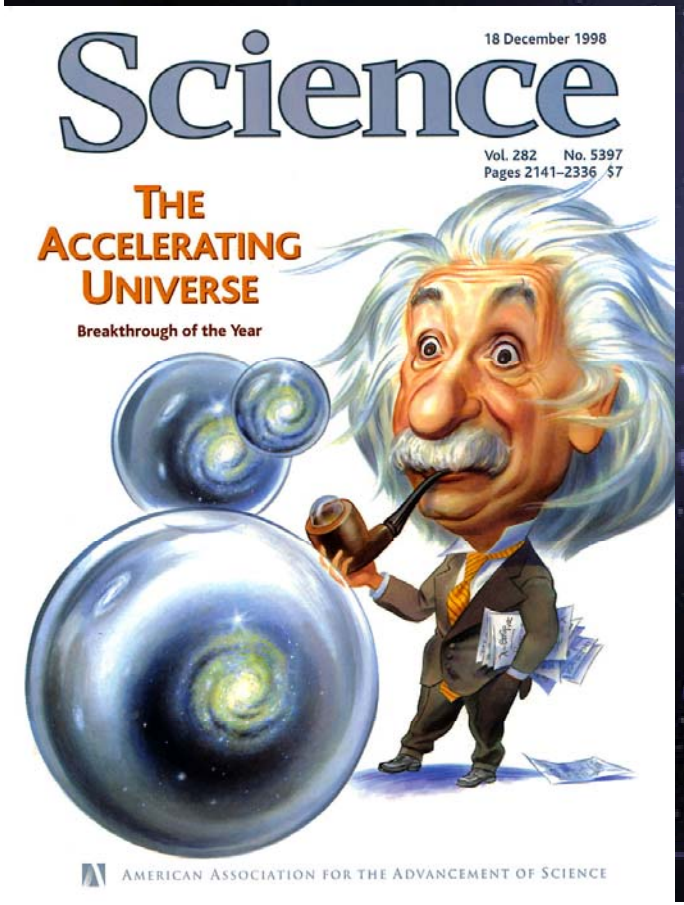


Materia non luminosa: rivelata finora in modo indiretto attraverso la forza di gravità. Forma strutture in cui cadono le particelle barioniche.

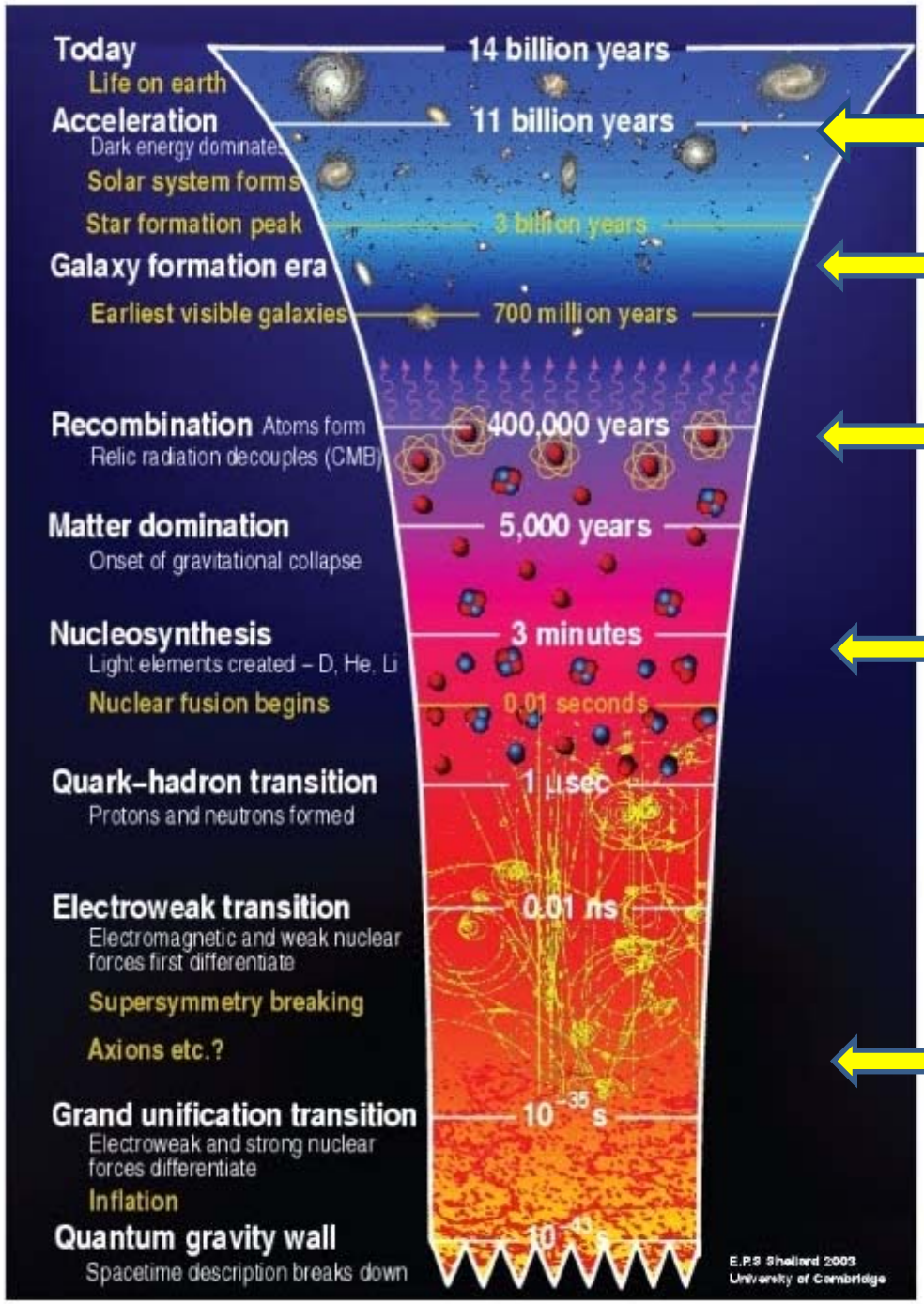
L'energia oscura contrasta la gravità e non forma strutture.

Una rivoluzione in cosmologia

L'espansione sta accelerando!
Ha cominciato circa 5 miliardi di anni fa.



Video: Espansione



Energia oscura e accelerazione

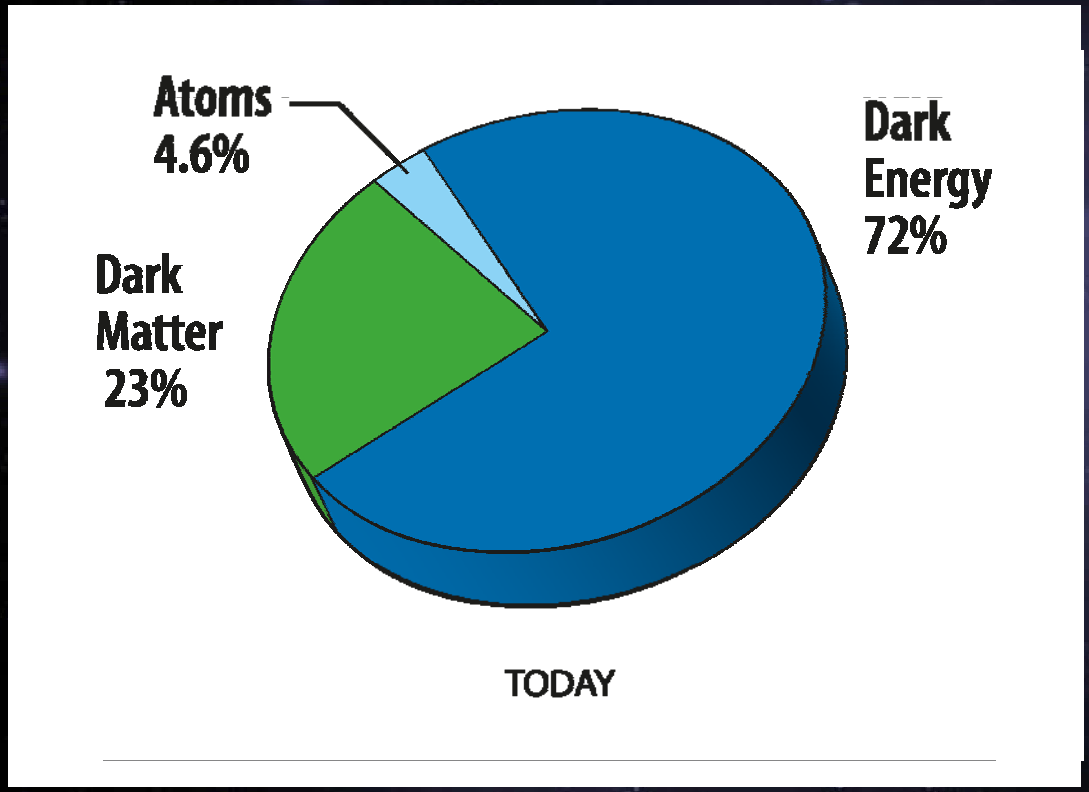
Formazione delle galassie

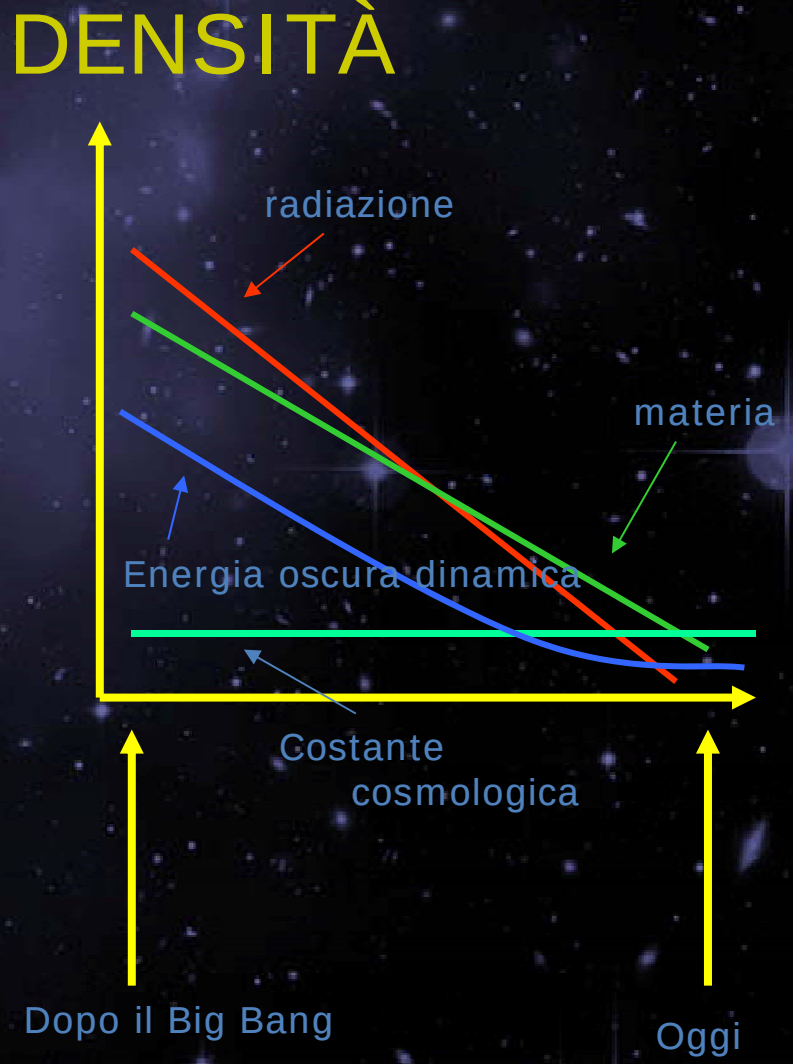
Si formano atomi. Radiazione cosmica di fondo (CMB), osservata!

BBN: fusione nucleare, si formano i nuclei più leggeri (D, He, Li)

Quark plasma: asimmetria quark e antiquark

Energia oscura





L'energia e la materia oscura interagiscono?

Energia oscura come nuova particella
Mediatrice di una quinta forza cosmologica?

Conclusioni

- L'Universo è fatto da:
  - Materia ordinaria (modello standard, bosone di Higgs)
  - Materia oscura (supersimmetria)
  - Energia oscura (costante o dinamica? Interagisce con materia oscura?)

LHC cerca Higgs, particelle SUSY, materia oscura, origine della differenza tra materia e antimateria.

LHC, cosmologia, misure dirette e indirette danno informazioni complementari e sempre più stringenti sul contenuto e l'evoluzione dell'Universo, attraverso l'esplorazione di nuovi processi e particelle che cambieranno il nostro modo di capire l'energia e la materia.

Stiamo guardando al passato, presente e futuro; la nostra conoscenza dell'Universo va di pari passi con l'evoluzione tecnologica.

Per saperne di più

- http://www.scienceinschool.org/italian [articoli per l'educazione nelle scuole]
- http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/archivepix.html [immagini e spiegazioni]
- http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2009/ [ESO public outreach]
- http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=1 [ESA]
- http://www.particleadventure.org (LHC e cosmologia)
- http://universeadventure.org [Cosmologia in generale]
- http://www.scientificamerican.com/

Tutti gli articoli scientifici sono disponibili on-line gratis!
Circa 50 nuovi articoli al giorno solo in Cosmologia
Conferenze, journal clubs, teleconferenze per tenersi aggiornati

http://arxiv.org/

http://www.slac.stanford.edu/spires/hep/search/index.shtml