

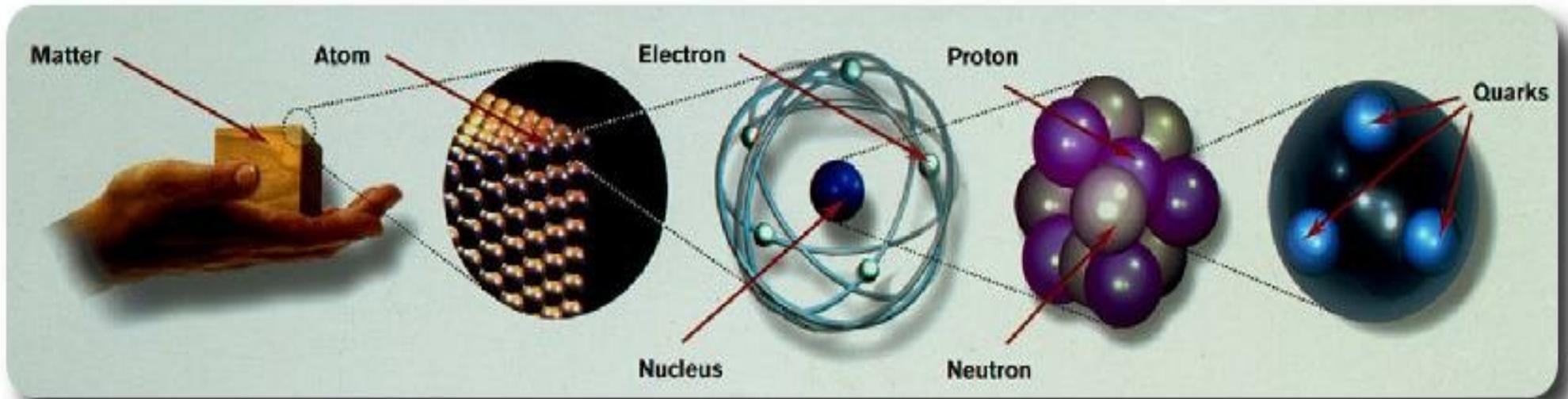
# Caccia alle particelle

Masterclass 2015

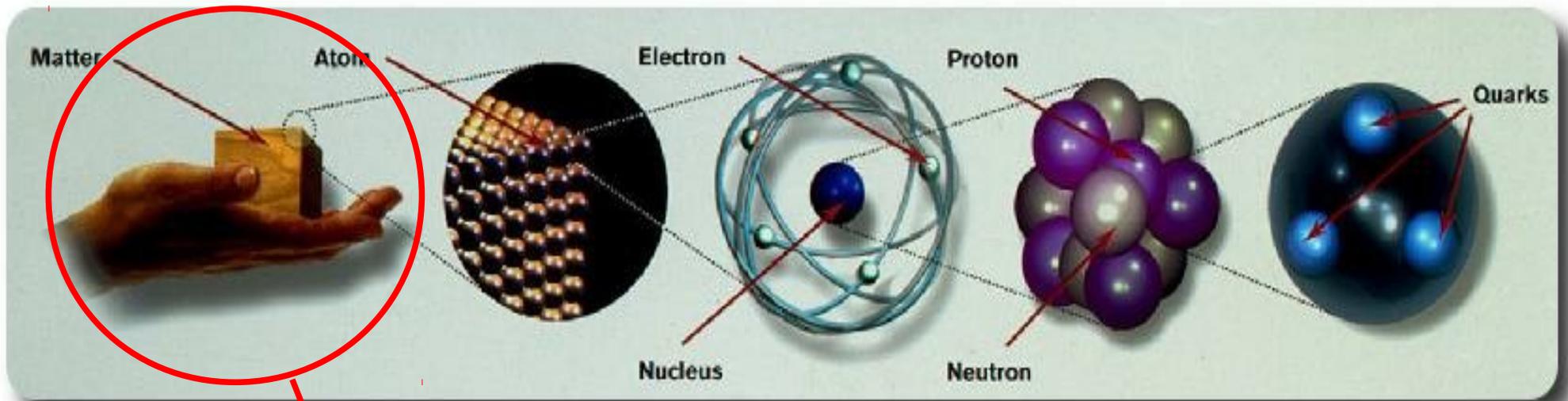
Gruppi ATLAS e CMS Pavia



# Il nostro mondo

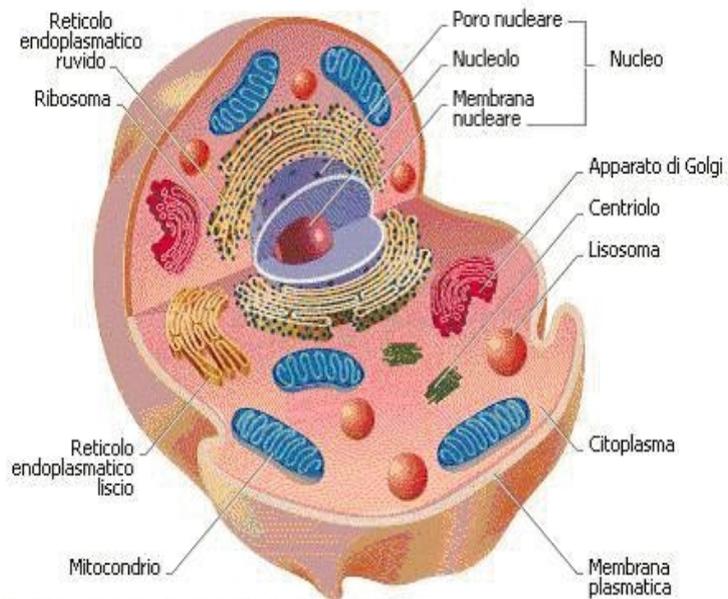
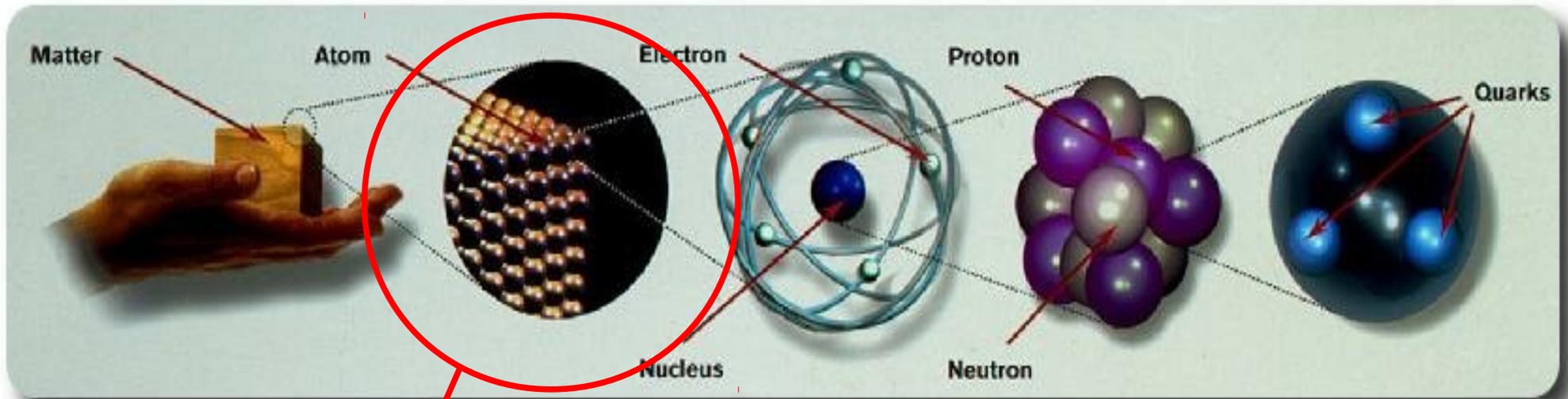


# Il nostro mondo



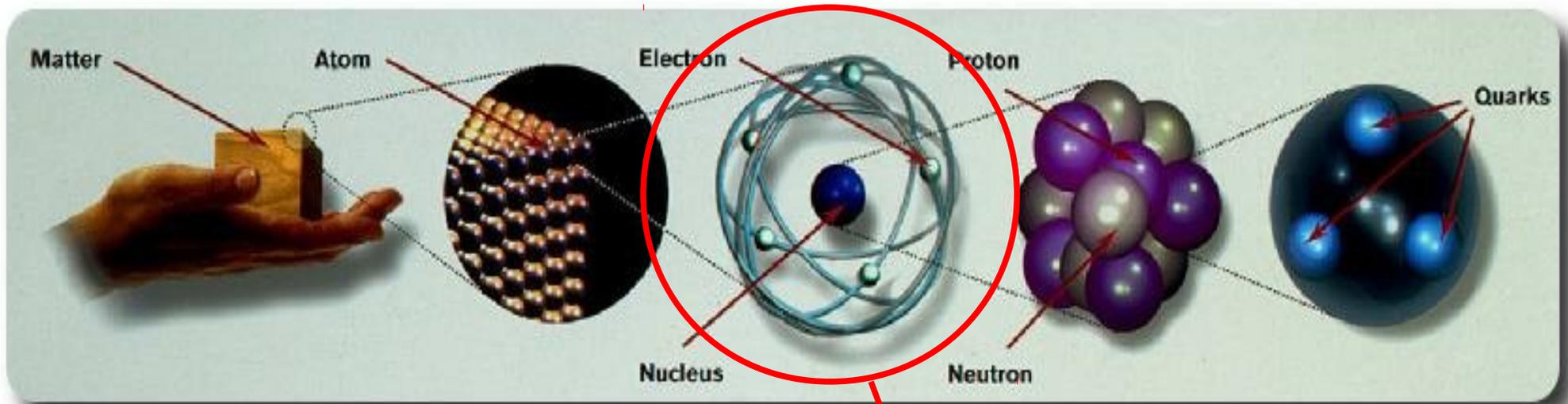
Quello che vediamo:  
metri, decimetri,  
centimetri...

# Il nostro mondo

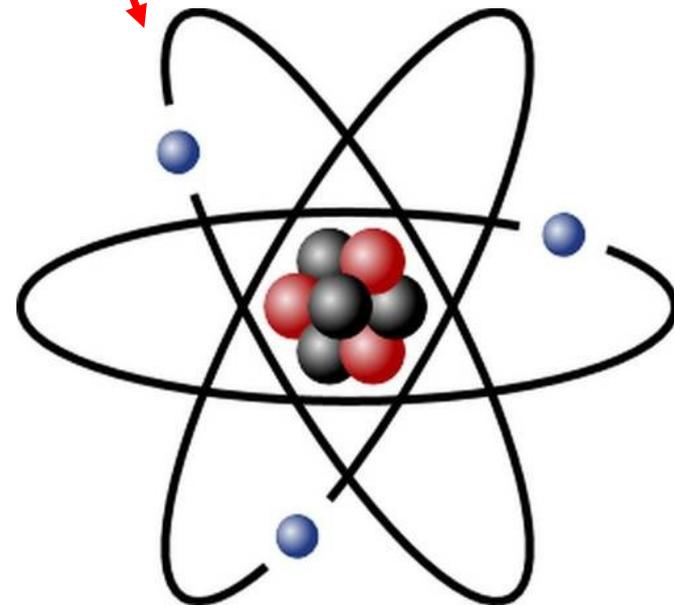


Un pò più nel piccolo:  
cellule... $10^{-6}$  metri

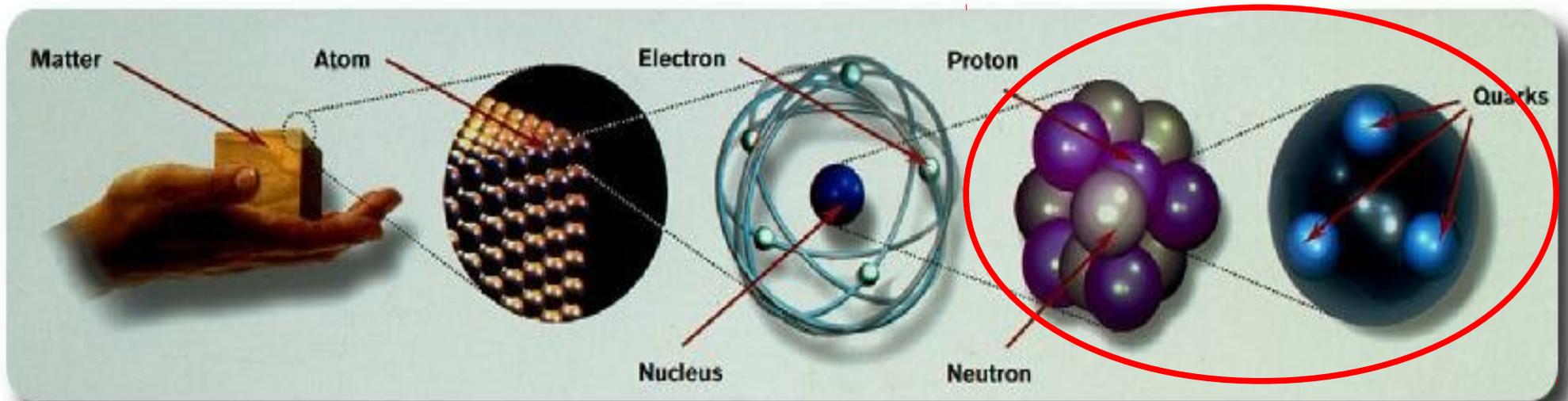
# Il nostro mondo



All'interno della materia:  
atomi... $10^{-10}$  metri



# Il nostro mondo

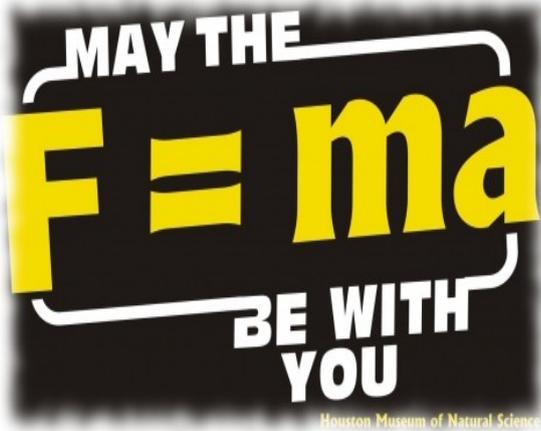


- L'atomo è fatto da elettroni, protoni e neutroni:  $10^{-15}$  metri
- Protoni e neutroni sono a loro volta formati da elementi fondamentali detti quark.

Per indagare le leggi che regolano il nostro mondo dobbiamo spingerci fino al livello dei quark (...e forse oltre!)

# Il mondo sub-atomico

## Forza



Il concetto di forza a cui siamo abituati è valido per oggetti con dimensioni macroscopiche. In realtà è un'approssimazione!



# Il mondo sub-atomico

Forza

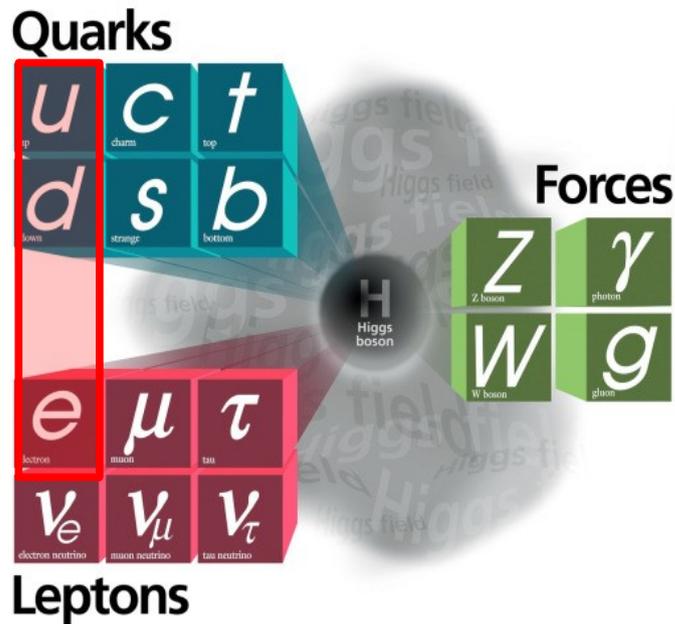


Interazione



- Nel mondo sub-atomico si parla di interazione: gli “oggetti” coinvolti si scambiano un “mediatore” dell'interazione.
- Gli “oggetti” protagonisti di questo mondo sono le particelle: protoni, neutroni, elettroni...e molti altri!

# Il mondo sub-atomico

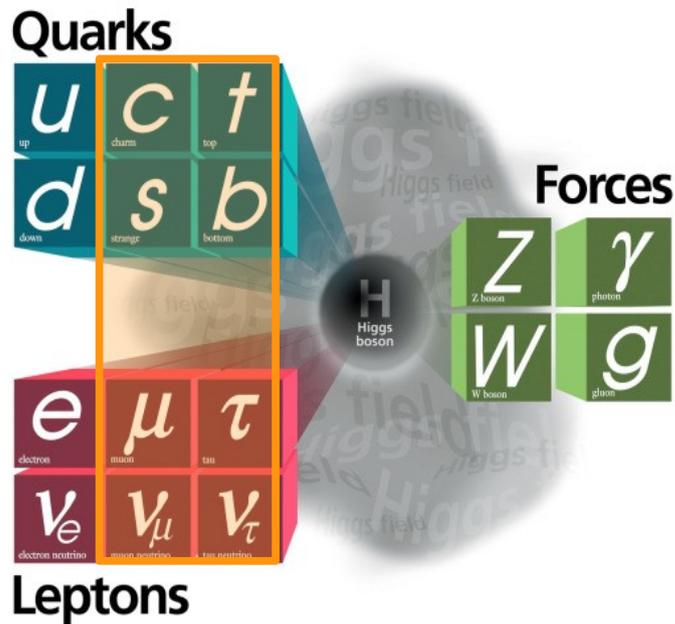


[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Standard\\_Model\\_From\\_Fermi\\_Lab.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Standard_Model_From_Fermi_Lab.jpg)

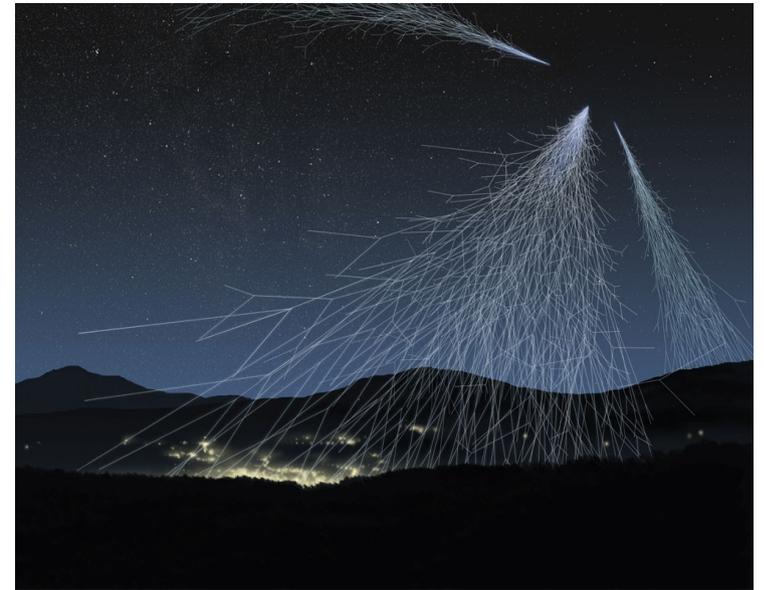


La materia che noi vediamo è fatta quark up, down ed elettroni.

# Il mondo sub-atomico



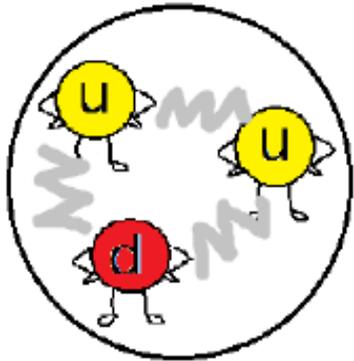
[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Standard\\_Model\\_From\\_Fermi\\_Lab.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Standard_Model_From_Fermi_Lab.jpg)



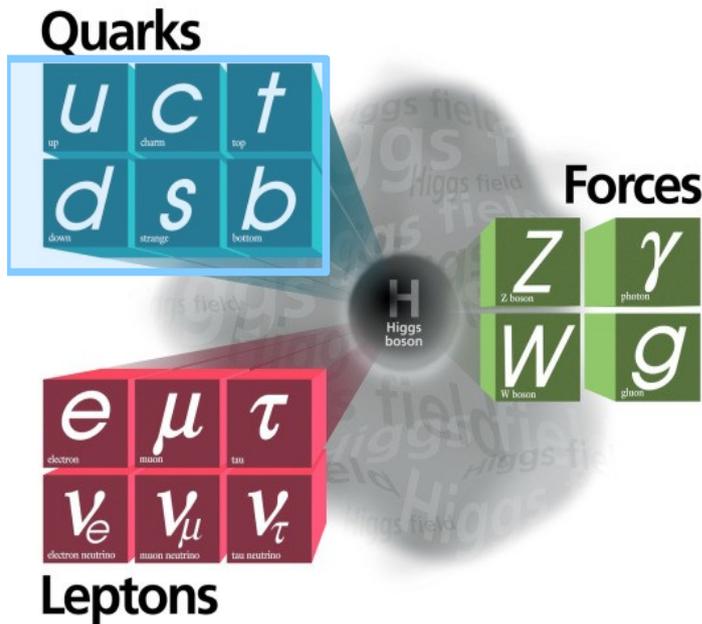
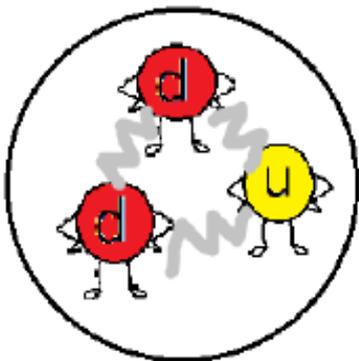
Esistono poi altri 4 quark e particelle parenti dell'elettrone, i leptoni (li possiamo trovare nei raggi cosmici che arrivano sulla terra o riprodurre in laboratorio).

# Il mondo sub-atomico

Protone



Neutrone



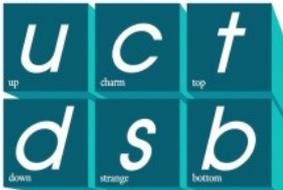
[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Standard\\_Model\\_From\\_Fermi\\_Lab.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Standard_Model_From_Fermi_Lab.jpg)

I quark possono unirsi tra loro per formare particelle più grandi e complesse come protoni e neutroni.

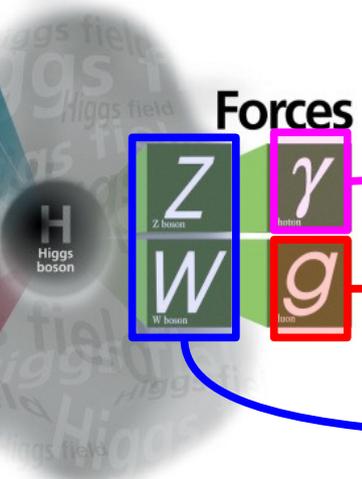
Conosciamo un sacco di altre “unioni” tra quark!

# Il mondo sub-atomico

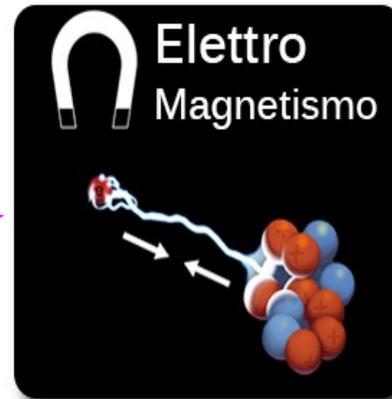
## Quarks



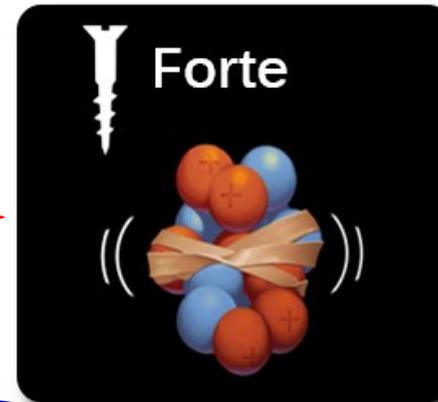
## Leptons



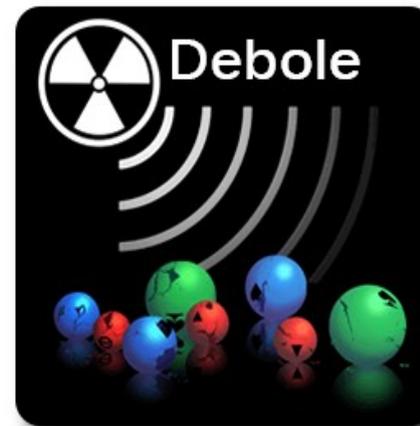
## Forces



Il fotone è il mediatore dell'interazione elettromagnetica!



L'interazione nucleare forte è mediata dai gluoni (che sono 8).  
**Tiene i quark legati tra loro!**



L'interazione nucleare debole è mediata dai bosoni  $W^+$ ,  $W^-$  (con carica elettrica + e -) e Z (elettricamente neutro).  
**E' responsabile del decadimento nucleare!**

Le interazioni tra le particelle sono mediate dai “bosoni vettori”. Ogni interazione ne ha uno (o più) dedicati.

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Standard\\_Model\\_From\\_Fermi\\_Lab.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Standard_Model_From_Fermi_Lab.jpg)

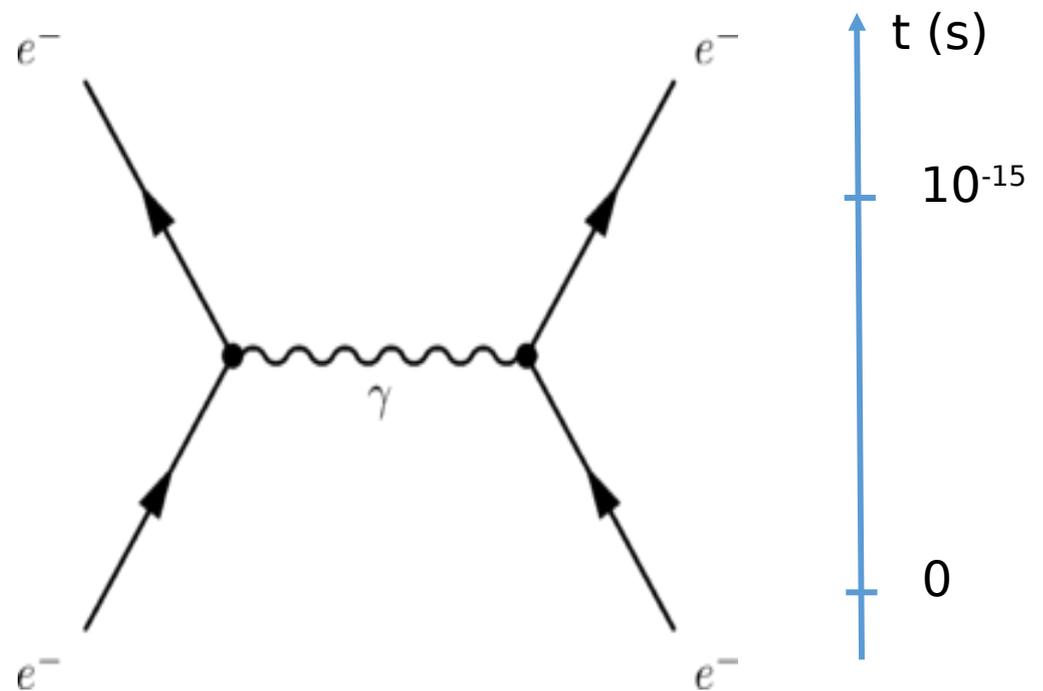
# I diagrammi di Feynman

Un modo grafico per rappresentare le interazioni tra le particelle è utilizzare i diagrammi di Feynman.

Interazione  
elettromagnetica  
tra due elettroni:  
scambio di un  
fotone.

Le interazioni fondamentali  
conservano:

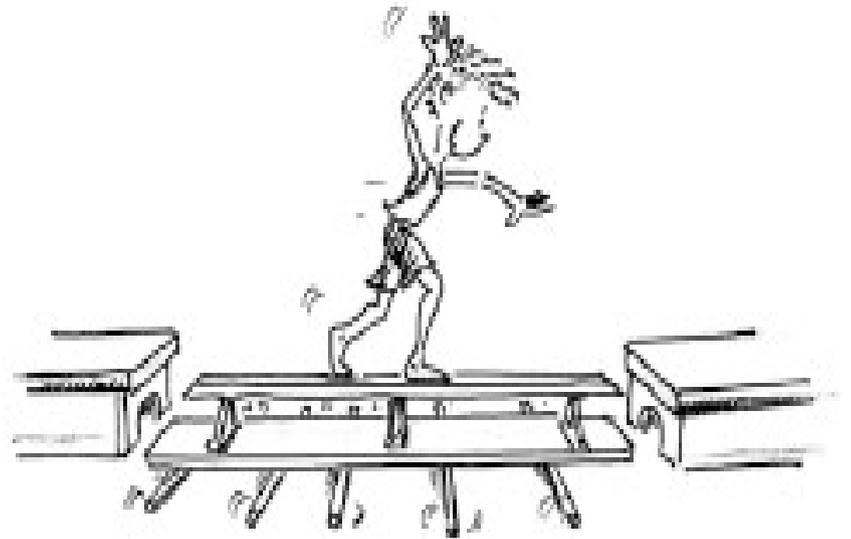
- Carica elettrica
- Energia
- Impulso



# Dove sono tutte le particelle?

La maggior parte delle particelle non è stabile e dopo un certo tempo decade (in altre particelle)... per questo non riusciamo a vederle in natura!

- Protone ed elettrone **sono stabili**
- Z e W non lo sono, **decadono** per esempio in leptoni come l'elettrone
- Gli altri “composti” di quark come la J/Psi (quark c e anti-c) **non sono stabili!**



Quando una particella decade si conservano energia, impulso e carica. Misurando energia e impulso dei prodotti di decadimento si può risalire alla massa della particella iniziale.

$$M^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2$$

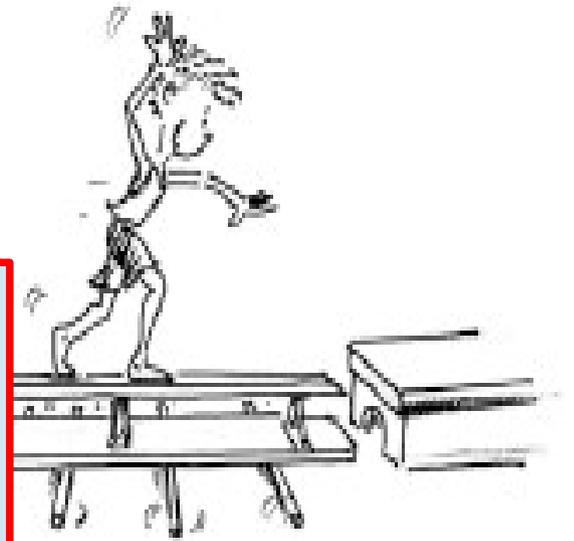
MASSA  
INVARIANTE

# Dove sono tutte le particelle?

La maggior parte delle particelle non è stabile e dopo un certo tempo decade (in altre particelle)... per questo non riusciamo a vederle in natura!

Userò come sinonimi  
quantità di moto, impulso  
e momento di una forza.

- Protone ed
- Z e W non  
esempio in
- Gli altri "c"  
J/Psi (quark c e anti-c) **non sono stabili!**

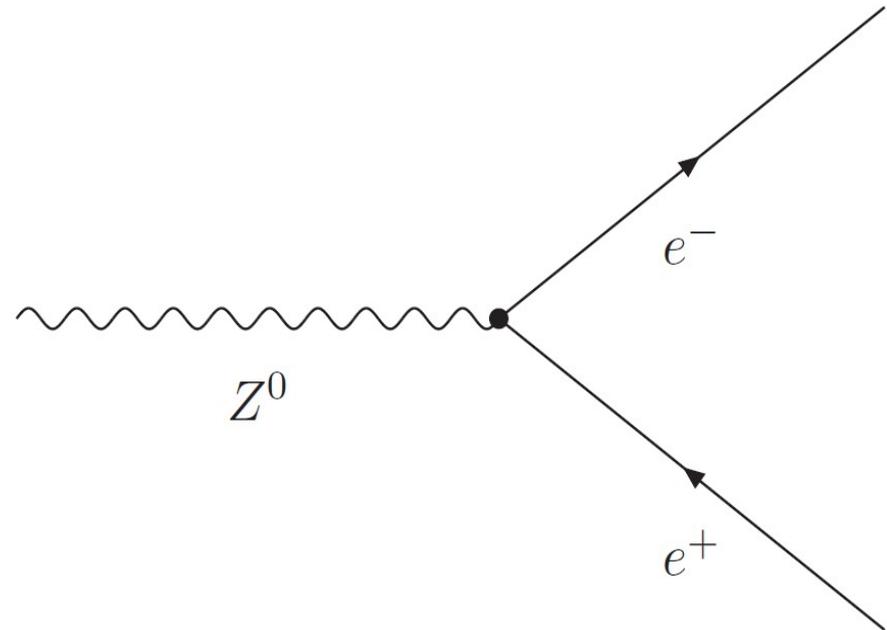


Quando una particella decade si conservano energia, impulso e carica. Misurando energia e impulso dei prodotti di decadimento si può risalire alla massa della particella iniziale.

$$M^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2$$

MASSA  
INVARIANTE

# Un esempio: decadimento dello Z



Il bosone Z può decadere in:

- Elettrone e la sua anti-particella, il positrone (vedi figura)
- Muone e anti-muone
- In neutrino e anti-neutrino
- In quark e anti-quark

# Il mondo sub-atomico: l'anti-materia

*L'anti-materia è fatta da anti-particelle*

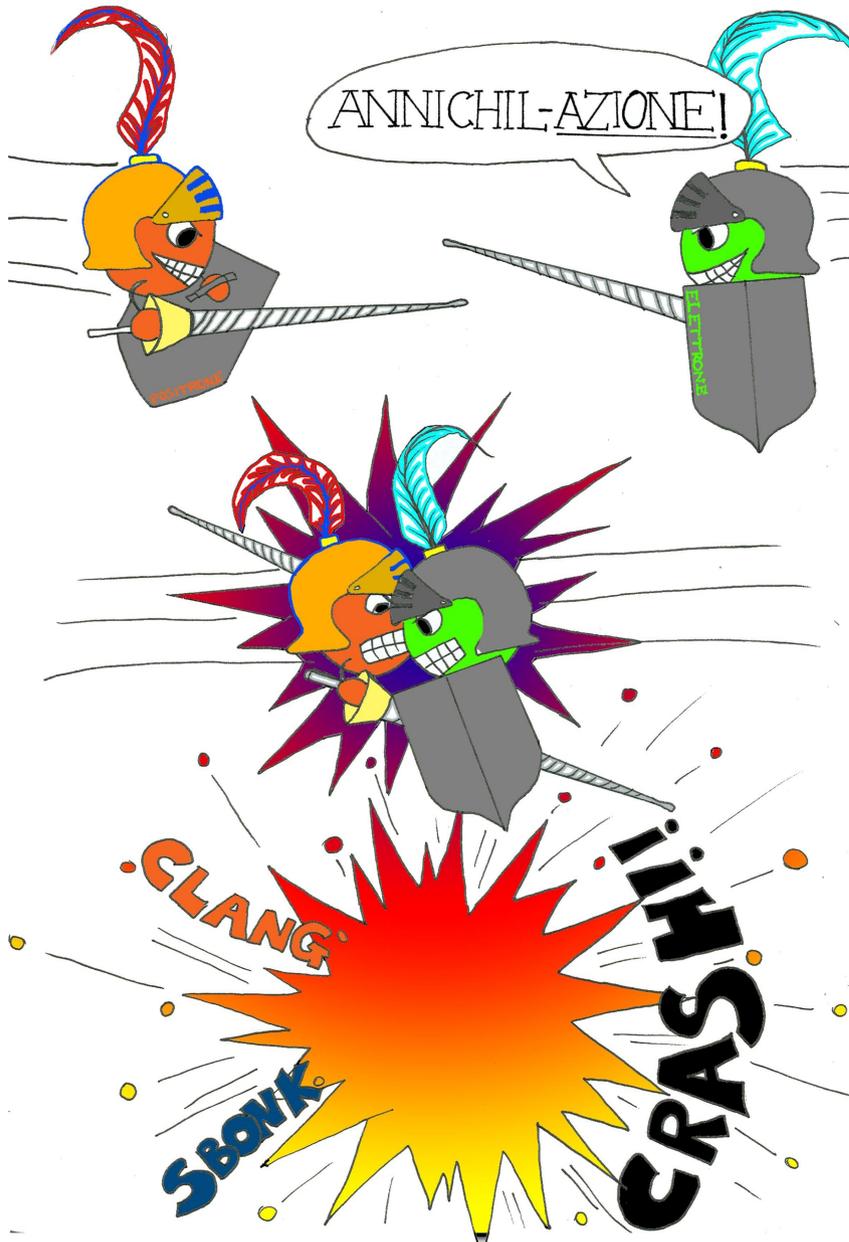


Quarks		Anti-quarks	
$u$ up	$d$ down	$\bar{u}$	$\bar{d}$
$t$ top	$b$ bottom	$\bar{t}$	$\bar{b}$
$s$ strange	$c$ charm	$\bar{s}$	$\bar{c}$
Leptons		Anti-leptons	
$e$ electron	$\nu_e$ electron neutrino	$e^+$	$\bar{\nu}_e$
$\mu$ muon	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\bar{\mu}$	$\bar{\nu}_\mu$
$\tau$ tau	$\nu_\tau$ tau neutrino	$\bar{\tau}$	$\bar{\nu}_\tau$

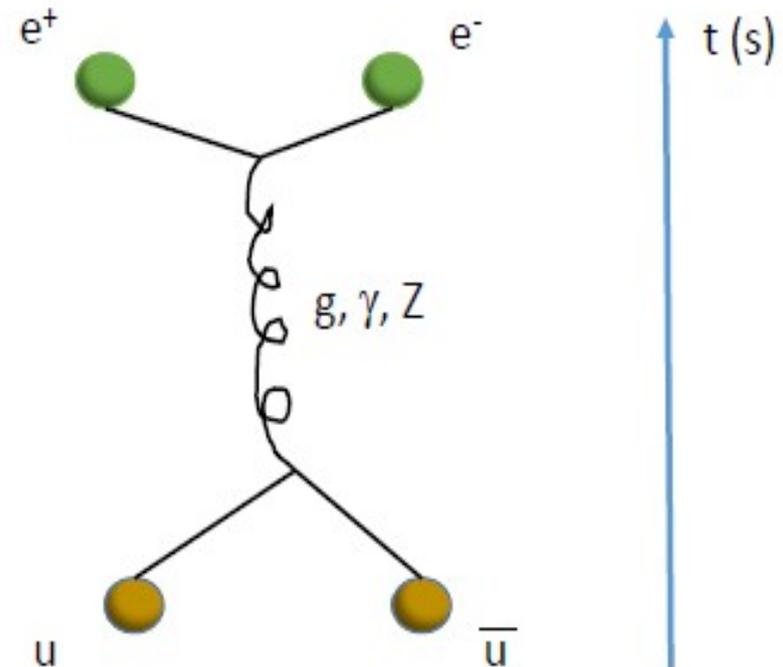
- Ogni particella che conosciamo ha una “anti-particella” corrispondente.
- L'anti-particella ha la stessa massa ma carica opposta rispetto alla particella.

*L'anti-materia è una vecchia conoscenza: ipotizzata nel 1928 da Dirac venne trovata nel 1932.*

# Il mondo sub-atomico: l'anti-materia



- Se una particella e la sua anti-particella si incontrano si **annichilano**.
- Il prodotto dell'annichilazione sono altre particelle a carica neutra, quindi fotoni, gluoni o il bosone Z.



# Il mondo sub-atomico: l'anti-materia



L'anti-materia esiste davvero, viene prodotta regolarmente ed ha diverse applicazioni pratiche!

- La tomografia a emissione di positroni (o PET, dall'inglese Positron Emission Tomography) è una tecnica di diagnostica medica utilizzata per la produzione di immagini del corpo.
- Sfrutta l'annichilazione di elettroni e le loro antiparticelle (i positroni) in fotoni.

# La fisica delle particelle: il Modello Standard

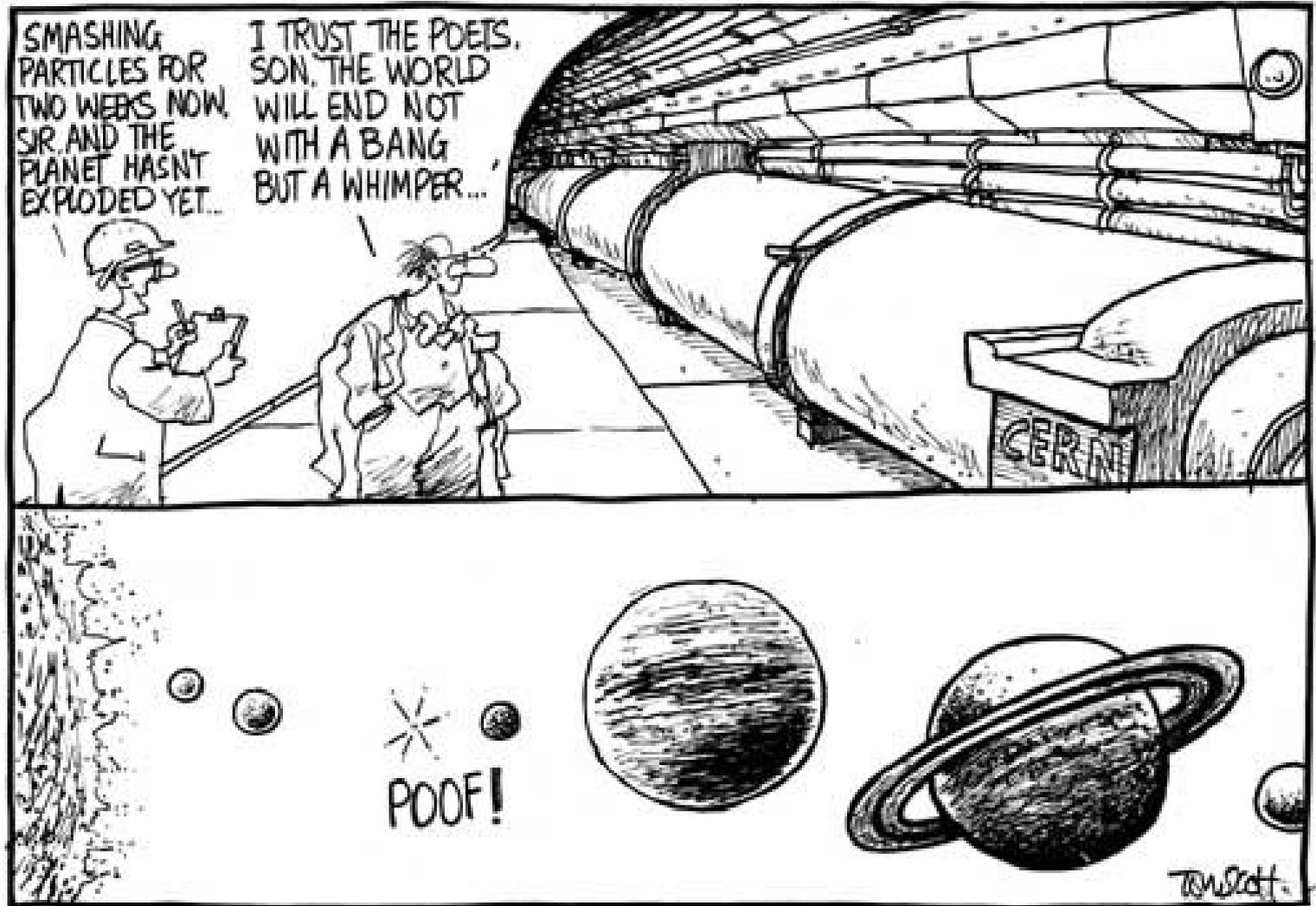
Tre generazioni  
della materia (fermioni)

	I	II	III	
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
carica →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nome →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> fotone
Quark	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluone
Leptoni	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico	<b><math>Z^0</math></b> forza debole
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> elettrone	<b><math>\mu</math></b> muone	<b><math>\tau</math></b> tauone	<b><math>W^\pm</math></b> forza debole

Bosoni di gauge

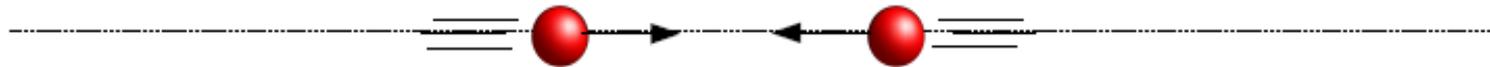
- Il modo in cui le particelle interagiscono, il loro numero e le loro caratteristiche sono descritte da un modello teorico chiamato **Modello Standard**
- Questo modello è stato in grado di **prevedere** negli anni l'esistenza di nuove particelle fondamentali (che sono state poi trovate)
- Il Modello Standard funziona molto bene, però non descrive alcuni fenomeni (a cui accenneremo più avanti)...bisogna capire se c'è altra fisica oltre il Modello Standard!

# I “collider”



# I “collider”

Per studiare le interazioni tra le particelle e per cercarne di nuove si fanno collidere “pacchetti” di particelle accelerate ad altissima energia.



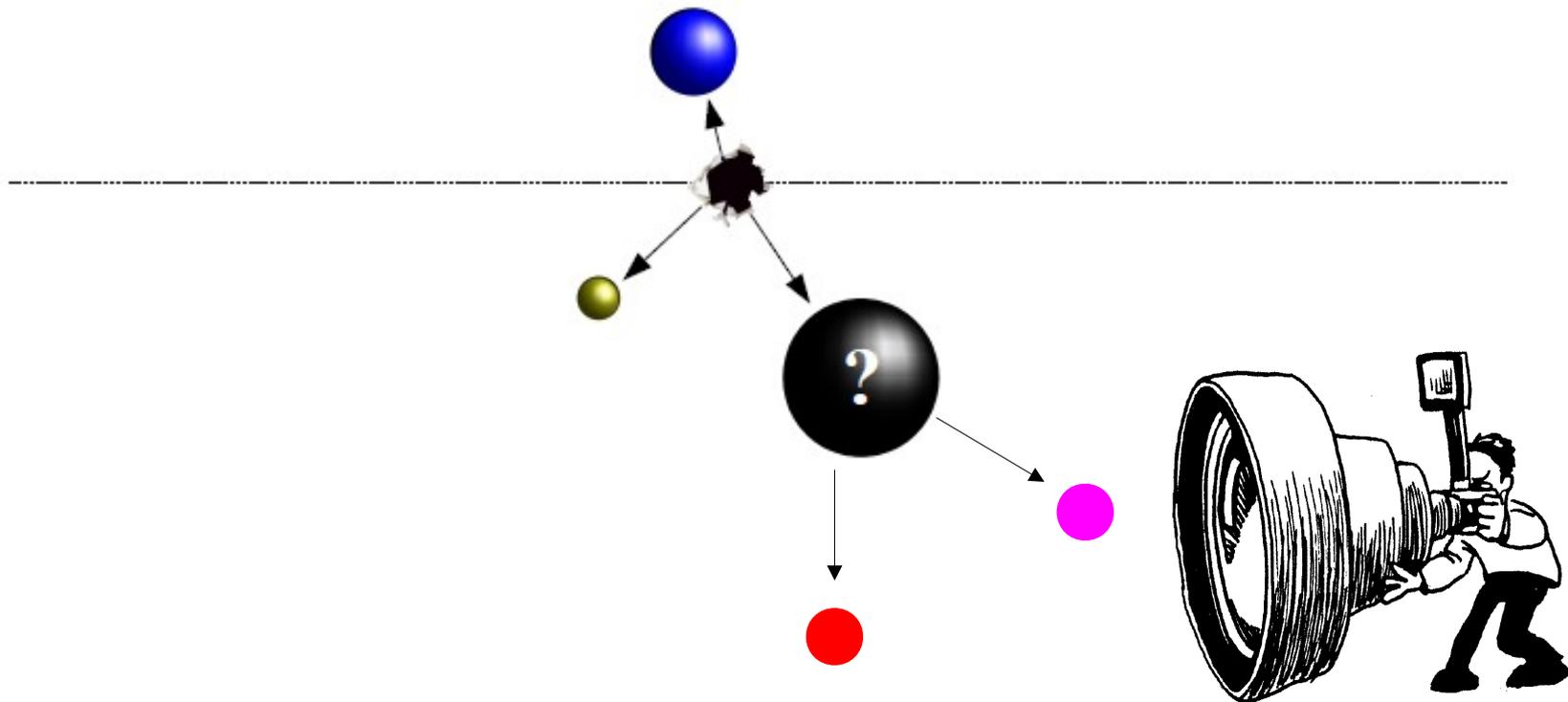
# I “collider”

L'energia che avevano inizialmente le particelle viene “convertita” e sfruttata per produrre nuove particelle.



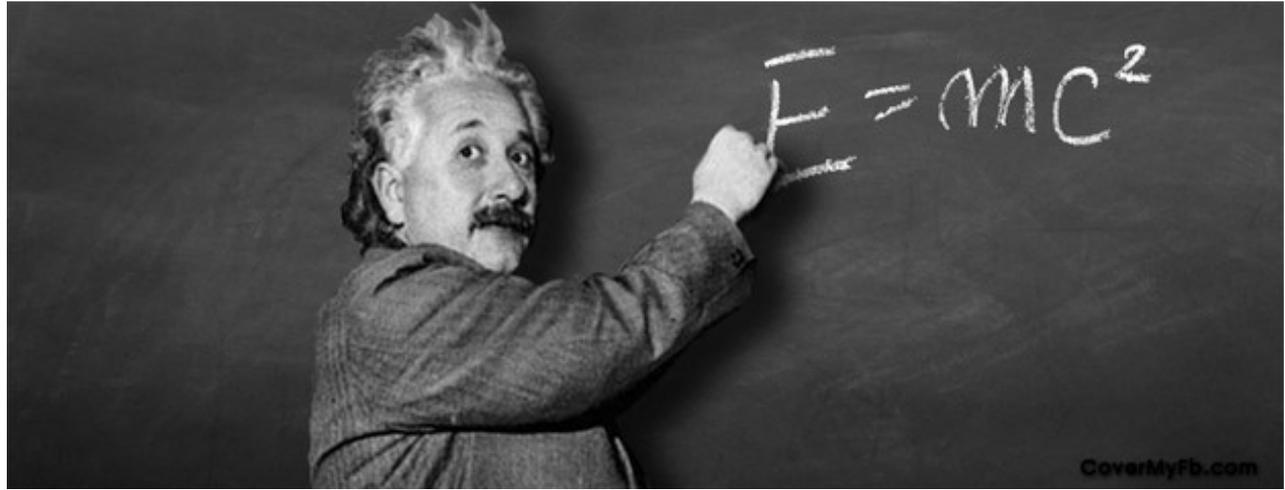
# I “collider”

Le nuove particelle prodotte però non saranno stabili e si trasformeranno (“decadranno”) in altre particelle, con massa minore, più stabili ed “osservabili”.



# I “collider”

- ✓ Più le particelle sono accelerate, più energia avranno.
- ✓ Sarà così possibile produrre nuove particelle più massive “convertendo” energia in massa.



L'unità di misura più utilizzata quando si parla di energia (o massa) delle particelle è l'elettronvolt (eV).

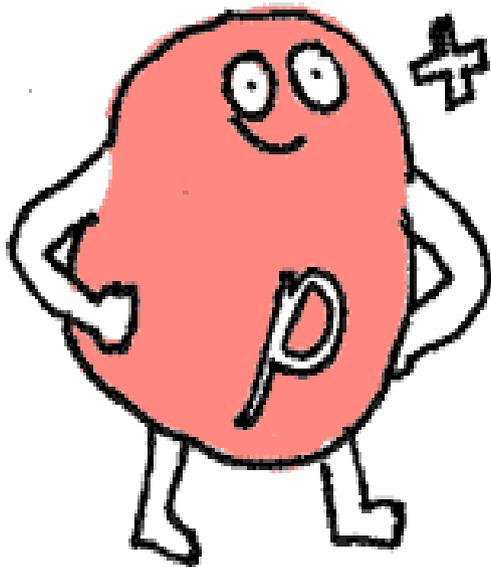
Viene definito come l'energia acquisita da un elettrone che passa nel vuoto da un punto ad un altro che abbia un potenziale superiore di 1 volt.

$$1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

# Massa ed energia delle particelle

La massa delle particelle si misura di solito in multipli dell'eV.

- $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$
- $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$
- $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$



Il protone ha massa pari a 938 MeV.



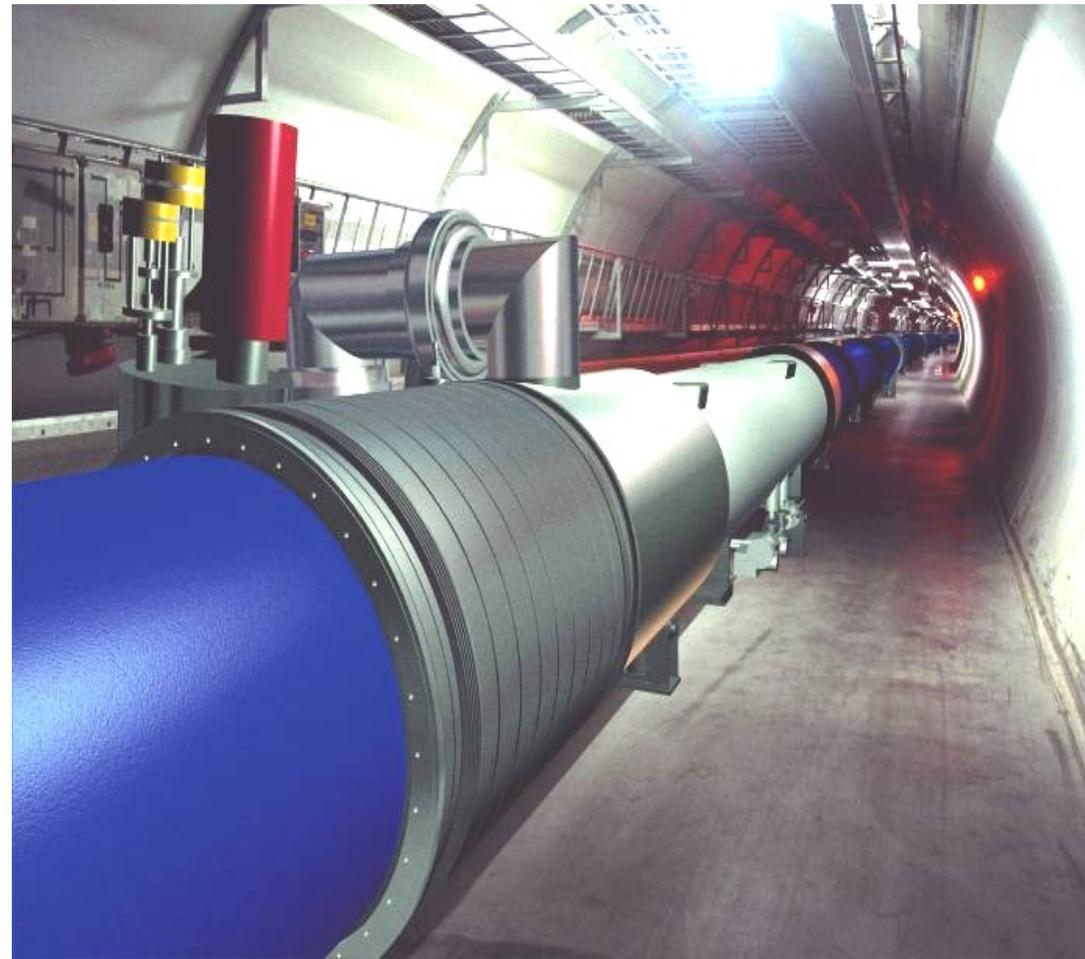
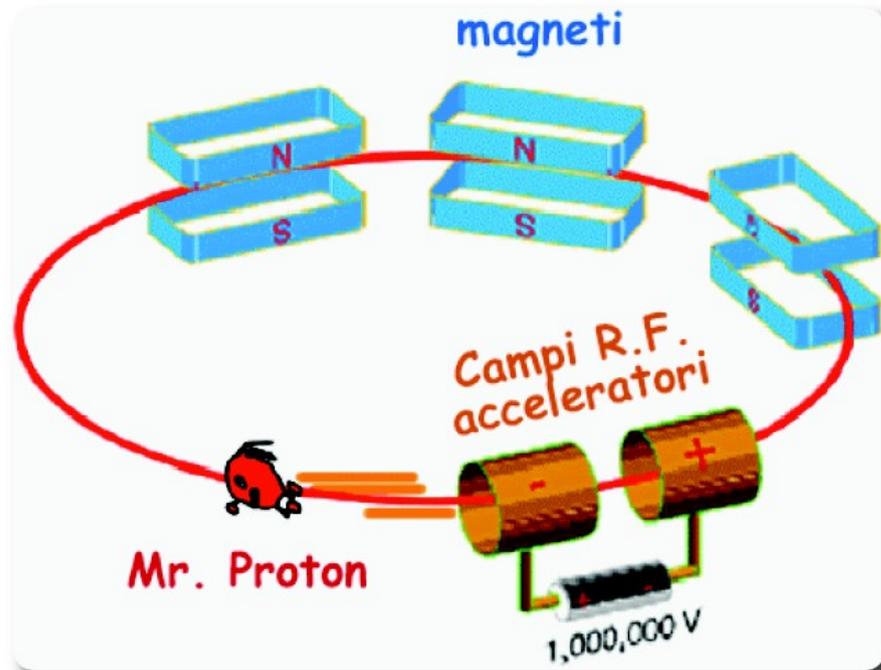
L'elettrone ha massa pari a soltanto 0.5 MeV.

THE  
LARGE  
HADRON  
COLLIDER

# LHC: l'acceleratore più potente mai costruito

LHC accelera e fa collidere fasci di protoni ad energie fino a 7 TeV.

E' situato in un tunnel lungo 27 Km al confine tra Svizzera e Francia, vicino Ginevra.

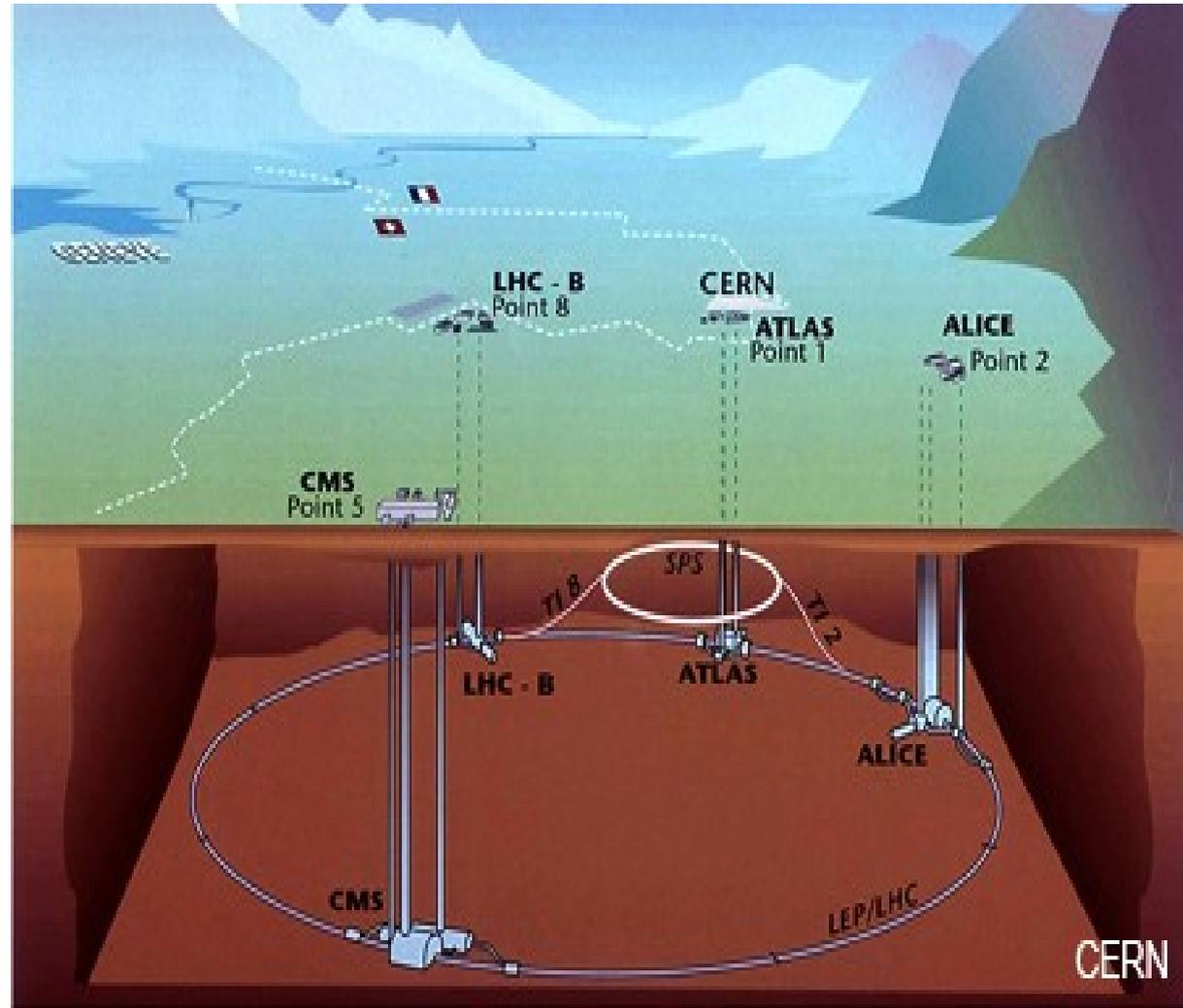


# LHC: l'acceleratore più potente mai costruito

4 esperimenti principali in cui vengono fatti collidere i fasci di protoni:

- ALICE
- ATLAS
- CMS
- LHC-B

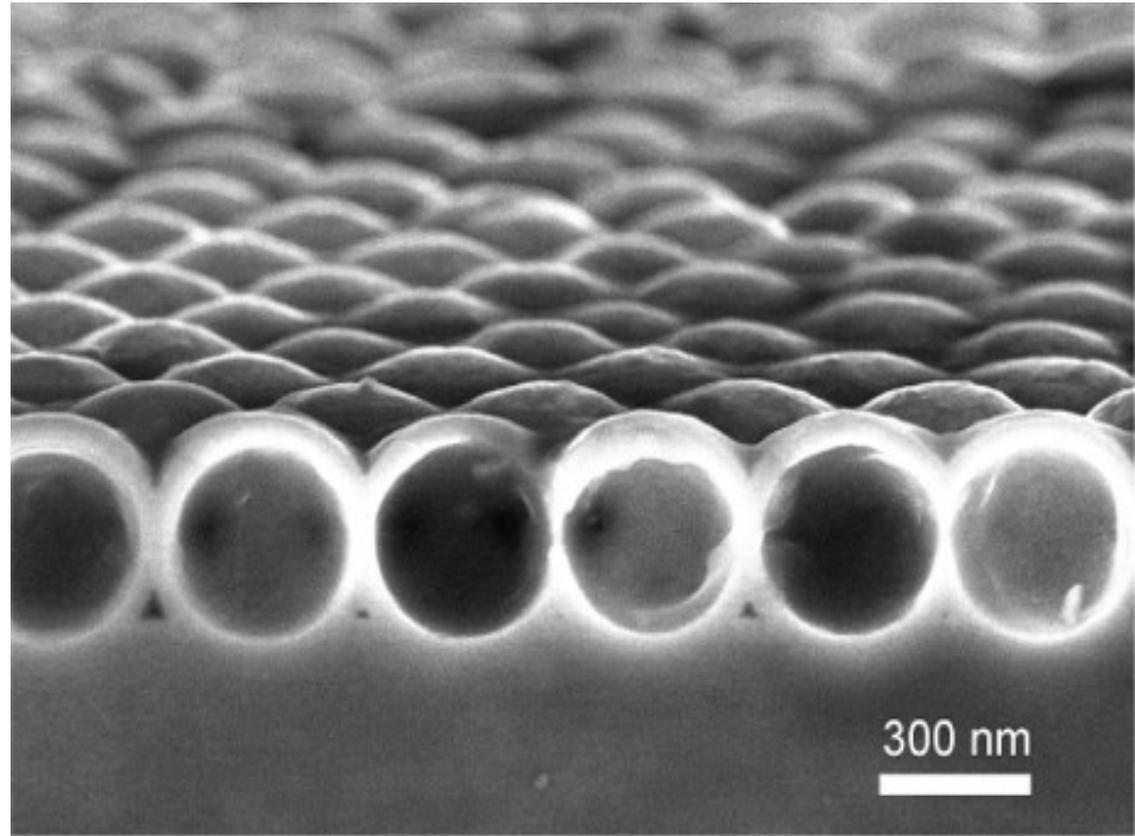
Ogni esperimento rivela le particelle prodotte dalle collisioni dei protoni...sono una specie di grande “macchina fotografica” per particelle!



# Vedere le particelle elementari

I microscopi più potenti possono risolvere lunghezze intorno a  **$10^{-9}$  m (= 1 nm)** ... vedono gli atomi!

Il raggio del protone è **1 MILIONE di volte più piccolo** di questo valore. E le particelle che lo compongono (i quark) sono addirittura considerate puntiformi!

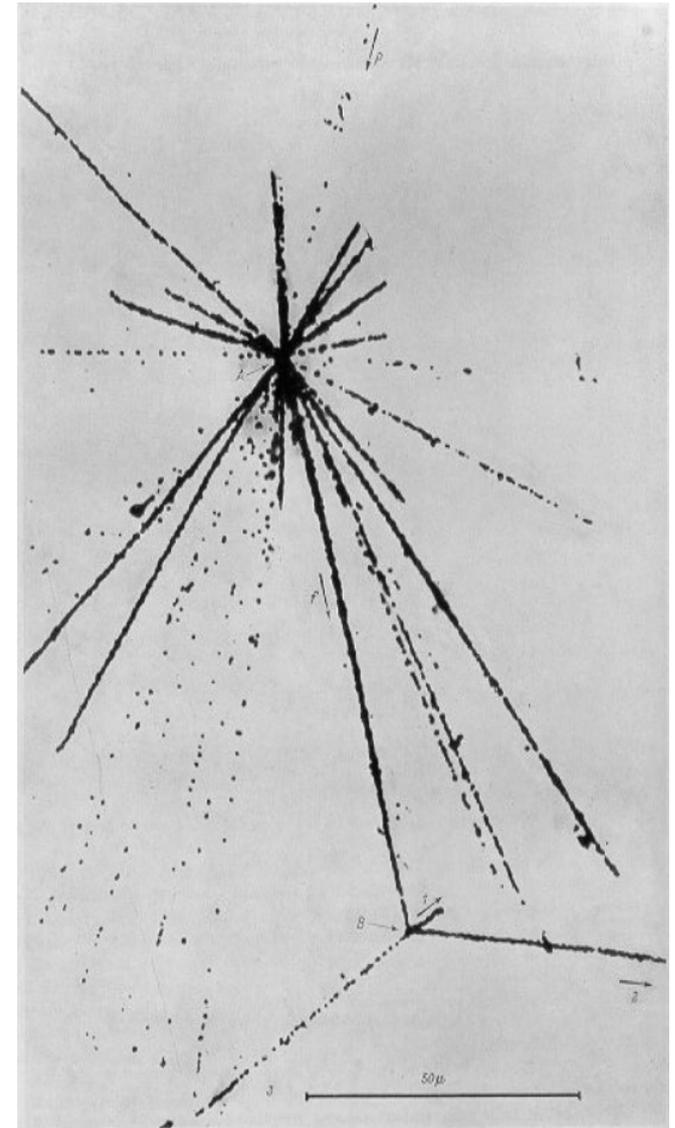


Atomi di silicio!!



# Seguire le tracce

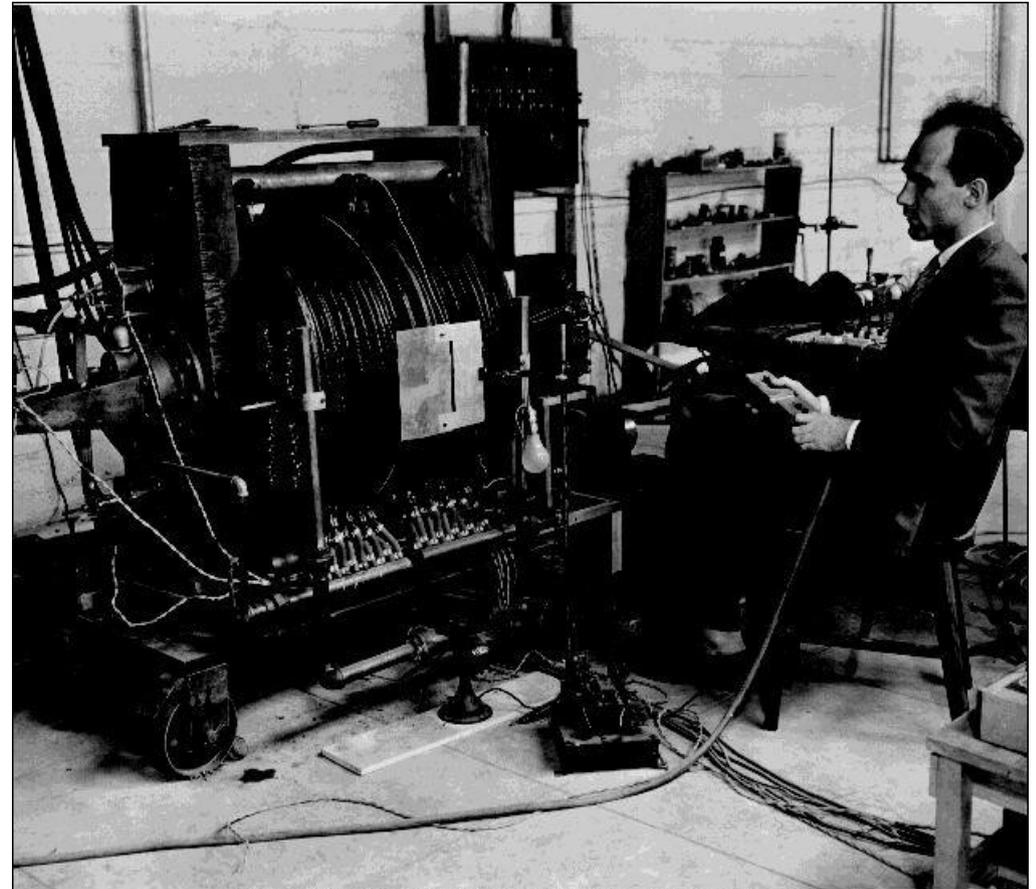
Le particelle, collidendo con gli atomi del mezzo che attraversano, lo perturbano. Se il mezzo ha caratteristiche opportune, possiamo vedere le scie lasciate dalle particelle.



Interazione di un raggio  
cosmico nell'atmosfera  
registrato con una  
**lastra fotografica**

# Scoperta del positrone

Nel 1932 Anderson studiava i raggi cosmici con una camera a nebbia, contenente vapore sovrassaturo. Il passaggio di una particella faceva apparire goccioline di condensa.

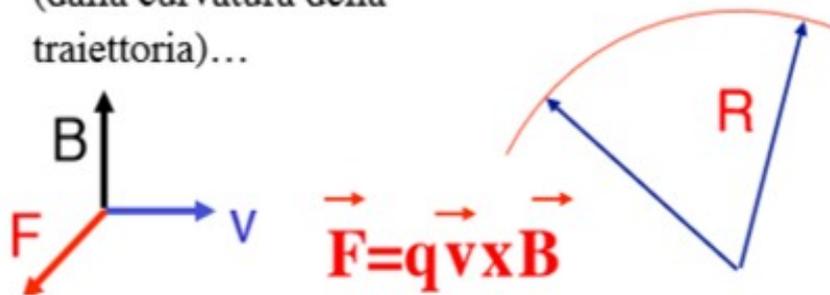


© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.  
Commercial use or modification of this material is prohibited.

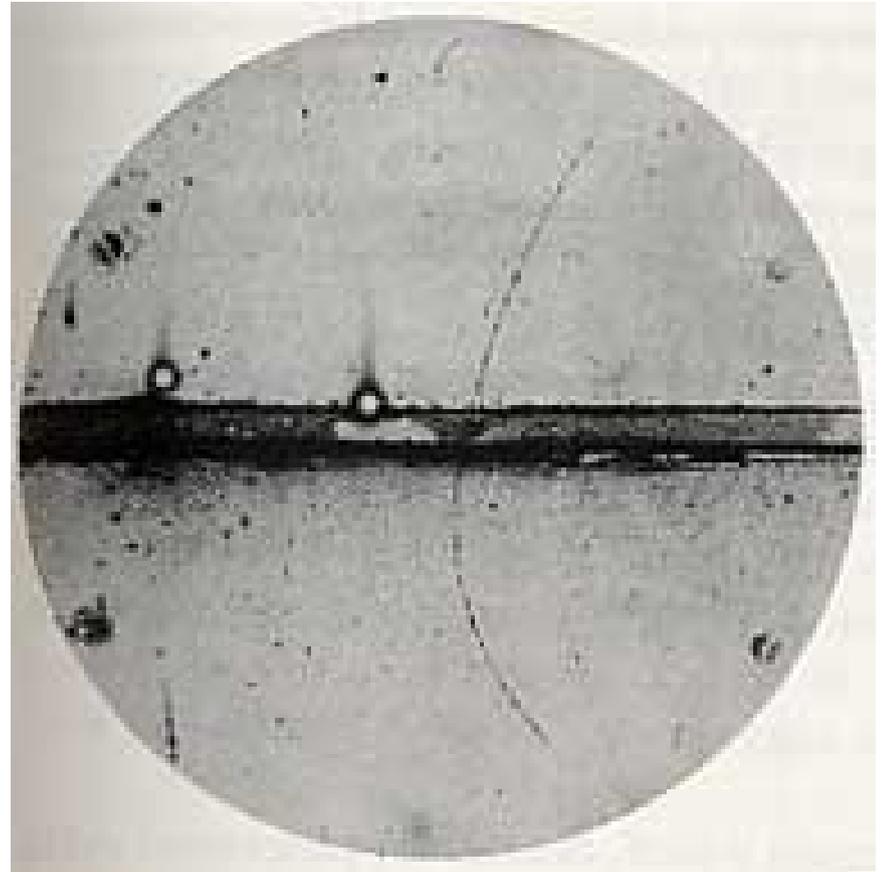
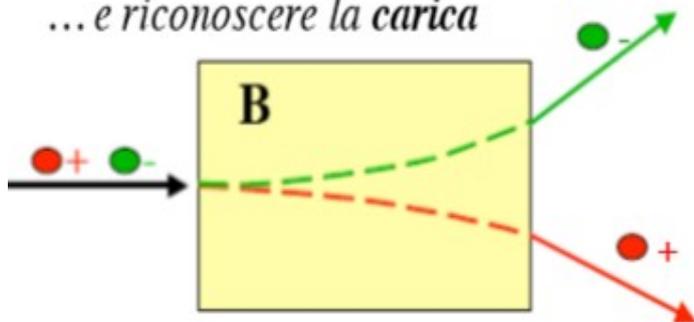
# Scoperta del positrone

...vedeva  
pressappoco questo →

*Campo magnetico per misurare l'impulso*  
(dalla curvatura della  
traiettoria)...



*...e riconoscere la carica*

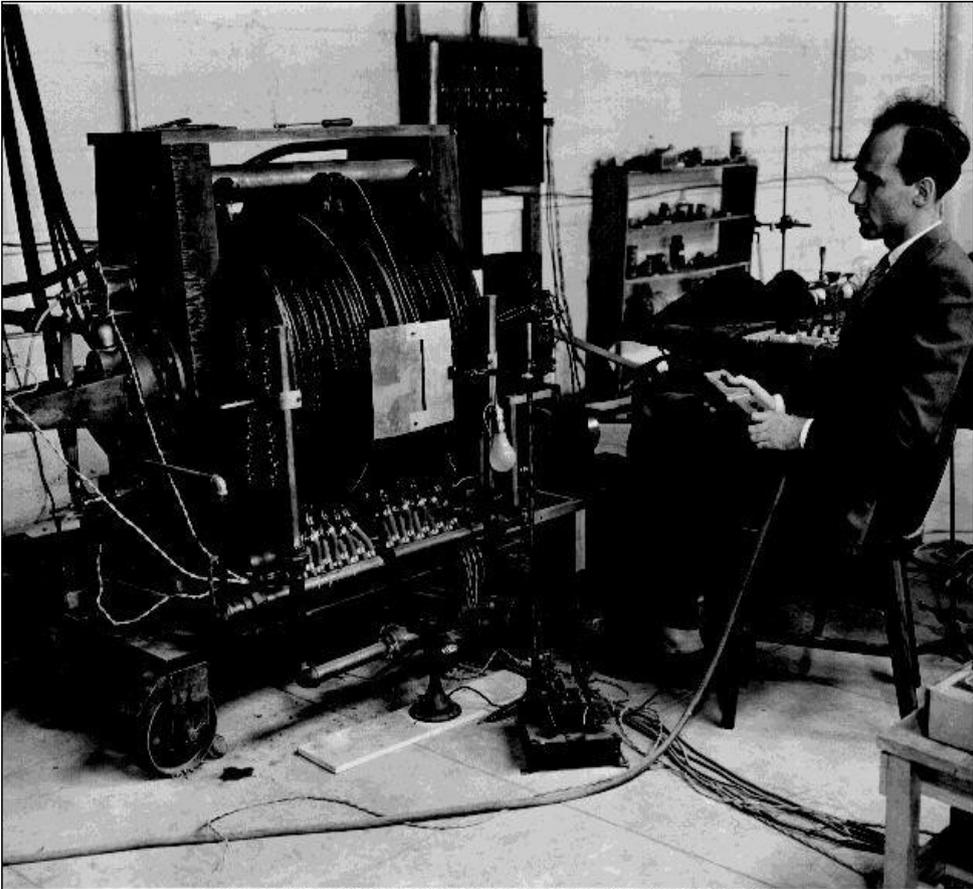


# In meno di un secolo...

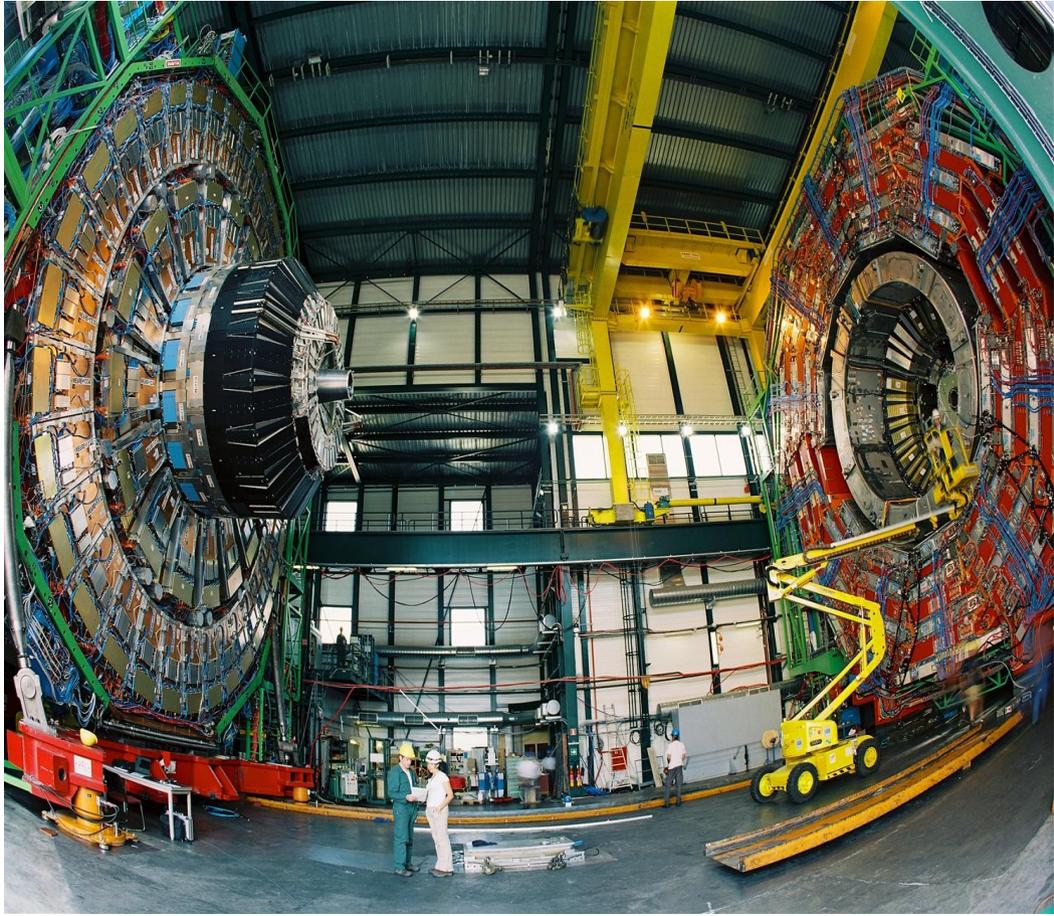
1932

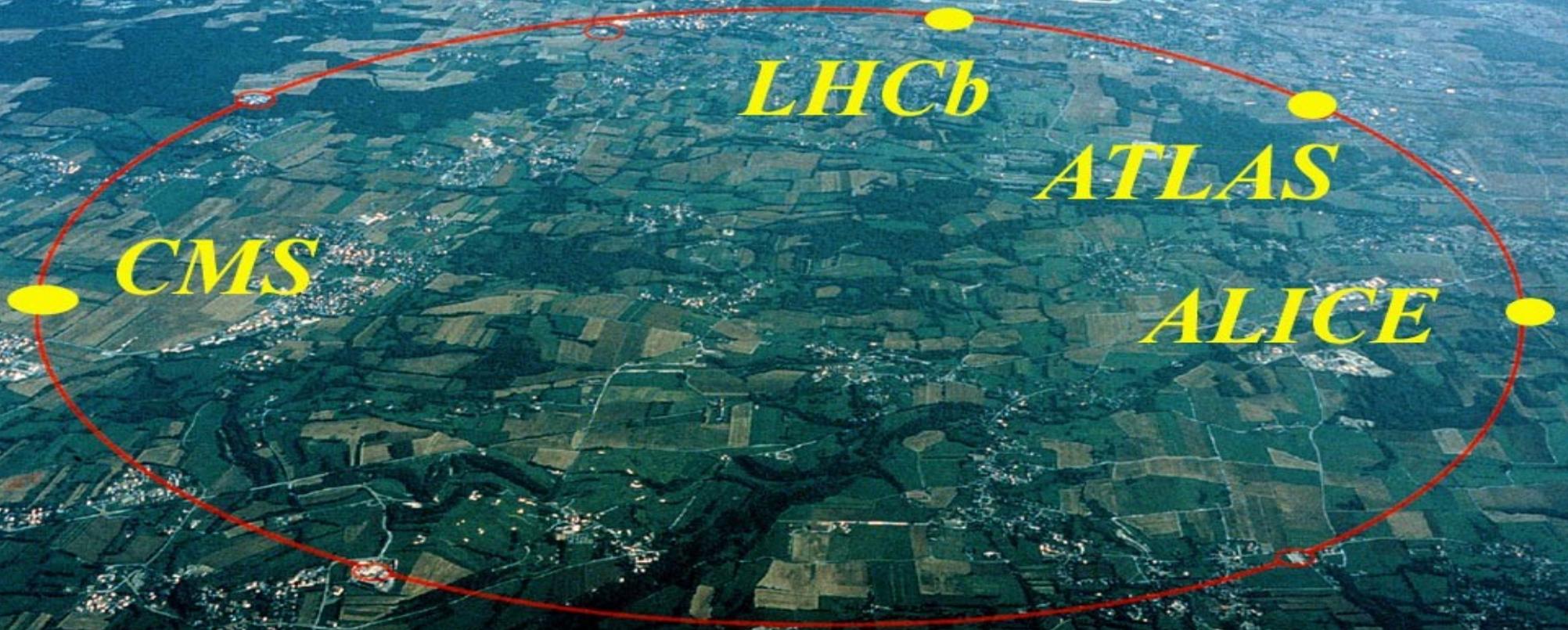


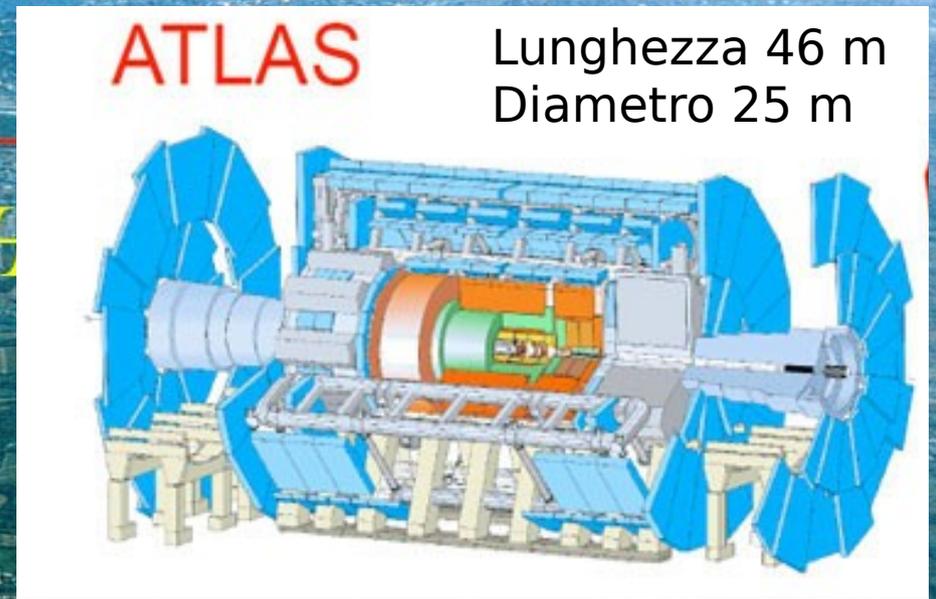
oggi



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.  
Commercial use or modification of this material is prohibited.





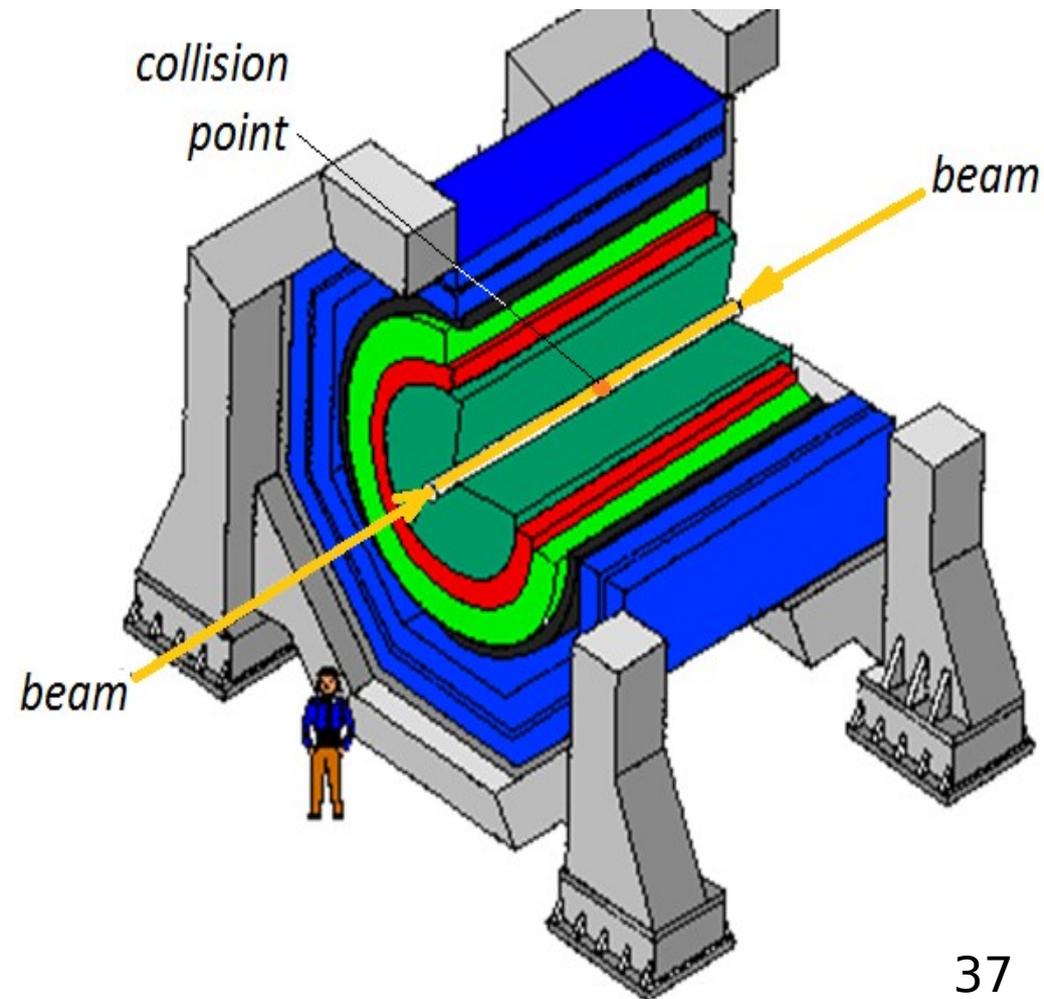


*LE*

# Cos'è cambiato?

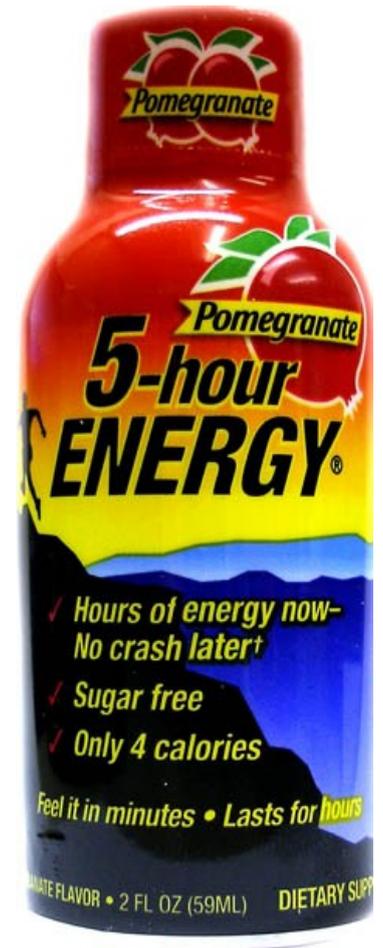
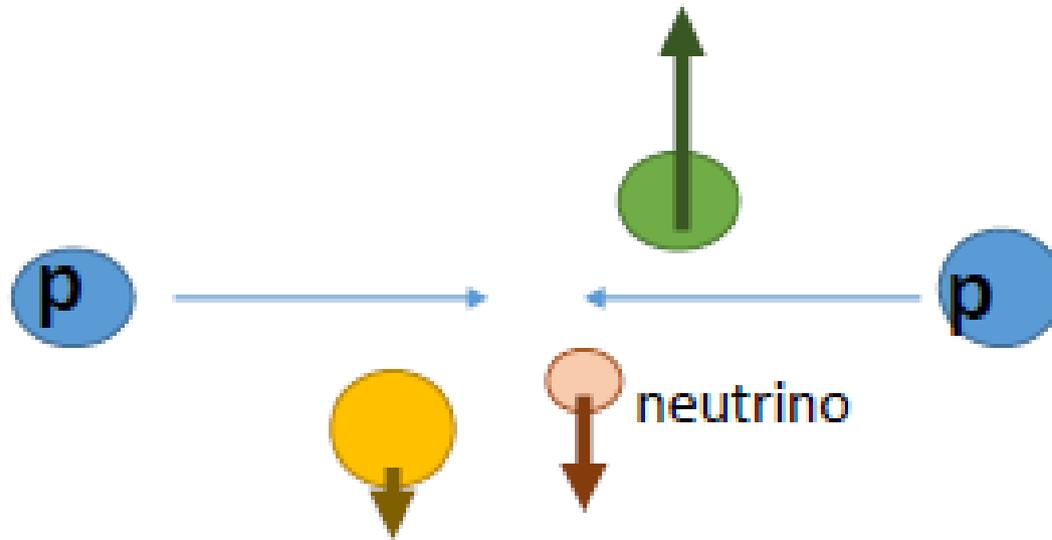
## Non più un solo rivelatore!

- **Tracciatore**
- Calorimetri **elettromagnetico** ed **adronico**: misura dell'energia
- **Magnete**
- **Rivelatore a muoni**



# Missing Energy

Il complesso sistema di rivelatori ci permette di ricostruire traiettoria, energia ed impulso delle particelle.



Se lo facciamo per tutte, alla fine il bilancio energetico deve tornare. Se non torna, qualcuna ci è sfuggita! (per esempio il neutrino)

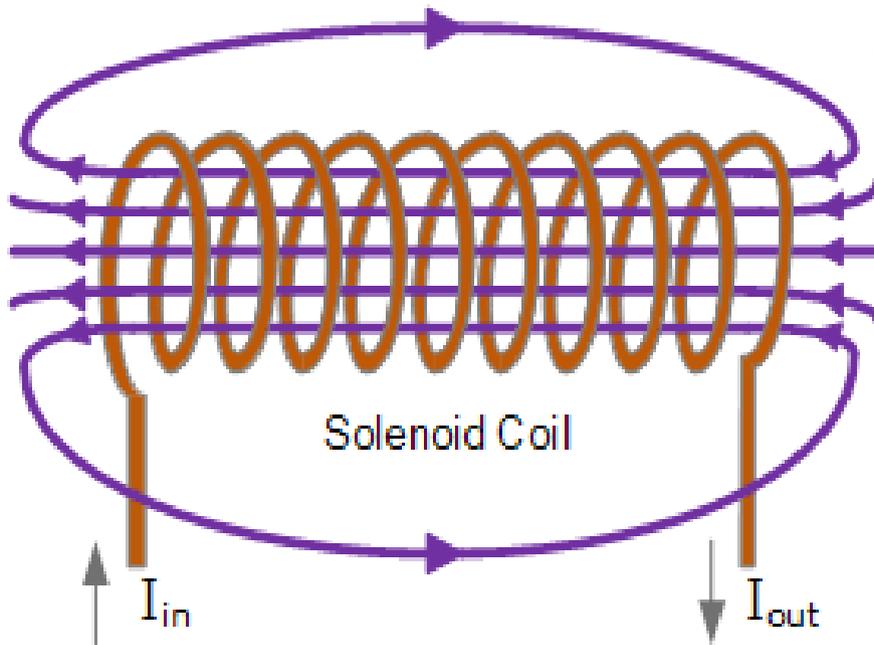
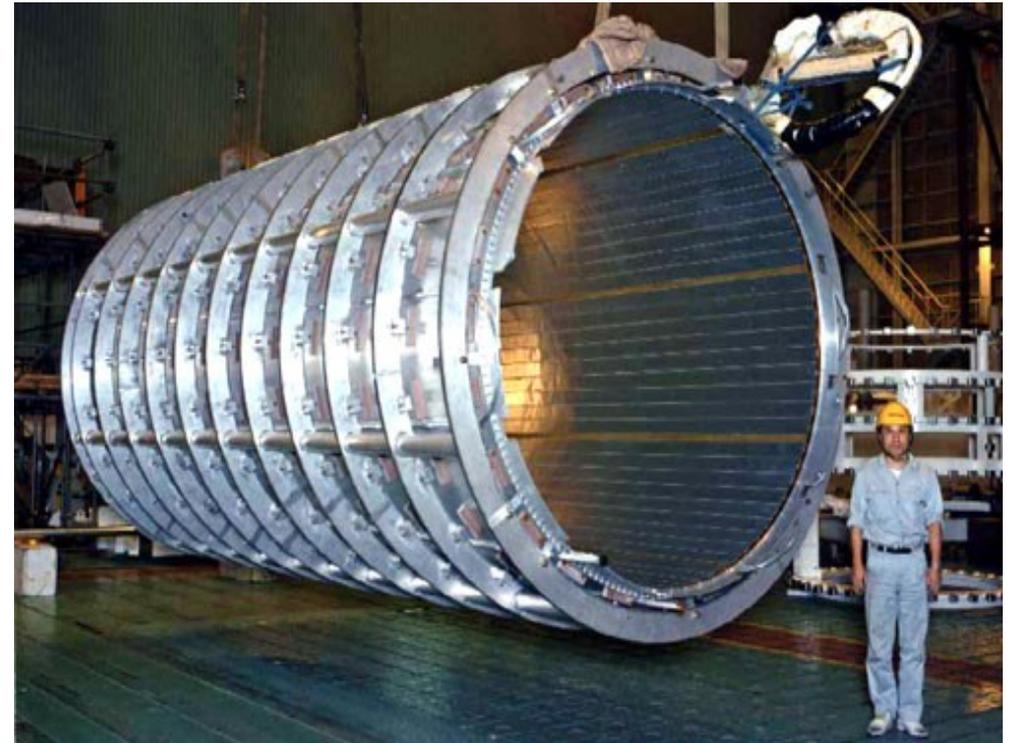
$$\uparrow + \downarrow \neq 0 \quad \text{MET} = \text{Missing transverse energy}$$

# Tecnologia e innovazione

## Il campo magnetico

100 000 volte più intenso del campo magnetico terrestre

Solenoidi superconduttori lavorano alla temperatura 4.5 K, confrontabile con la temperatura dello spazio interstellare!



# Tecnologia e innovazione

## Il sistema di acquisizione dati

Ogni rivelatore è collegato ad una rete di circuiti elettrici che immagazzinano tutte le informazioni delle tracce senza bisogno di esaminarle ad occhio

Ad LHC abbiamo una collisione ogni 25 ns!!

**10<sup>15</sup> eventi** acquisiti finora



# Tecnologia e innovazione

## Il sistema di acquisizione dati

Ogni rivelatore è collegato ad una rete di circuiti elettrici che immagazzinano tutte le informazioni delle tracce senza bisogno di esaminarle ad occhio

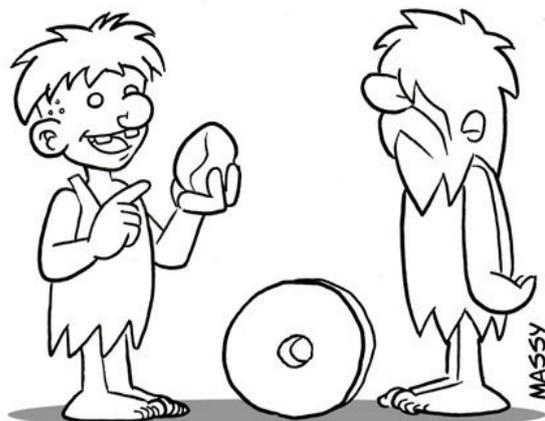
Ad LHC abbiamo una collisione ogni 25 ns!!

$10^{15}$  eventi acquisiti finora



Questo ha portato a nuove invenzioni: **il web e la cloud!** Le nuove tecnologie inventate al CERN dopo un pò diventano liberamente utilizzabili da tutti.

- HO INVENTATO IL FRENO.



Galileo

XVII sec

Newton

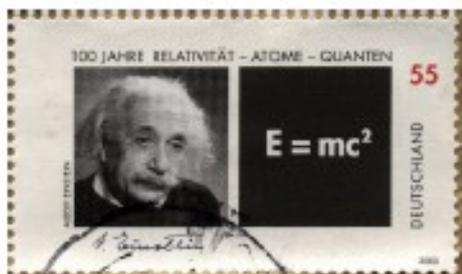
XVII sec



$F = ma$

Einstein

XX sec



AEGIS collaboration

oggi



# Cos'è la massa?

# Cos'è la massa?



$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \bar{\psi}_i Y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

# Cos'è la massa?



$$\begin{aligned} & \dots + \frac{1}{2} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

Il modello di Higgs in un esempio!

# Cos'è la massa?

*«It's really an incredible thing that it's happened in my lifetime»*

Peter Higgs



1964



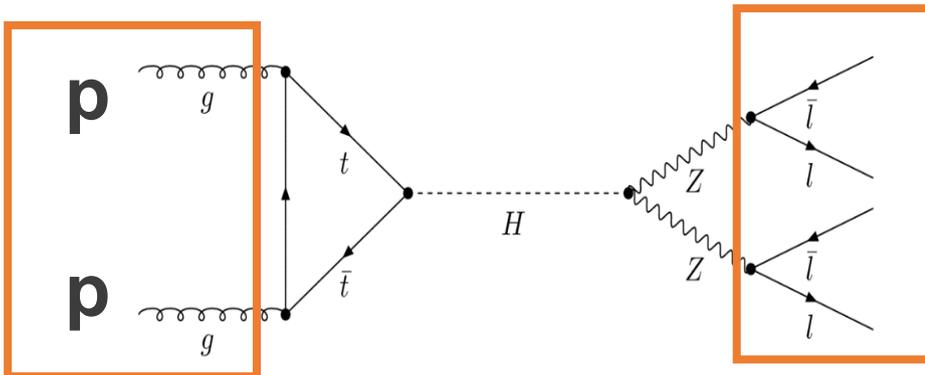
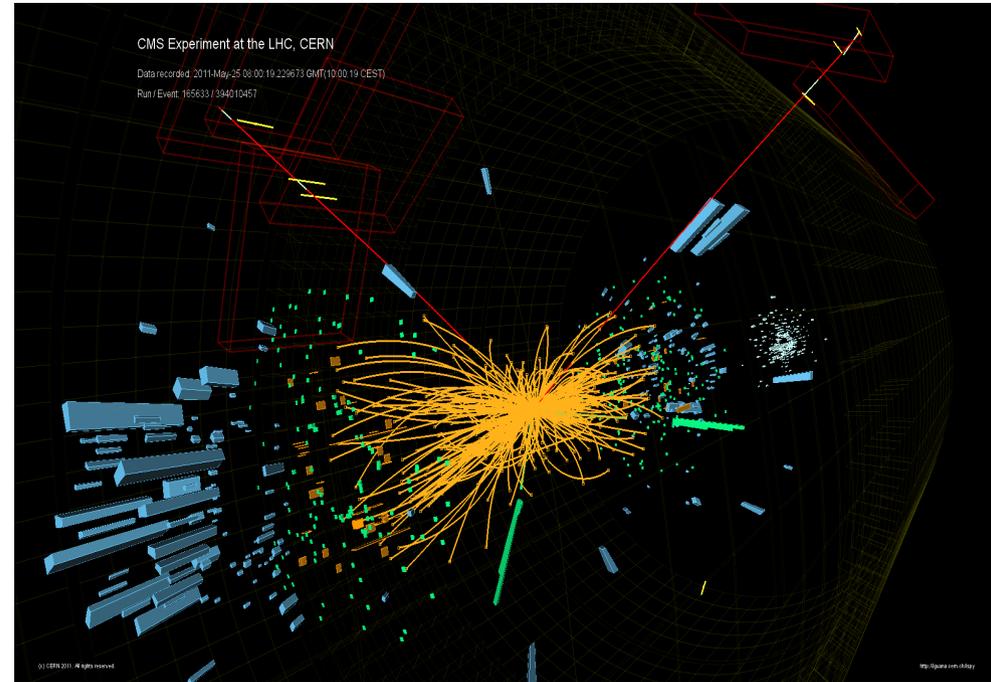
4 Luglio 2012

# Vedere l'Higgs ad LHC

è raro ed instabile

- Viene prodotto in **una** collisione su **10 miliardi**
- Decade in  **$10^{-22}$  secondi**

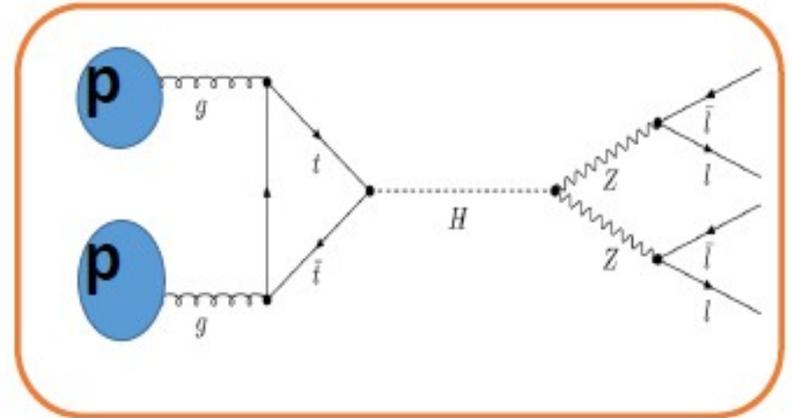
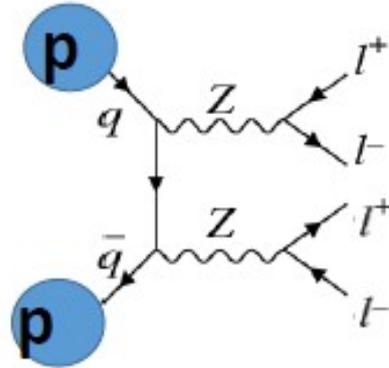
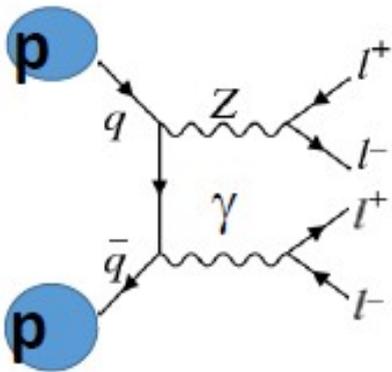
Possiamo osservare soltanto le particelle figlie



**Stato  
iniziale**

**Stato  
finale**

# Background



$10^{15}$  Eventi registrati



10 000 Candidati Higgs



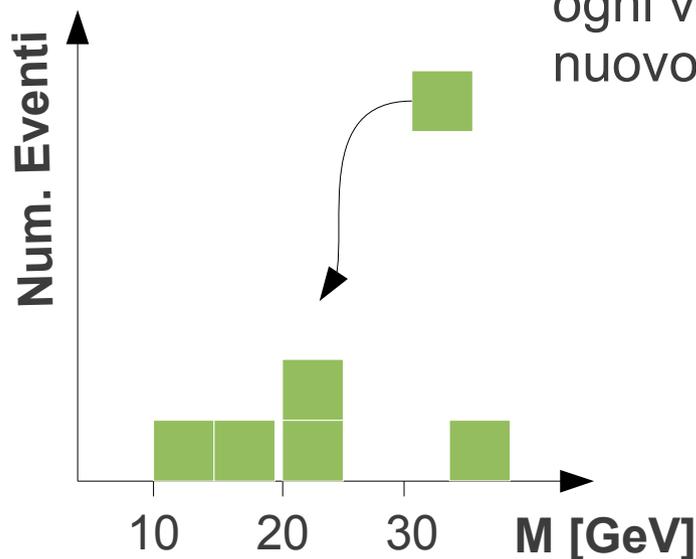
Higgs

# Non perdiamo la speranza ! (esiste la statistica)

Ogni volta che vediamo un evento con lo stato finale di interesse misuriamo una quantità detta **massa invariante** che rappresenta **l'energia totale delle particelle figlie**.

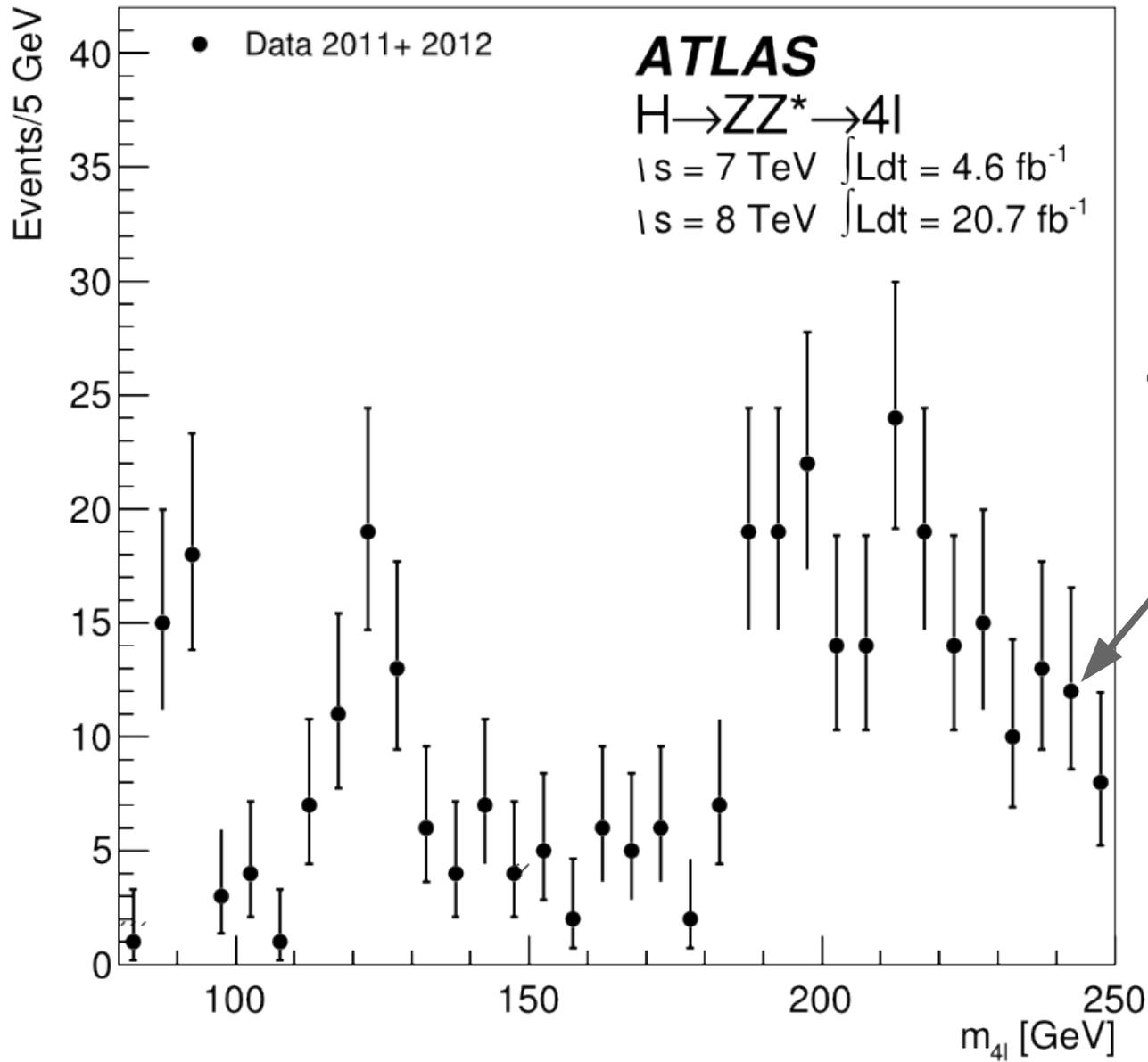
Per due particelle:  $M^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2$

Inseriamo il valore di M in un istogramma: “+1” ogni volta che un certo valore è ottenuto di nuovo.



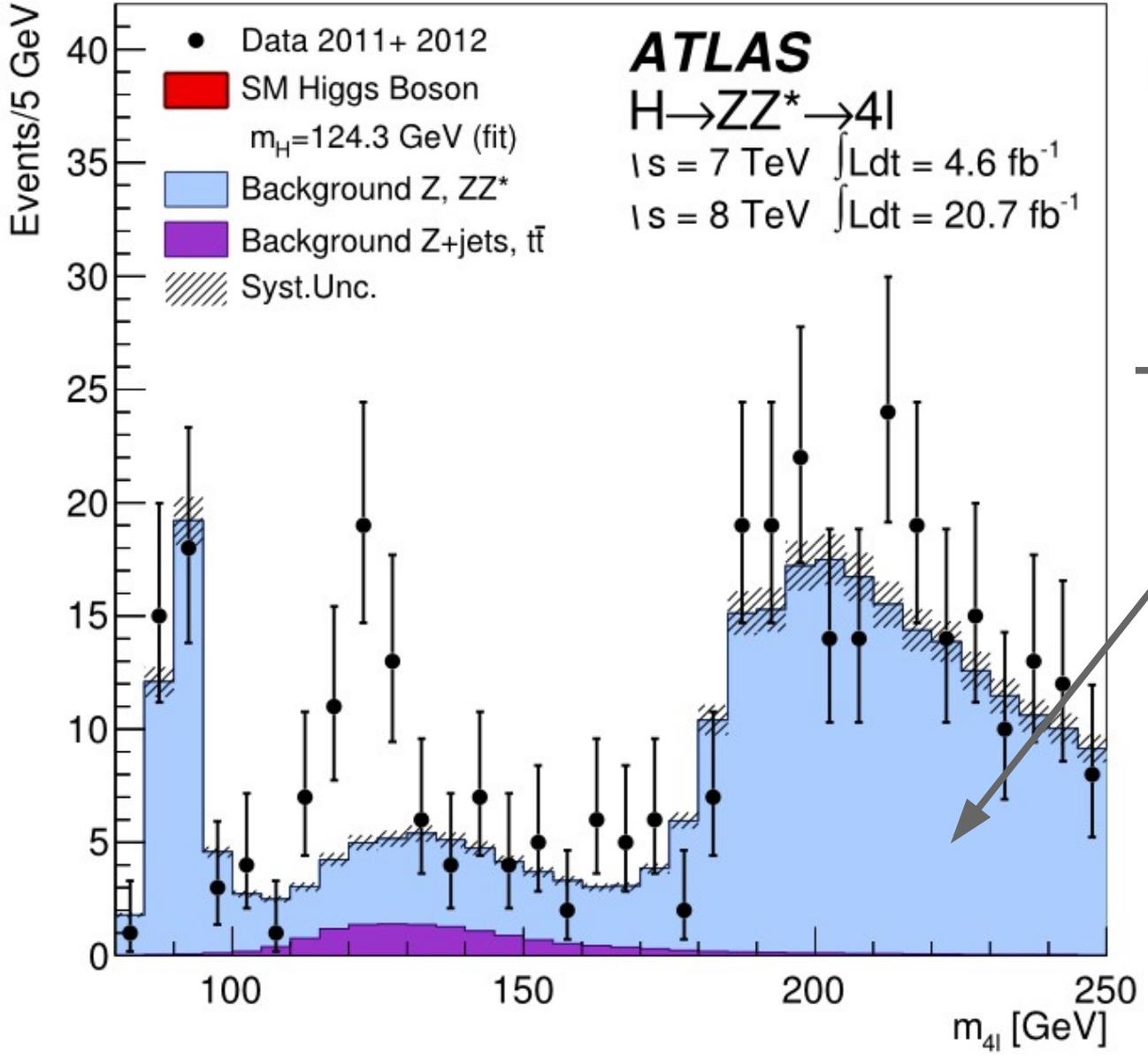
Un **picco (o risonanza)**, cioè un eccesso di eventi in un istogramma rispetto alla configurazione attesa (**fondo o background**) ci permette di identificare la **presenza di una particella**.

□

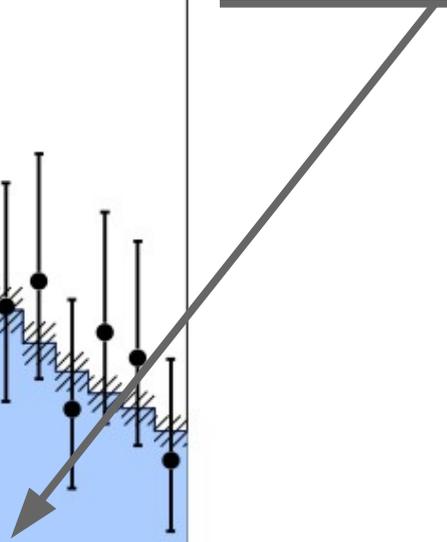


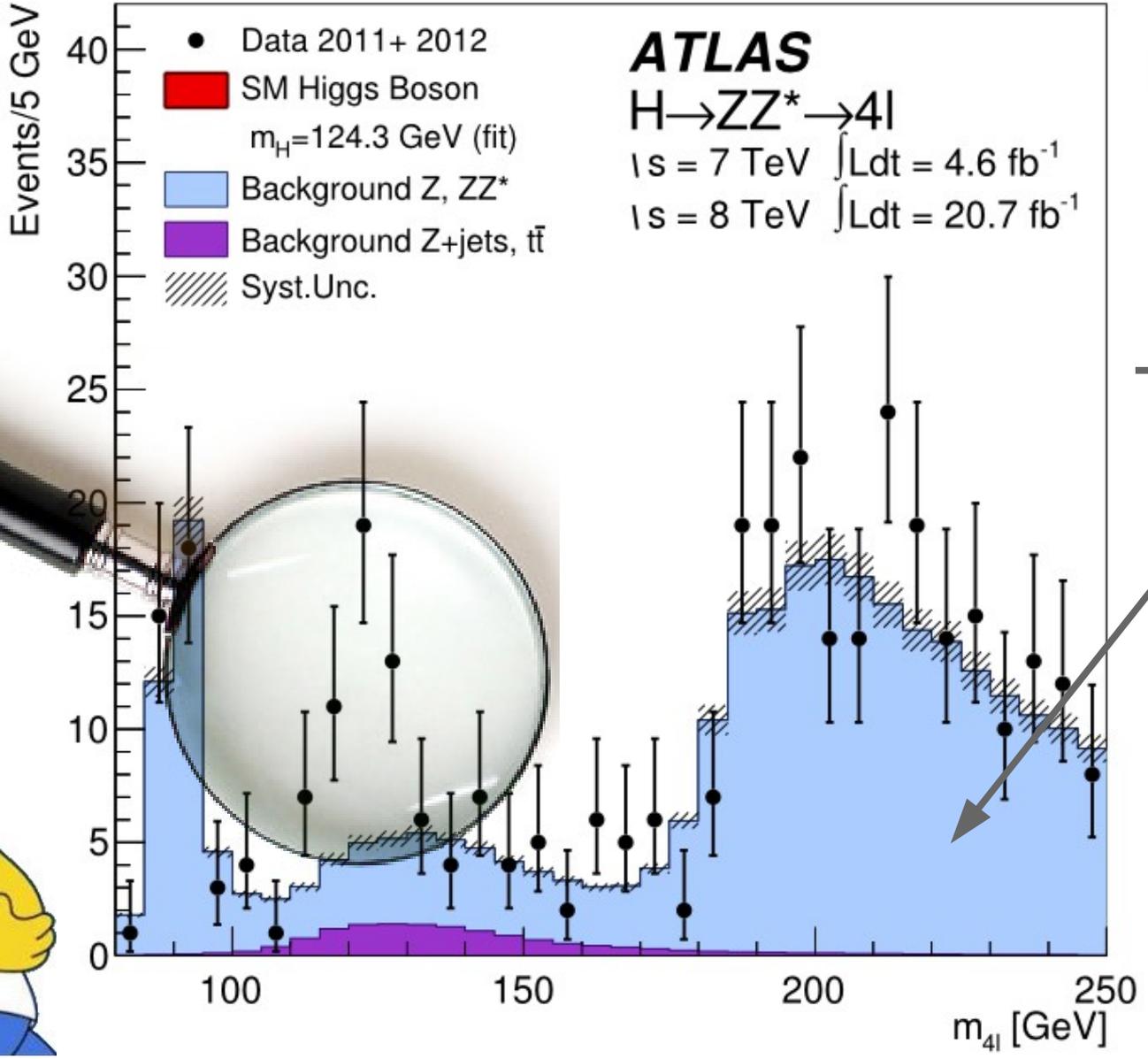
**I punti sono  
i dati  
sperimentali**

□

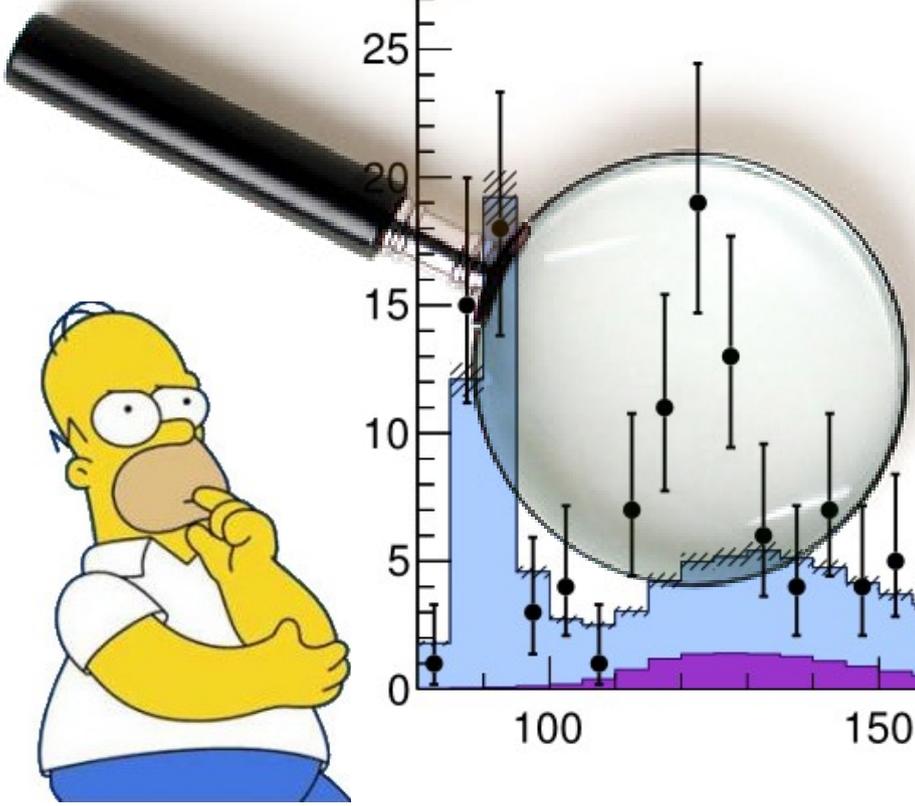


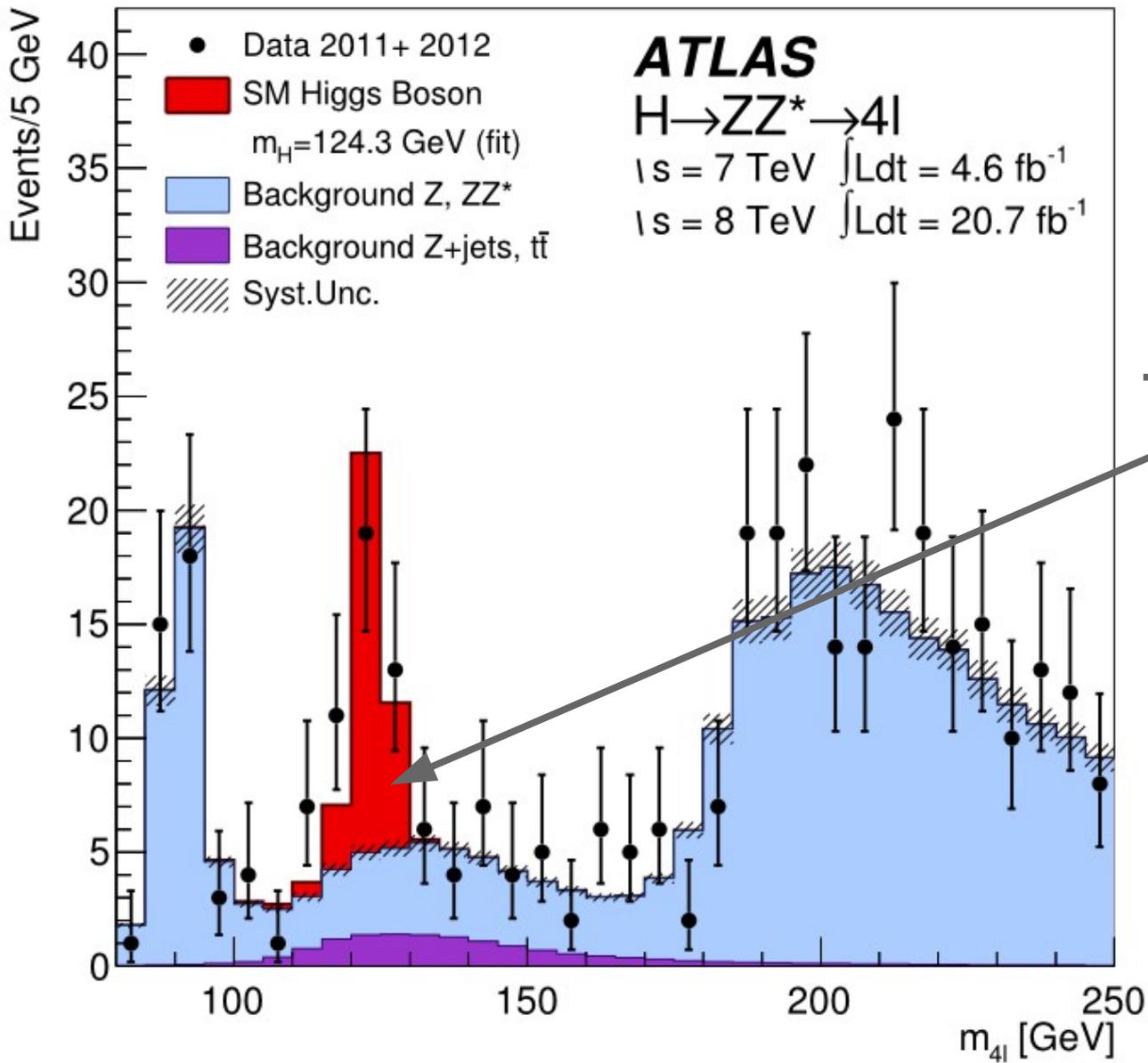
L'area blu è il fondo atteso secondo il Modello Standard





L'area blu è il  
 fondo atteso  
 secondo il  
 Modello  
 Standard





L'area rossa  
 è il segnale  
 atteso  
 (simulato)  
 se ci  
 fosse l'Higgs

# E se non avessimo scoperto l'Higgs?

Anche la non scoperta è un successo!!

Se non vediamo un picco significa che la particella che cerchiamo o è molto rara oppure non esiste.

A CMS e ATLAS si lavora costantemente, lontano dai riflettori, per rigettare teorie e porre limiti alla probabilità di produzione di particelle....

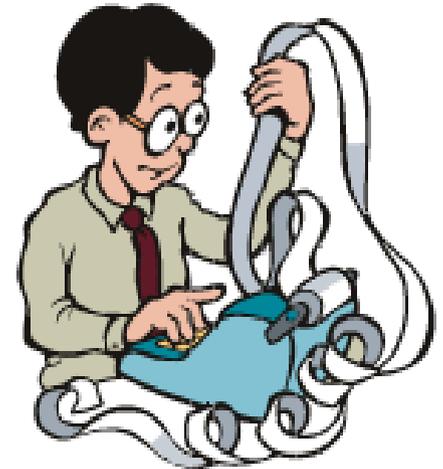


# Higgs quanto ci costi?

LHC, pagato in **10 anni** dall'intera comunità scientifica internazionale, è costato:

**5 miliardi di euro**, equivalenti a

- > Una settimana di guerra in Iraq
- > Quattro bombardieri B-2
- > Meno di un centesimo della spesa militare mondiale annua
- > Un centesimo di quanto stanziato dagli USA per contrastare il crack delle banche
- > Quanto viene speso dal mondo in una settimana per pubblicità
- > Un euro all'anno durante gli anni di cantiere per ciascuno dei cittadini europei





# Cosa rimane da scoprire?

Il Modello Standard funziona bene, ma non spiega tutto!



C'è un sacco di lavoro ancora da fare...



# Cosa rimane da scoprire?

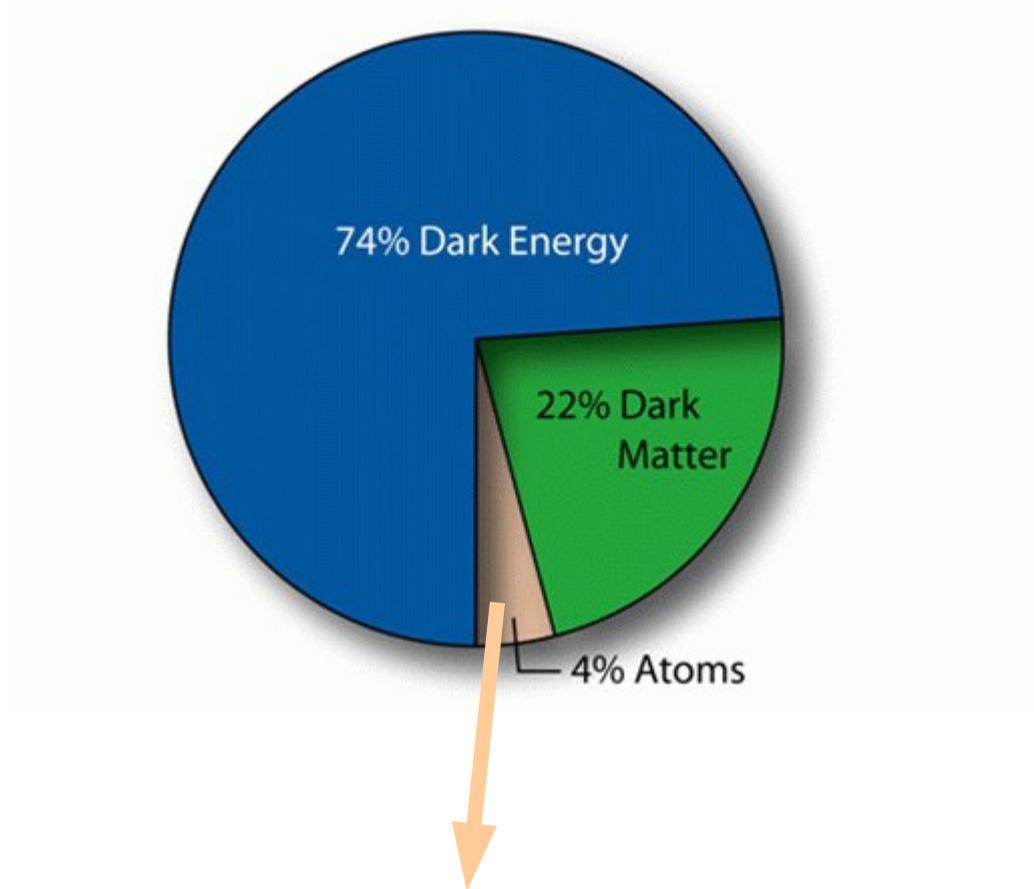
- Dark matter e dark energy...cosa sono?
- Perché siamo fatti di materia (e non anti-materia)?
- ...



Tutte queste domande si riconducono ad una principale:  
**il Modello Standard è la teoria che spiega tutto oppure ci  
manca qualcosa?**

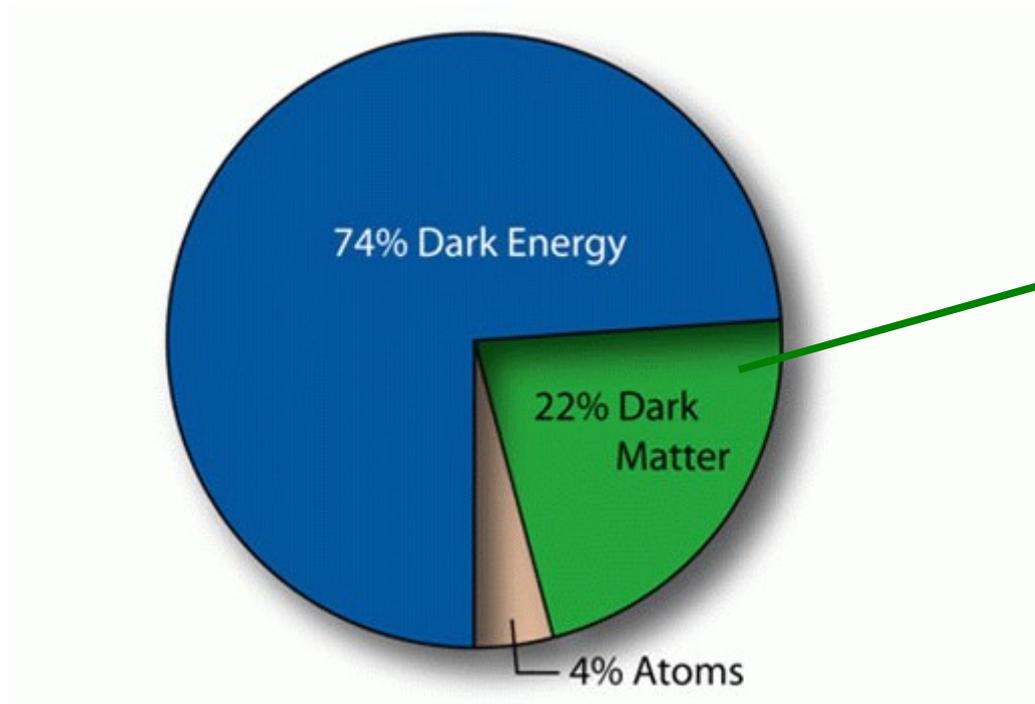
Molti tentativi teorici di spiegare fenomeni  
oltre il Modello Standard!

# Quanto conosciamo dell'universo?



La materia ordinaria (stelle, pianeti, noi) è solo il 4% dell'universo!

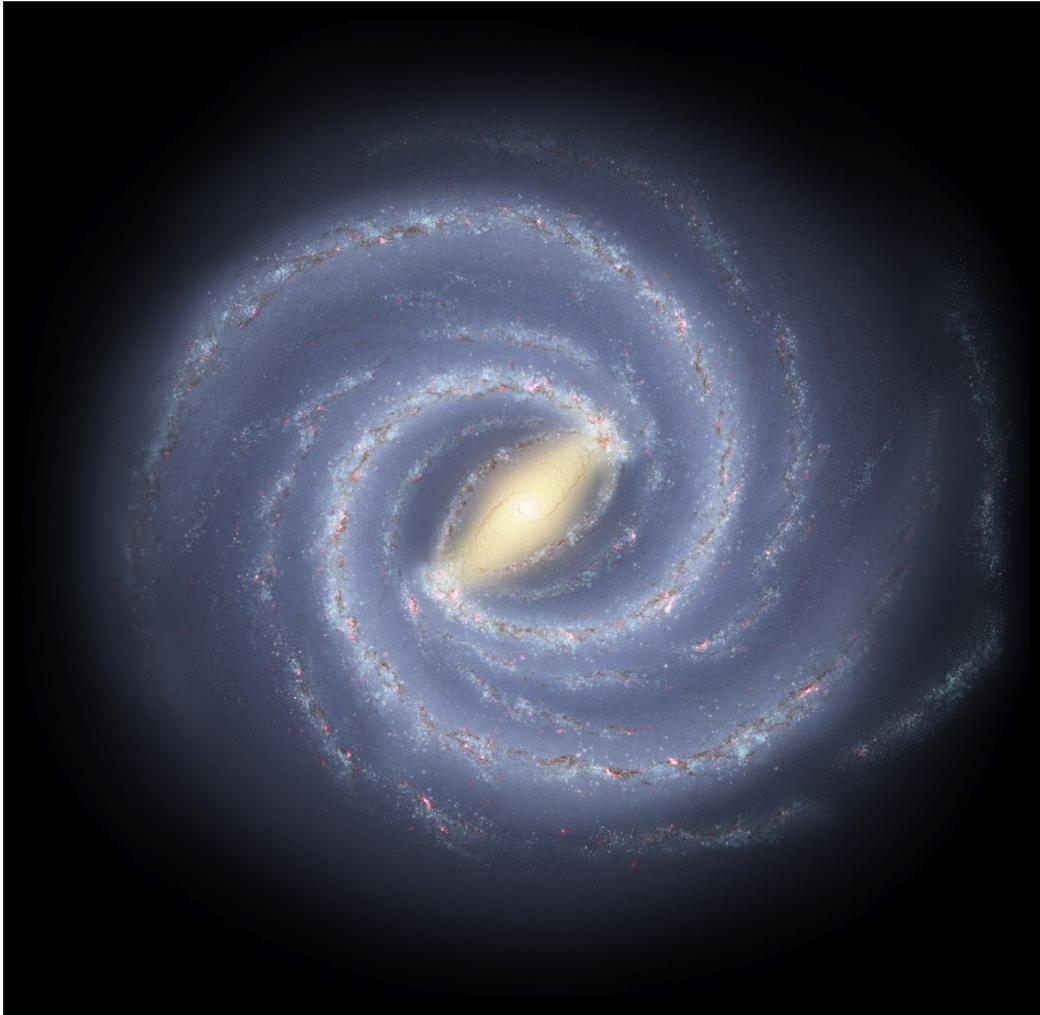
# Materia oscura...un vecchio rebus!



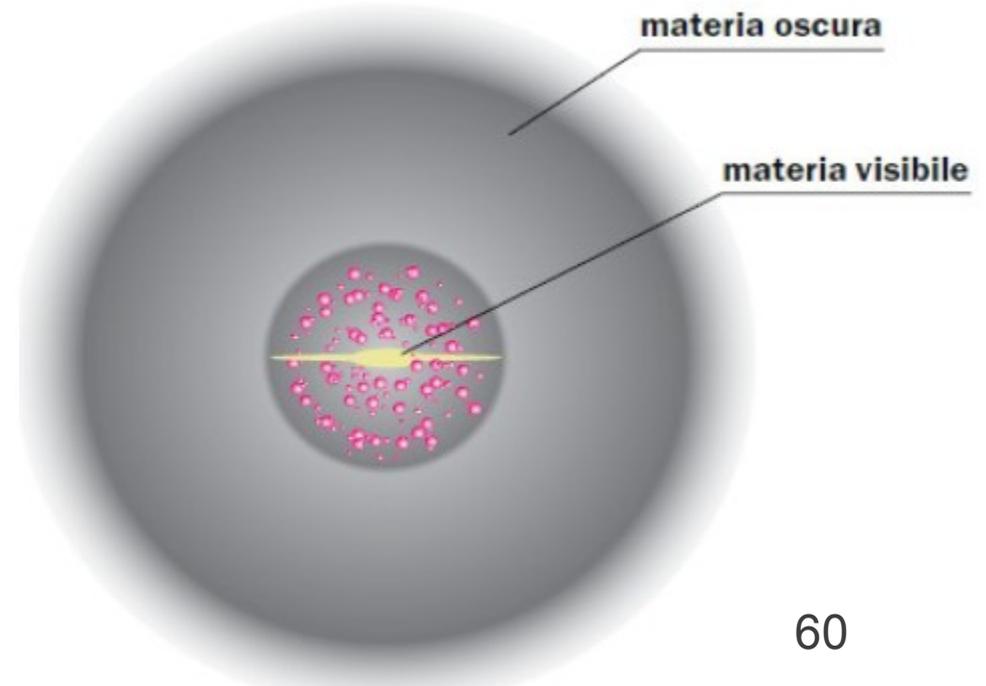
E' chiamata materia oscura quella componente di materia che si manifesta attraverso i suoi effetti gravitazionali, ma non è direttamente osservabile (non emettesse radiazione elettromagnetica).

**La materia oscura è il 22% dell'universo!**

# Materia oscura...un vecchio rebus!

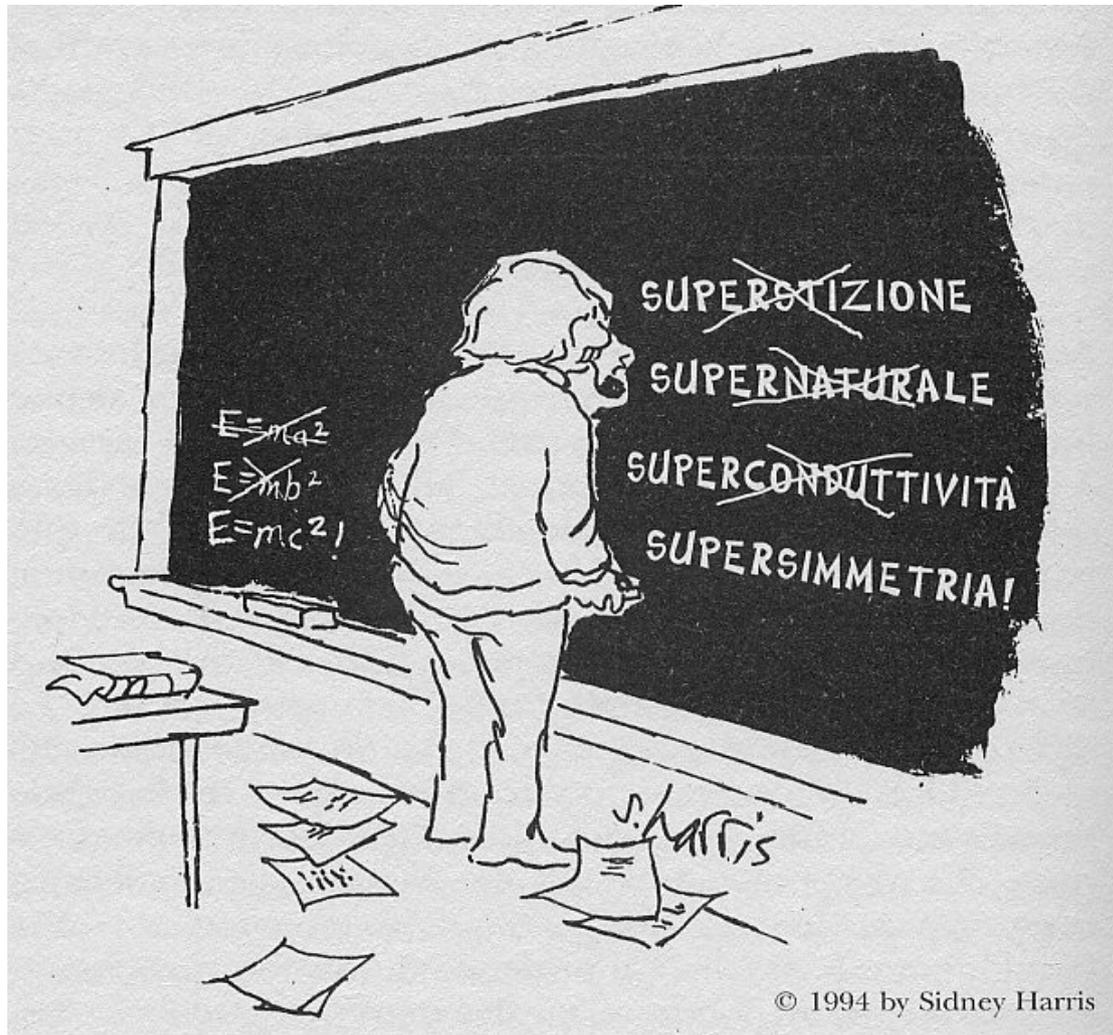


Studiando il moto delle galassie, già dagli anni 20, si era osservato che la parte visibile di una galassia rappresenta solo una frazione minimale della sua massa.



# Teorie Supersimmetriche

La **materia oscura esiste e ci circonda** ma non riusciamo a rivelarla direttamente...

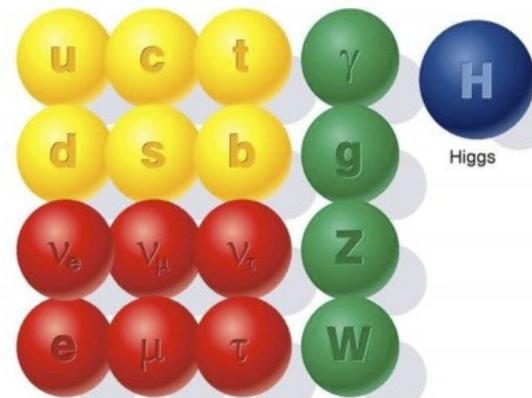


Esistono **varie teorie** che provano a spiegare cosa sia, come la **supersimmetria (SUSY)**.

# Teorie Supersimmetriche

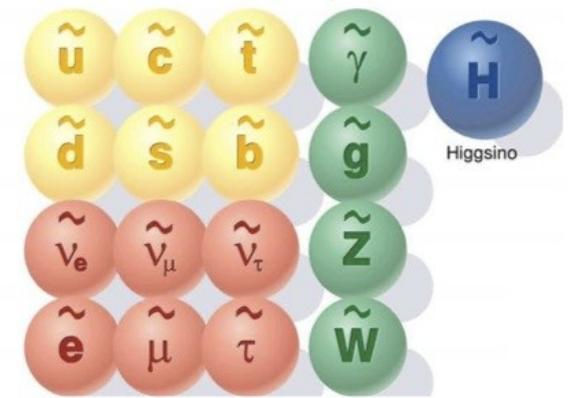
- Partner (non ancora osservato!) per ogni particella conosciuta
- Masse elevate (anche più di 1000 GeV)

The known world of Standard Model particles



- quarks
- leptons
- force carriers

The hypothetical world of SUSY particles

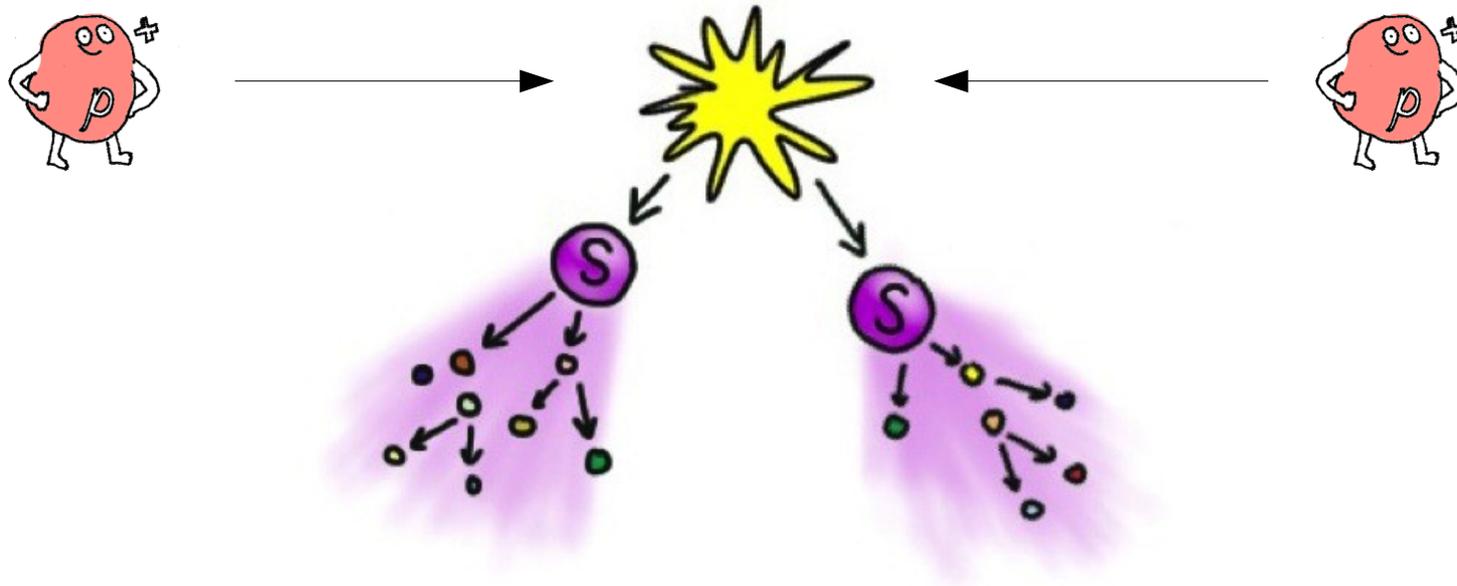


- squarks
- sleptons
- SUSY force carriers

La **particella SUSY più leggera** dovrebbe essere stabile, neutra e debolmente interagente...il **candidato perfetto come materia oscura!**

# Teorie Supersimmetriche

In molti modelli le particelle SUSY verrebbero prodotte in coppia dalle collisioni dei protoni a LHC.

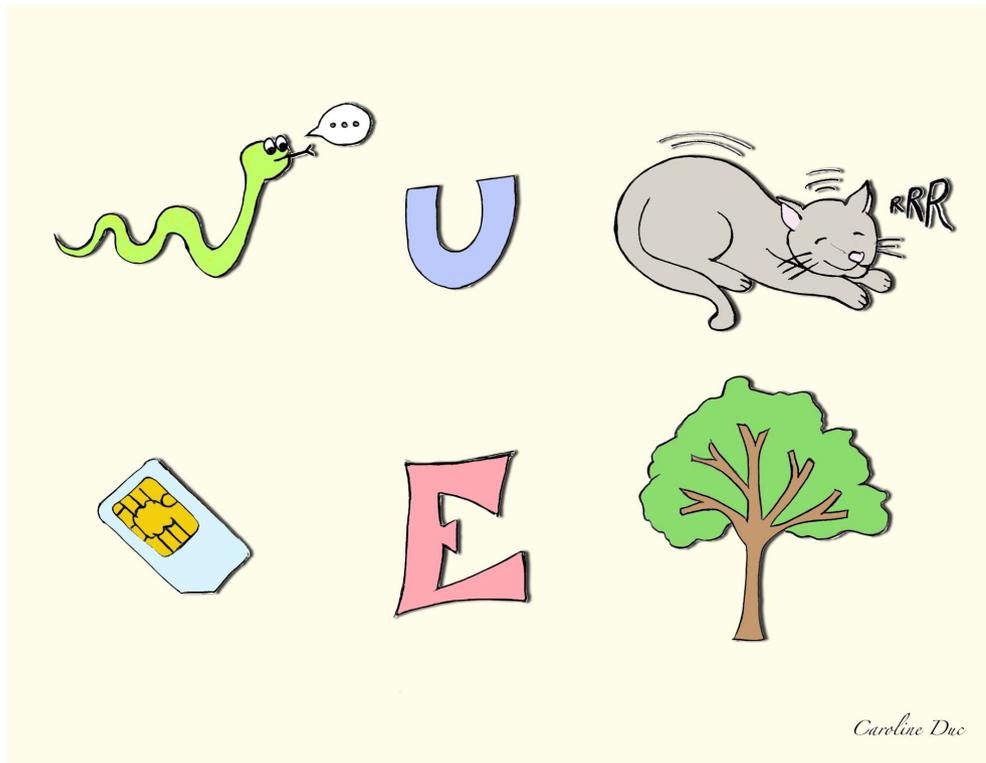
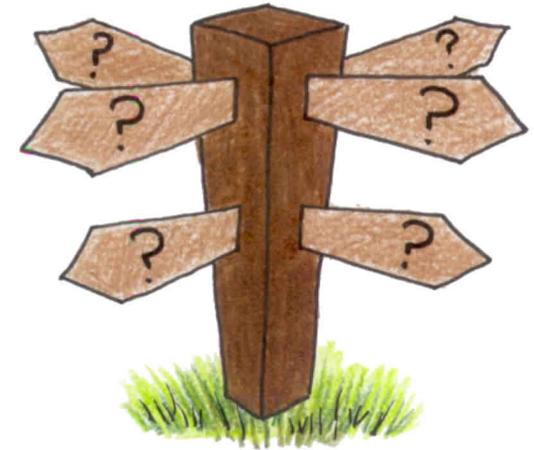


Queste particelle a loro volta decadranno in altre con massa minore. Rilevando i prodotti del decadimento è possibile risalire alla particella supersimmetrica di partenza (un pò come per il bosone di Higgs).

# Teorie Supersimmetriche

Perchè non le abbiamo ancora trovate?

Dalla teoria abbiamo solo alcune indicazioni su dove cercare, le possibilità restano moltissime!

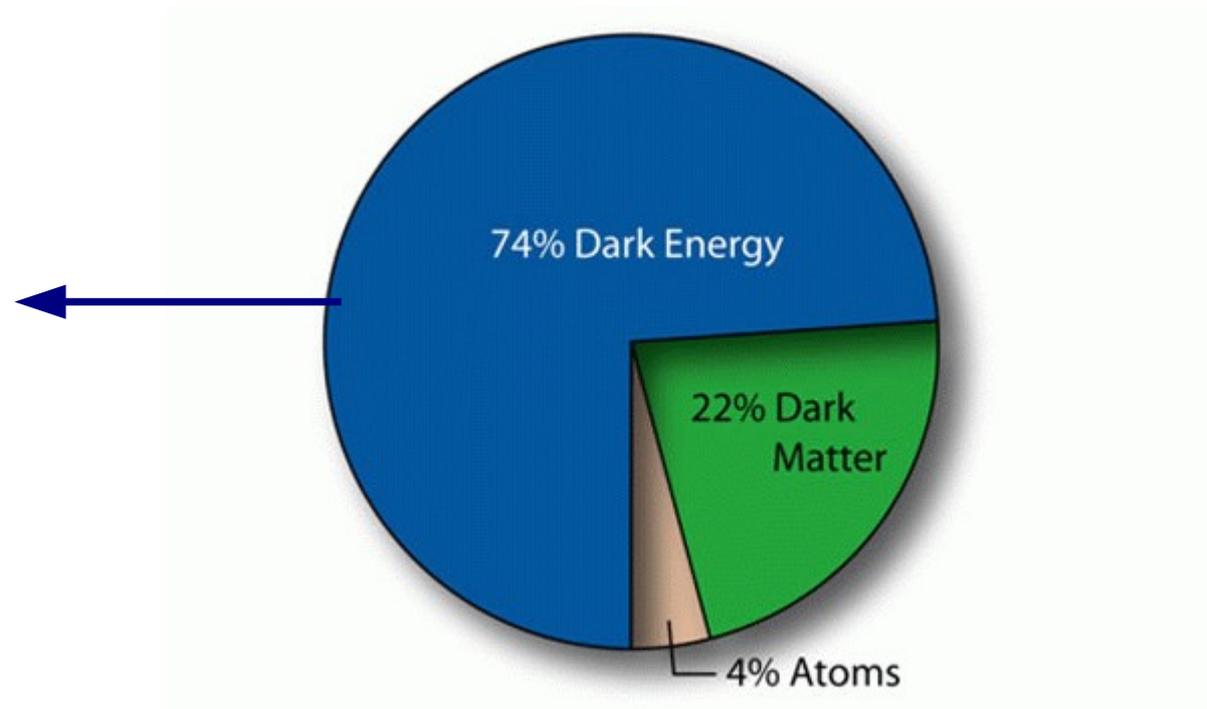


*Caroline Duc*

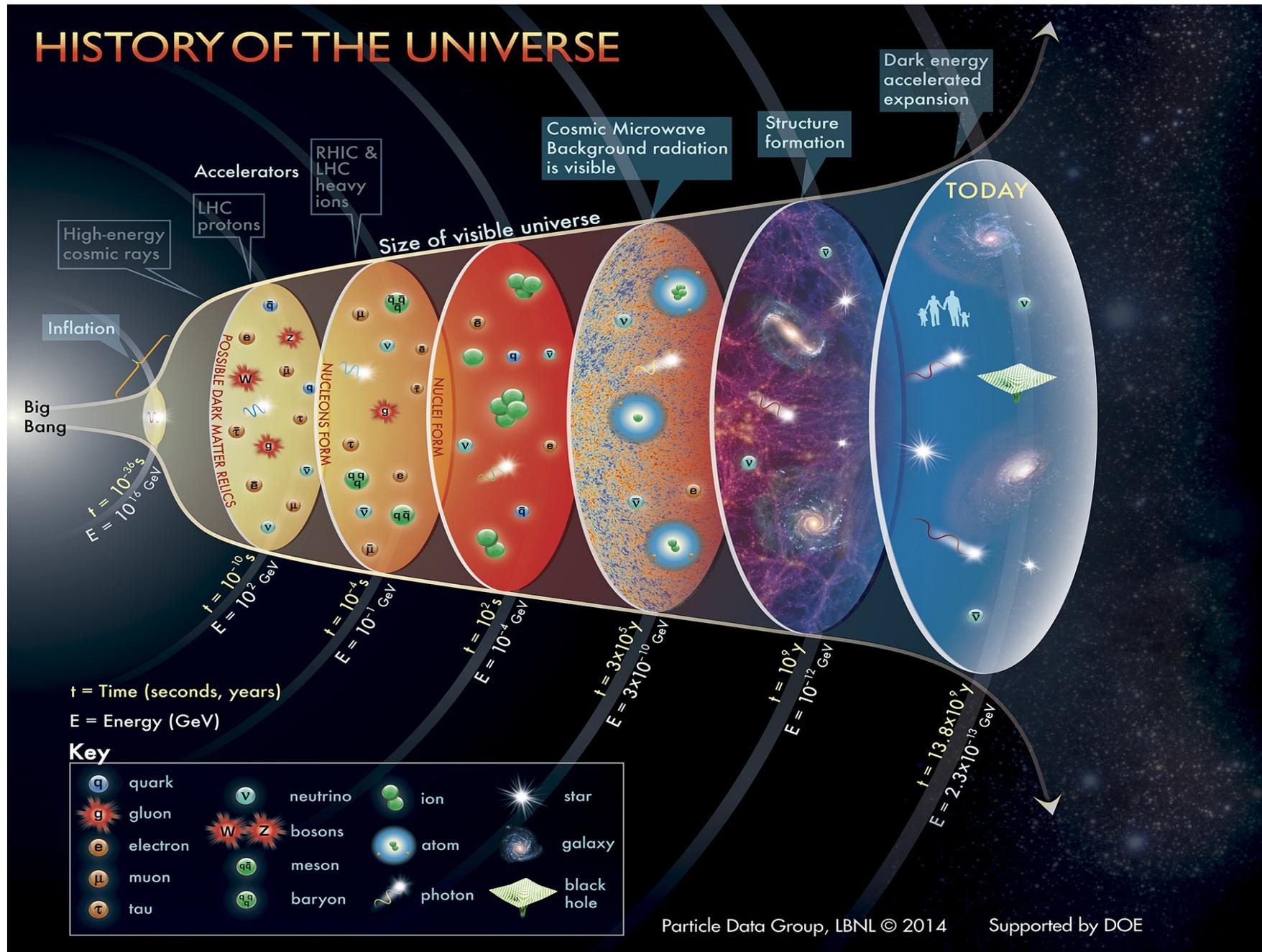
Si crede che durante il prossimo run di LHC dovremmo trovare qualcosa...oppure modificare il nostro approccio al problema!

# ...manca ancora qualcosa: energia oscura!

L'introduzione dell'energia oscura è attualmente il modo più diffuso fra i cosmologi per spiegare le osservazioni di un universo in espansione accelerata.



# Storia dell'universo e dark energy



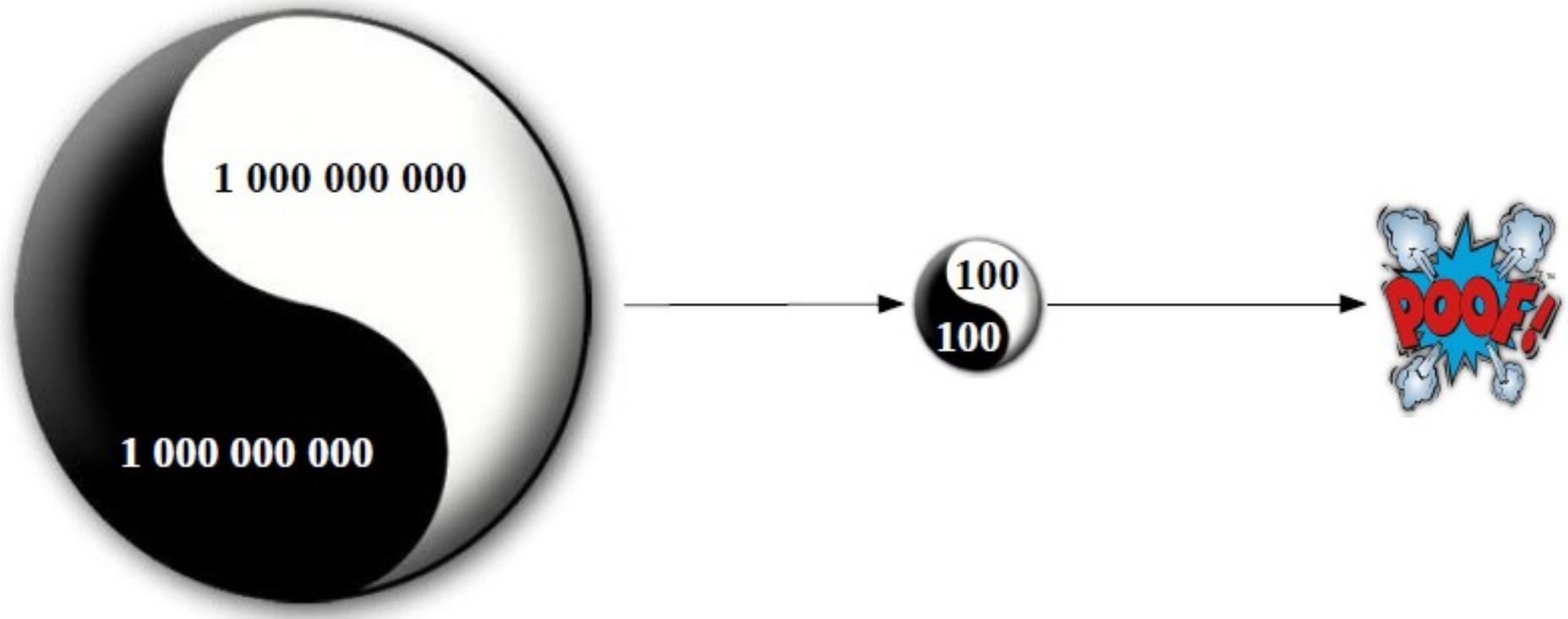
# Perchè c'è più materia che antimateria?

Dopo il Big bang dovrebbe essere stato creato una quantità uguale di materia ed anti-materia.

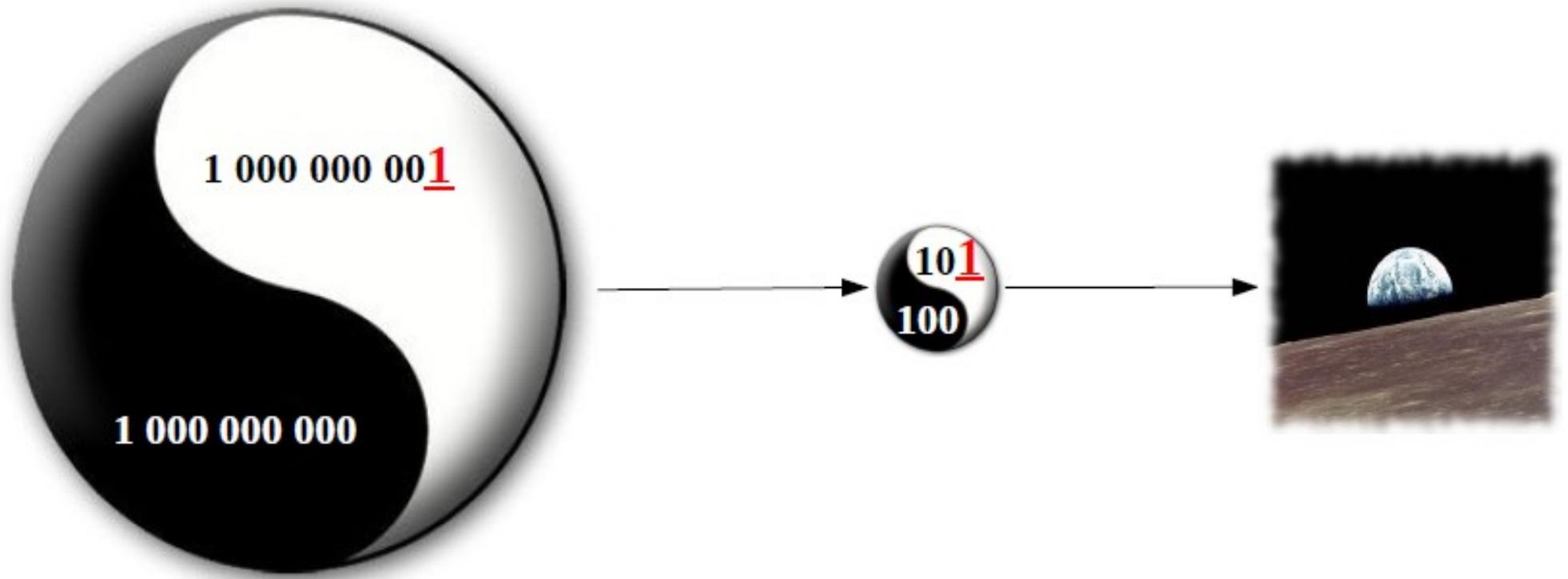
Oggi però guardando la terra e le stelle conosciute sembra esserci solo materia!  
Come mai?



# Perché c'è più materia che antimateria?



# Perché c'è più materia che antimateria?

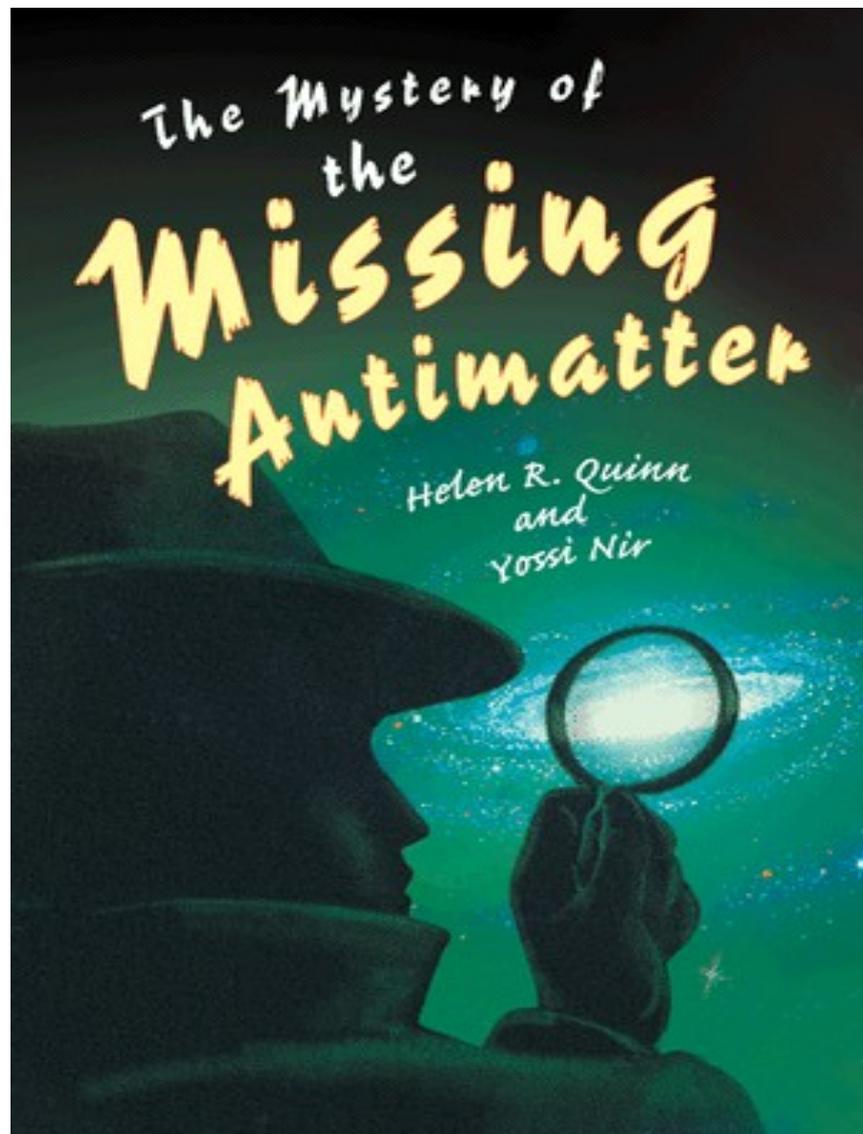


# Perchè c'è più materia che antimateria?

Sono state viste particelle che si trasformano spontaneamente (“oscillano”) nella loro anti-particella prima di decadere.

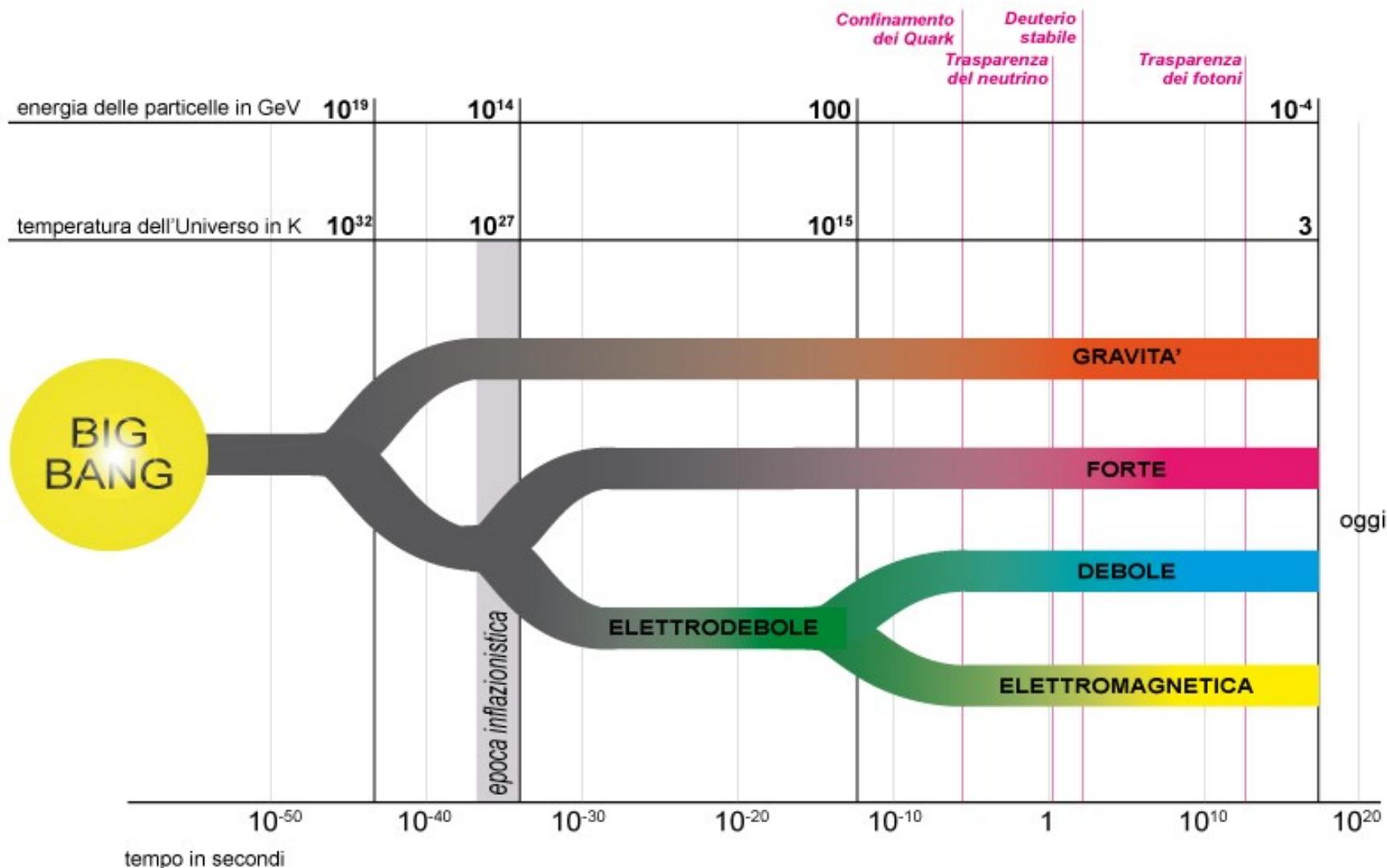
Qualche meccanismo sconosciuto negli istanti iniziali dell'universo avrebbe potuto causare un'oscillazione maggiore in un senso invece che nell'altro, generando il mondo che conosciamo.

Si crede sia possibile scoprire questo meccanismo studiando la differenza di comportamento tra la materia e l'anti-materia generata ad LHC.



# Unificazione delle forze

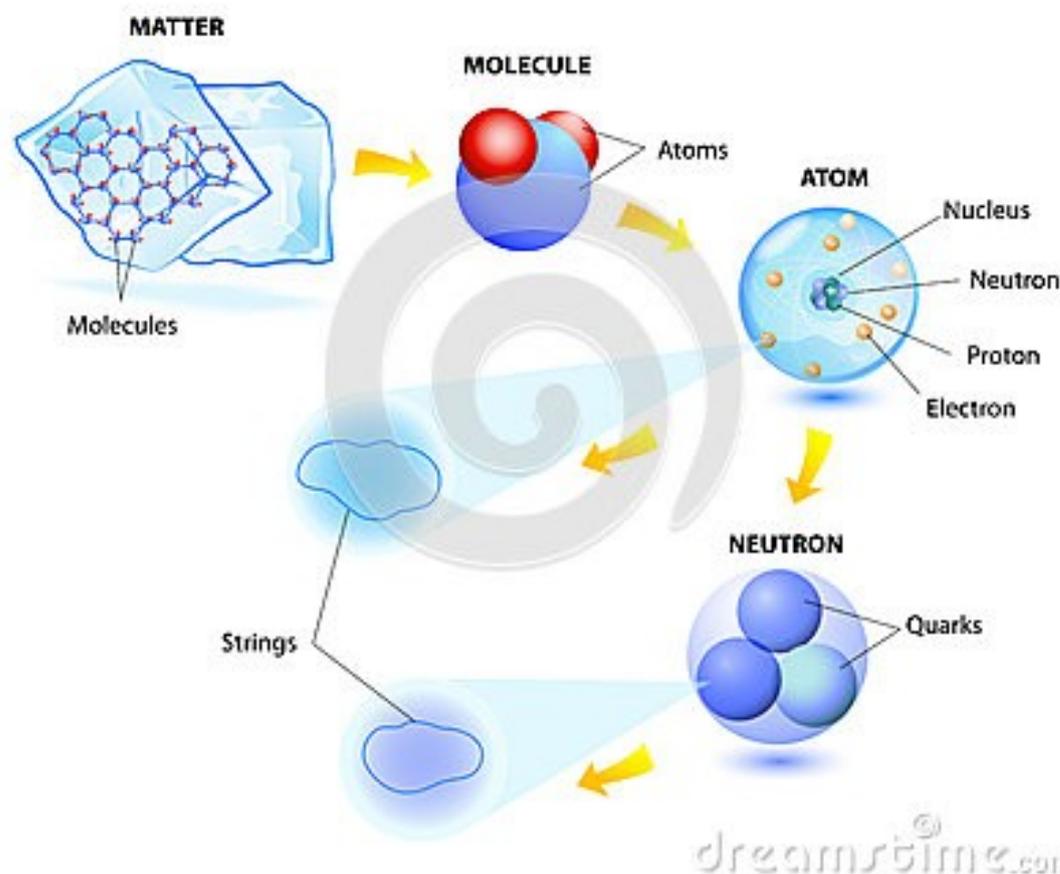
Uno dei tentativi della fisica è di riportare teorie che sembrano non collegate tra loro ad un'unica e semplice teoria unificata.



# Teoria delle stringhe

La teoria delle stringhe (dall'inglese string = corda) è una teoria che tenta di conciliare la meccanica quantistica con la relatività generale e che si spera pertanto possa costituire una teoria del tutto.

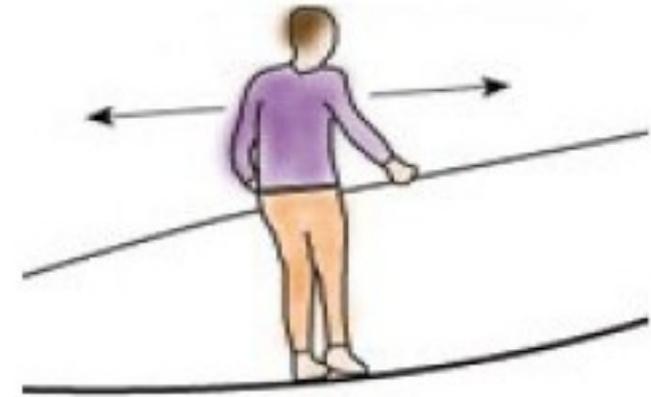
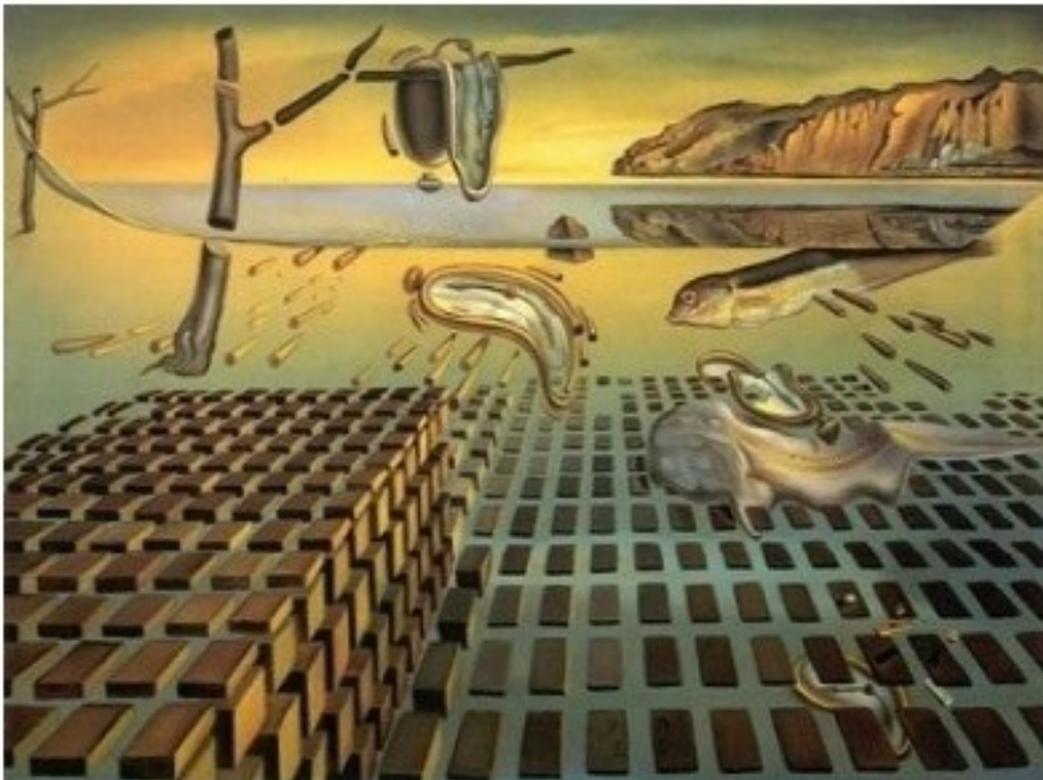
## STRING THEORY



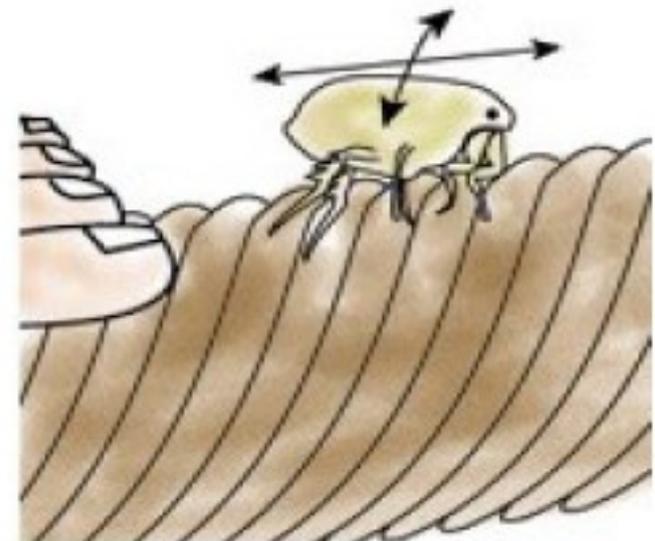
- Si fonda sul principio secondo cui la materia, la radiazione e, sotto certe ipotesi, lo spazio e il tempo siano in realtà la manifestazione di entità fisiche fondamentali che vengono chiamate stringhe.
- Prevede 10 dimensioni!
- Elettroni e quark sono creati da vibrazioni delle stringhe.

# Teoria delle stringhe

- Dove sono queste dimensioni addizionali?
  - Sono avvolte su loro stesse e noi non possiamo avvertirle

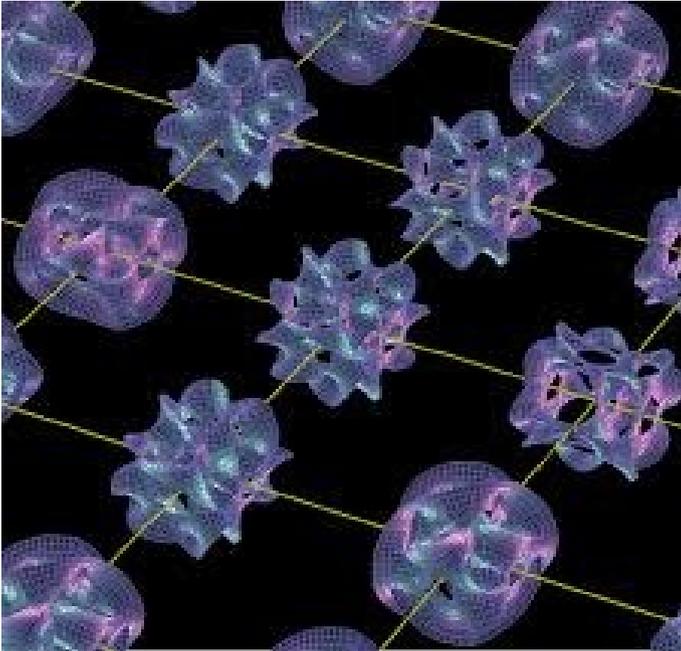


An acrobat can only move in one dimension along a rope..



...but a flea can move in two dimensions.

# Teoria delle stringhe



Questo spazio 10-dimensionale può assumere una grande varietà di configurazioni, ciascuna delle quali è compatibile con un modello empirico diverso.

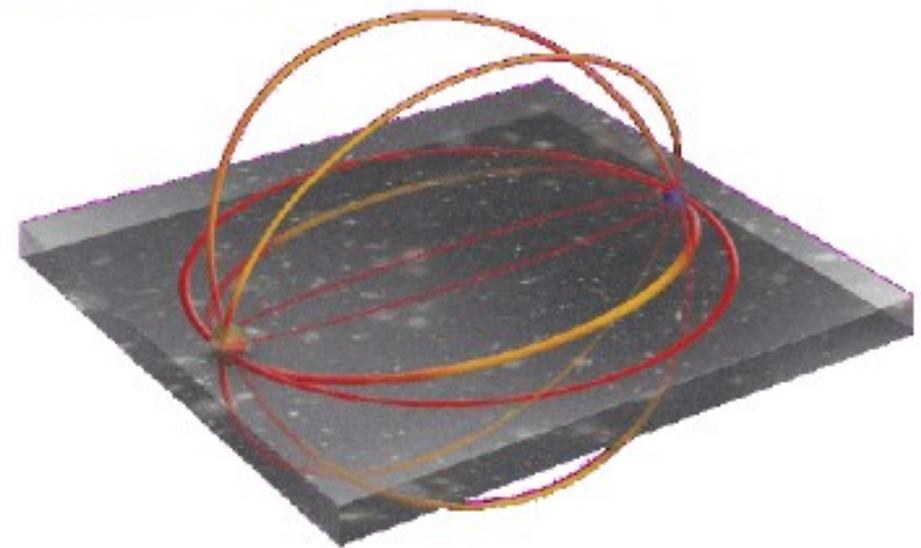
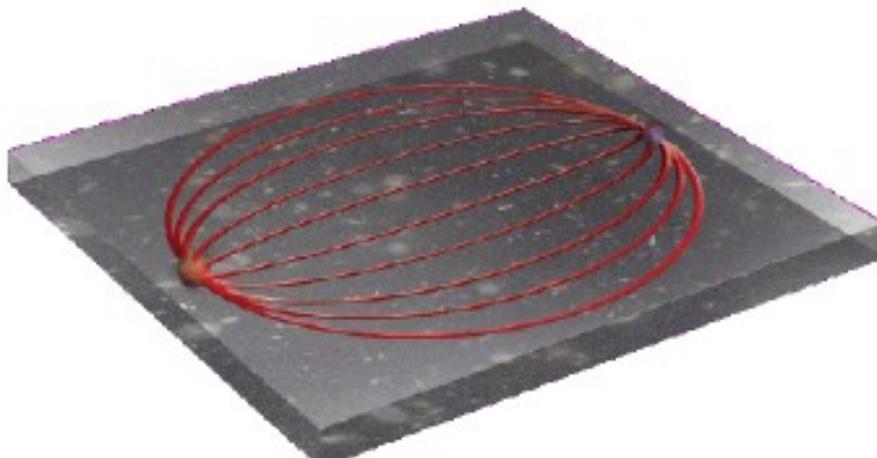
Questa teoria può dunque incorporare un gran numero di risultati sperimentali ma ha scarso potere predittivo!

L'uomo non possiede la tecnologia per osservare direttamente le stringhe, in quanto dovrebbero avere dimensioni intorno alla lunghezza di Planck, circa  $10^{-35}$  metri.

Ci potrebbero essere tuttavia conferme indirette (e non del tutto significative) dallo studio del fondo cosmico di radiazione.

# Backup

- La teoria delle stringhe prevede 11 dimensioni che potrebbero spiegare la debolezza della forza gravitazionale
  - Un piccolo magnete è più forte della gravità di tutta la terra
- Ipotesi:
  - Le altre forze sono confinate in 3D
  - La gravità si distribuisce invece in tutte le dimensioni indebolendosi

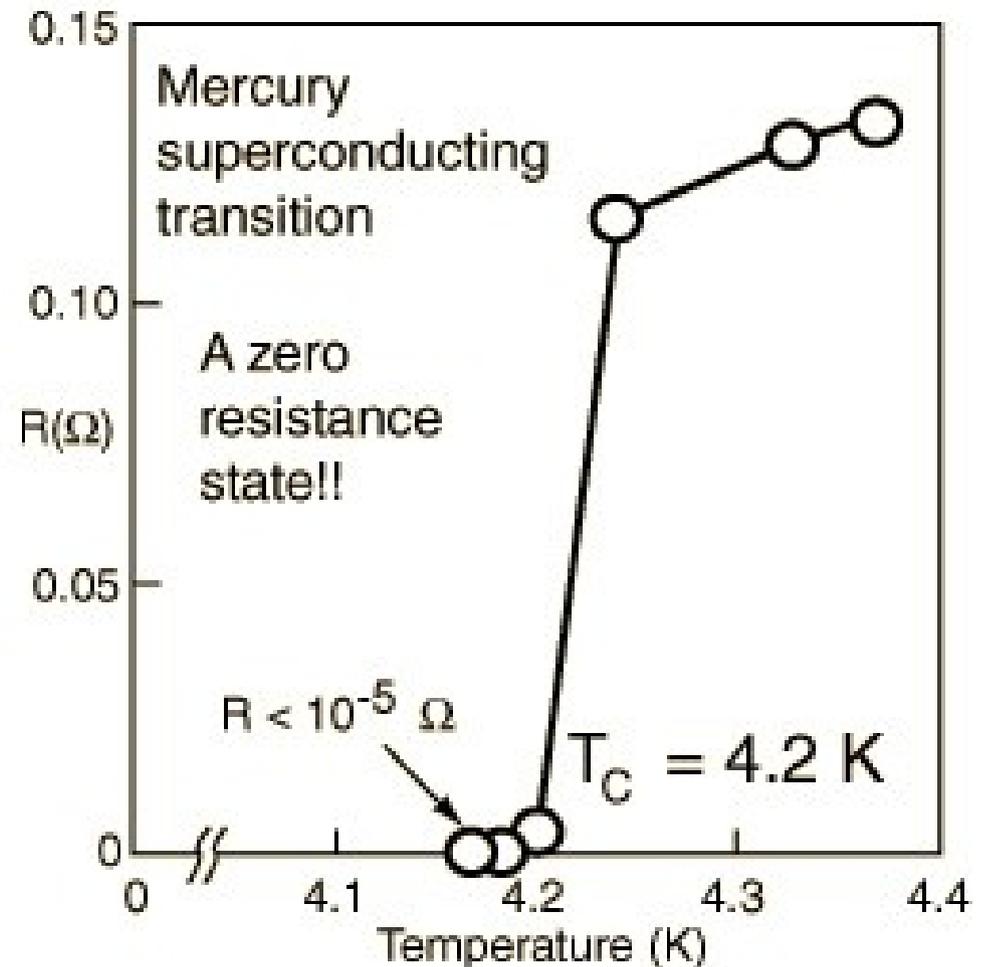


# Superconduttività

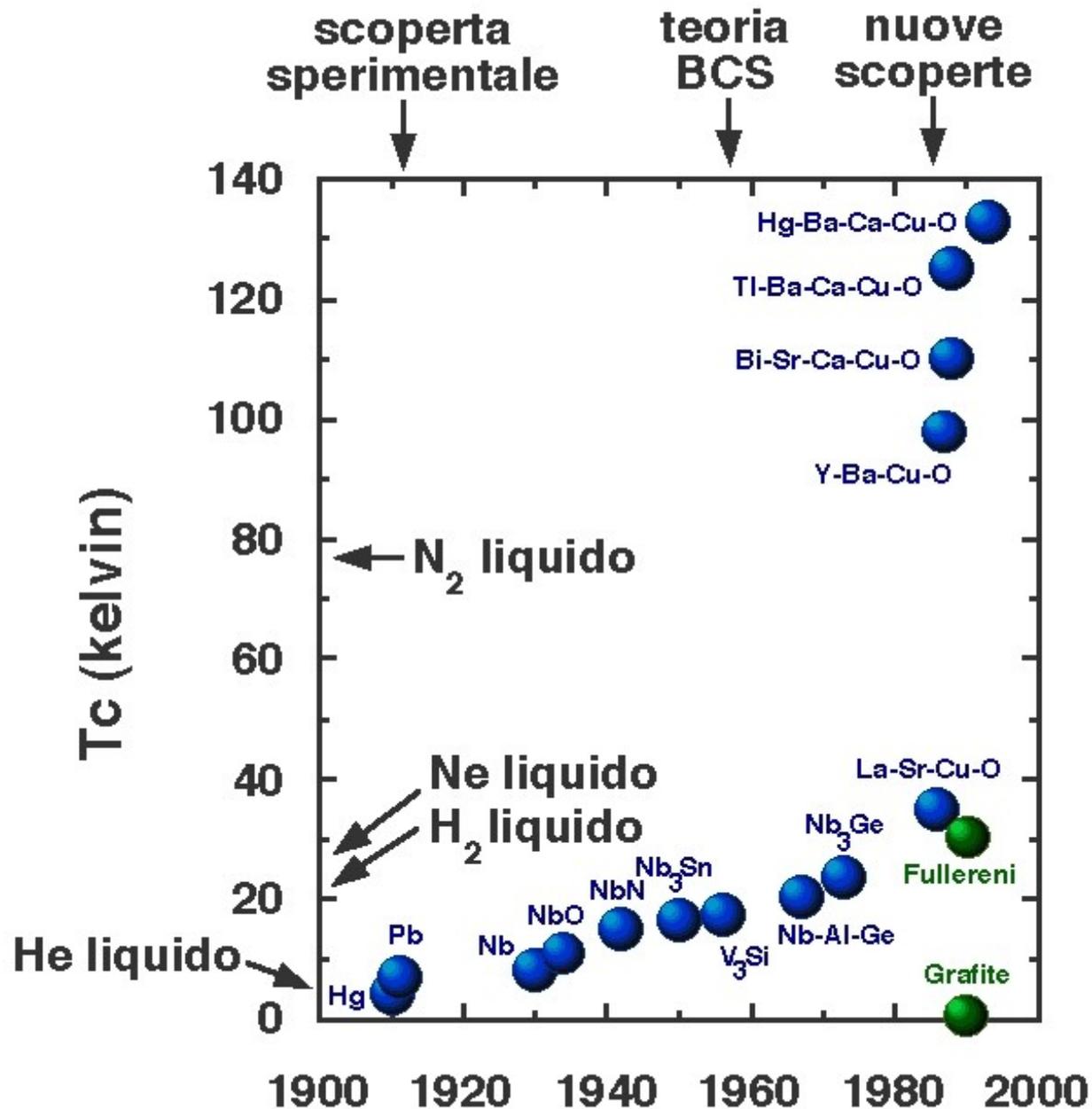
Alcuni materiali (detti superconduttori) assumono resistenza nulla al passaggio di corrente elettrica al di sotto di una certa temperatura.

La resistenza di un conduttore decresce proporzionalmente al decrescere della temperatura ma anche in ottimi conduttori come il rame rimane grande anche a valori prossimi a zero kelvin.

Nei superconduttori si manifesta una improvvisa e totale caduta della resistività a zero al di sotto della temperatura critica.



# Superconduttività

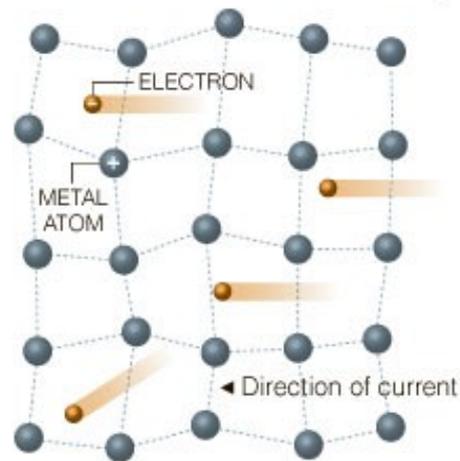


# Superconduttività

La teoria BCS (Bardeen, Cooper e Schrieffer, formulata nel 1957) propone che due elettroni si accoppino formando uno stato legato chiamato coppia di Cooper.

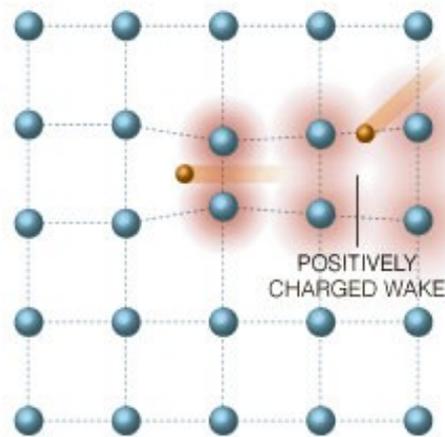
## Low-Temperature Superconductivity

December was the 50th anniversary of the theory of superconductivity, the flow of electricity without resistance that can occur in some metals and ceramics.



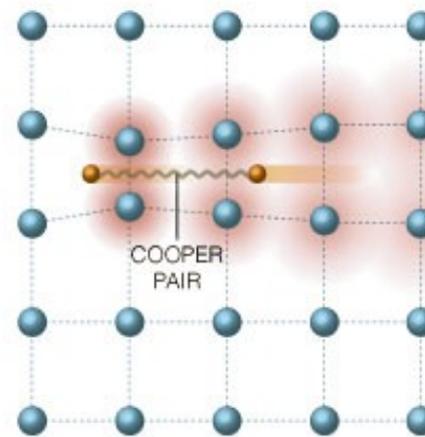
### ELECTRICAL RESISTANCE

Electrons carrying an electrical current through a metal wire typically encounter resistance, which is caused by collisions and scattering as the particles move through the vibrating lattice of metal atoms.



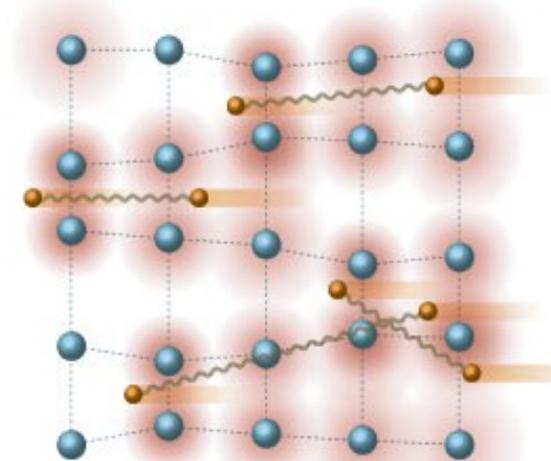
### CRITICAL TEMPERATURE

As the metal is cooled to low temperatures, the lattice vibration slows. A moving electron attracts nearby metal atoms, which create a positively charged wake behind the electron. This wake can attract another nearby electron.



### COOPER PAIRS

The two electrons form a weak bond, called a Cooper pair, which encounters less resistance than two electrons moving separately. When more Cooper pairs form, they behave in the same way.



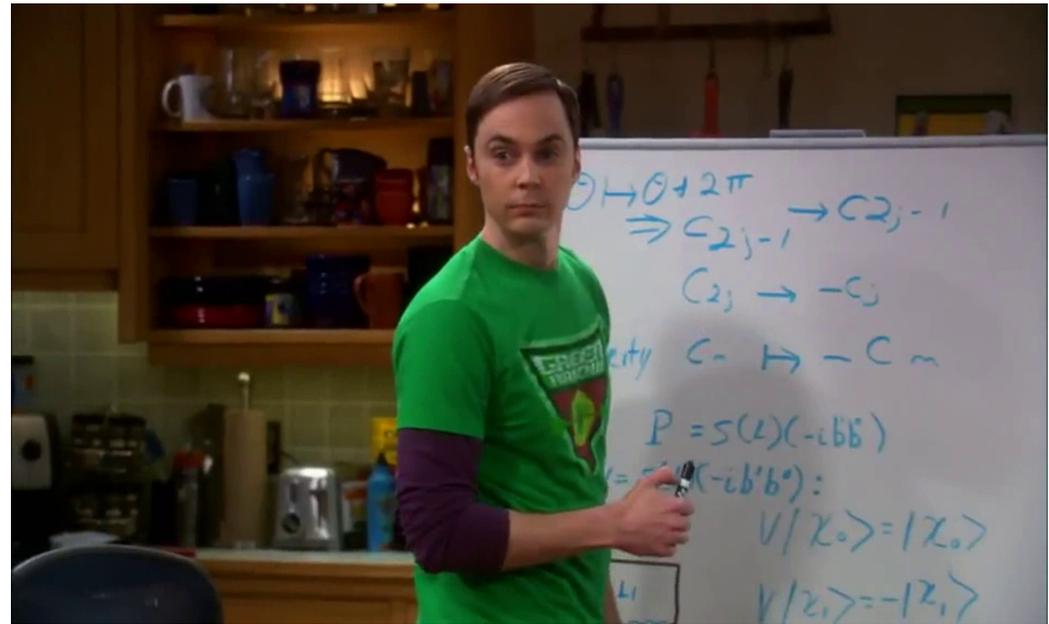
### SUPERCONDUCTIVITY

If a pair is scattered by an impurity, it will quickly get back in step with other pairs. This allows the electrons to flow undisturbed through the lattice of metal atoms. With no resistance, the current may persist for years.

# Superconduttività

Spiegato in modo un pò più teorico...

Al di sotto della temperatura critica le coppie di Cooper, occupando uno stesso stato quantico, formano un «condensato di bosoni» e, pertanto, tendono a muoversi tutti coerentemente nella stessa direzione e con la stessa velocità.



La teoria quantistica rappresenta questo comportamento con una sola funzione d'onda, che descrive il moto coerente di milioni di coppie di Cooper. Sotto l'effetto di una differenza di potenziale applicata dall'esterno al superconduttore, la funzione d'onda si «mette in moto» e, così, tutte le coppie di Cooper sono obbligate a muoversi con la medesima quantità di moto.

Per perturbare il moto della funzione d'onda sarebbe necessario cambiare di uno stesso ammontare la quantità di moto di tutte le coppie, applicando a tutte la stessa forza; ciò però non può accadere nelle interazioni casuali dei singoli elettroni con gli ioni del reticolo. In definitiva, il condensato di coppie di Cooper continua a muoversi indefinitamente attraverso il reticolo senza incontrare resistenza e il materiale si comporta, se la temperatura è abbastanza bassa, da superconduttore.

# Superconduttività

Una tipica applicazione di questo tipo riguarda la realizzazione dei grandi toroidi dei sistemi clinici di risonanza magnetica nucleare.

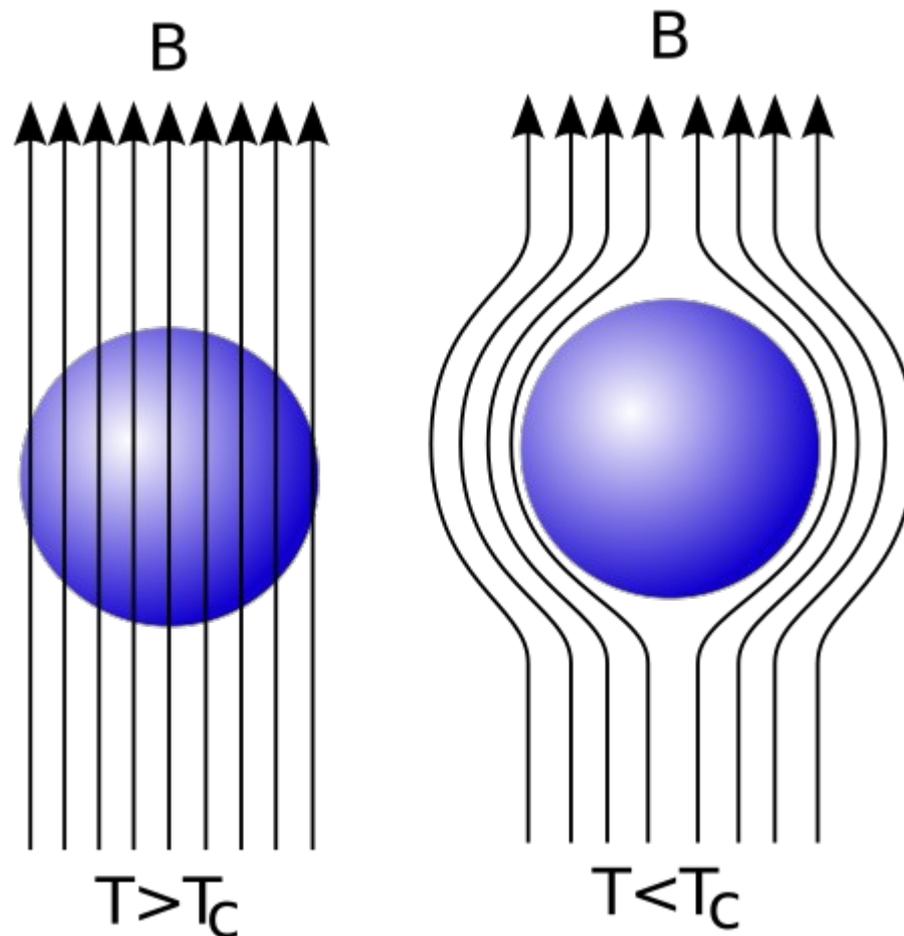
I superconduttori sono stati usati in condizioni sperimentali anche su grande scala in grandi macchine come gli acceleratori del CERN dove sono in gioco enormi flussi di corrente ed enormi campi magnetici.

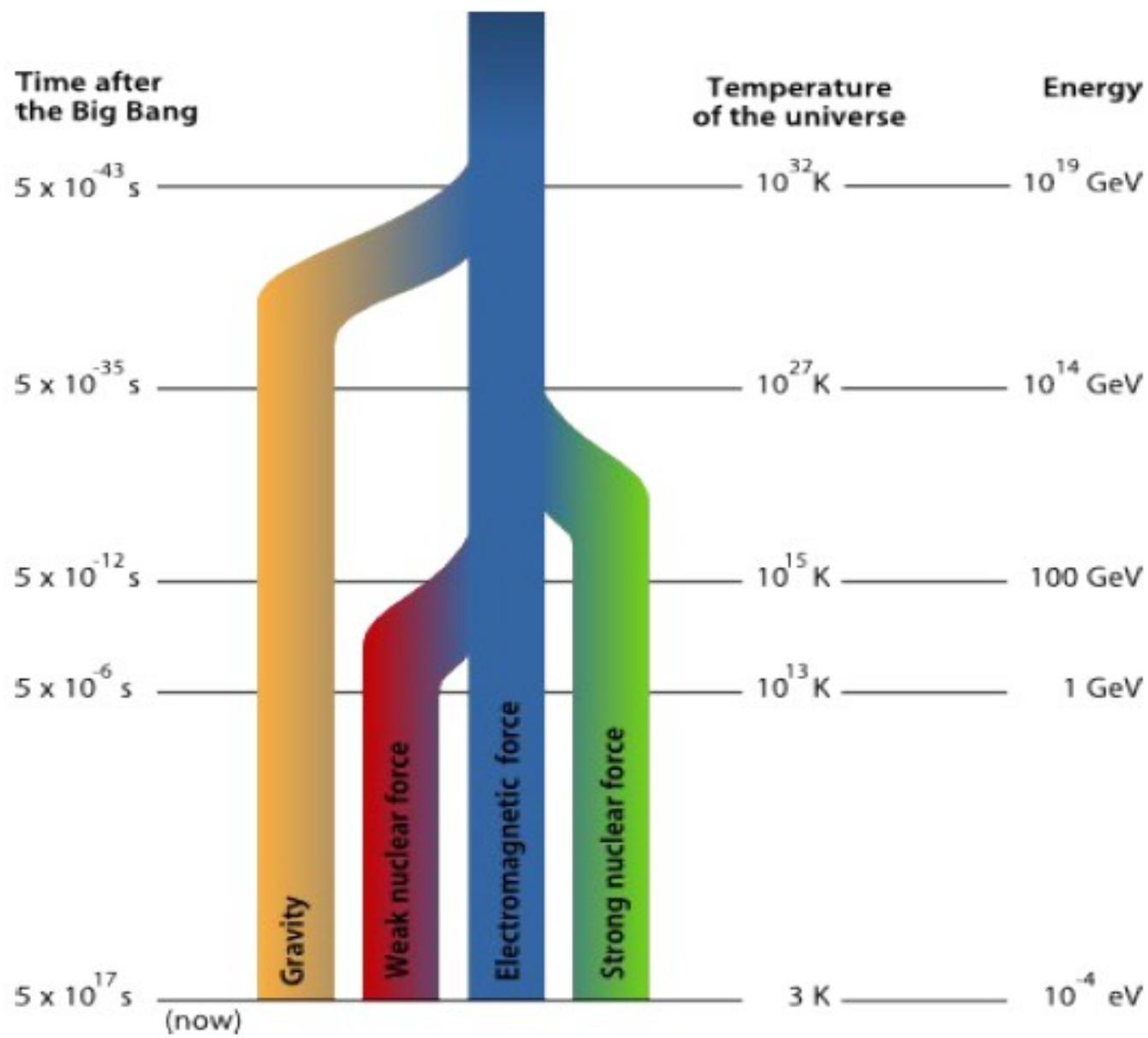


# Superconduttività

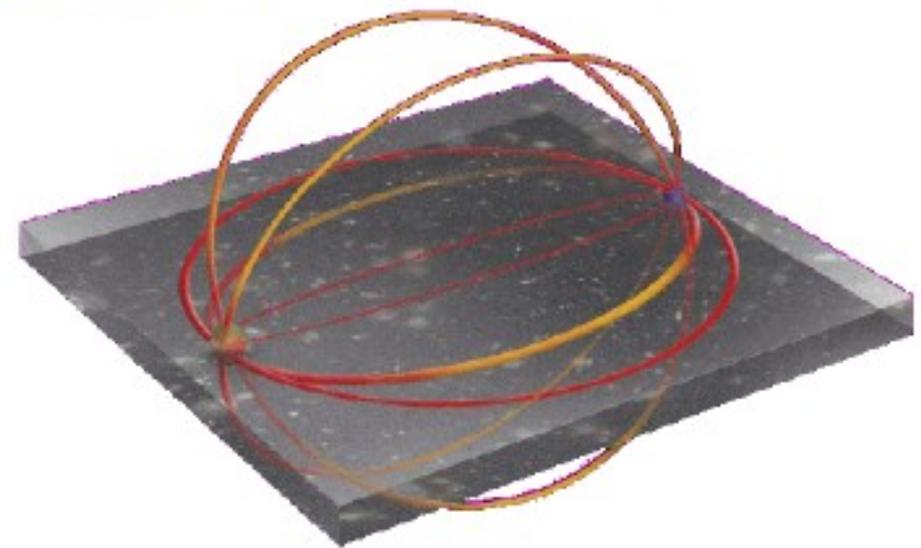
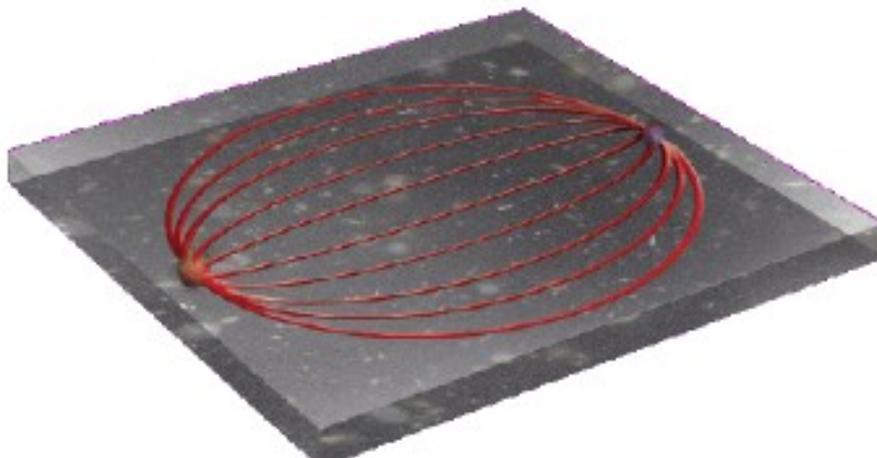
# Superconduttività

Alcuni superconduttori inoltre espellono (completamente o in parte) i campi magnetici presenti al loro interno (Effetto Meissner).

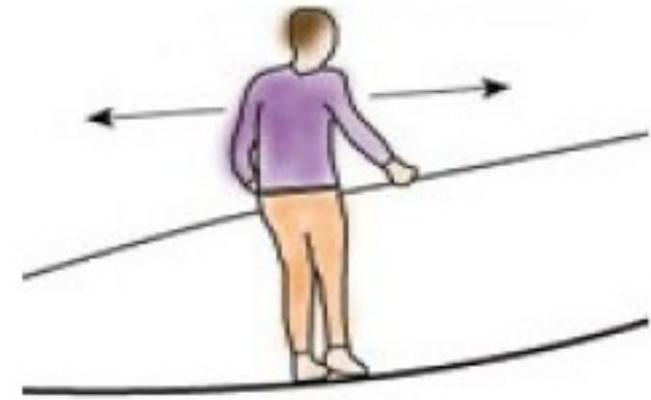
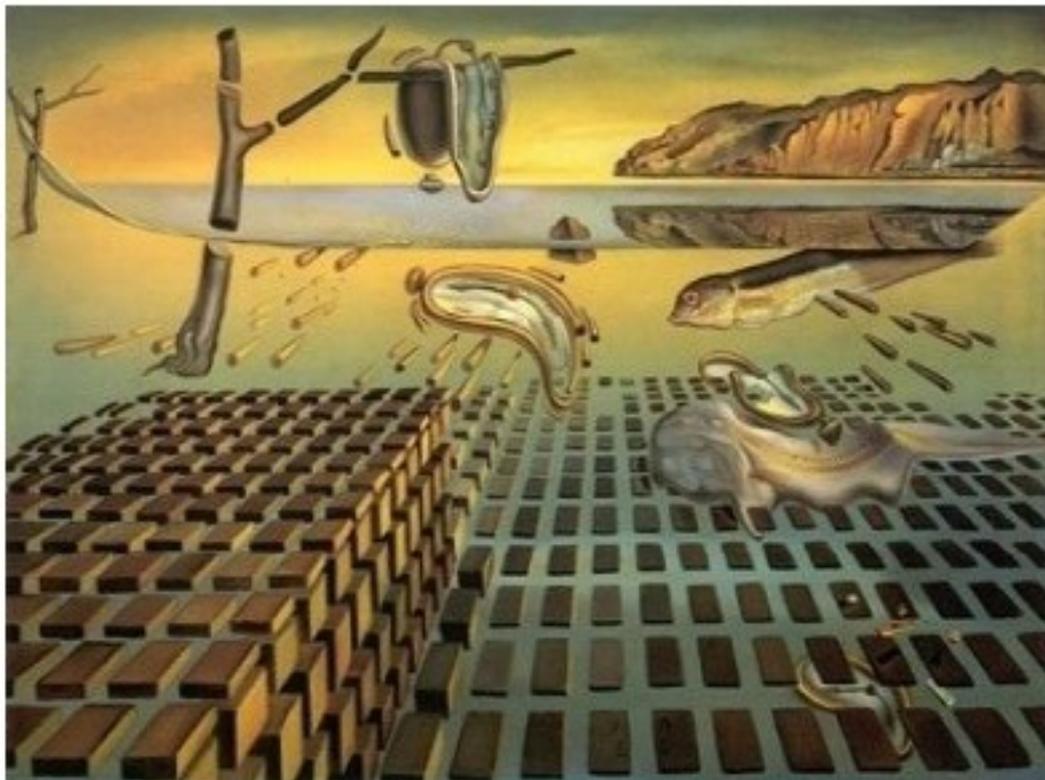




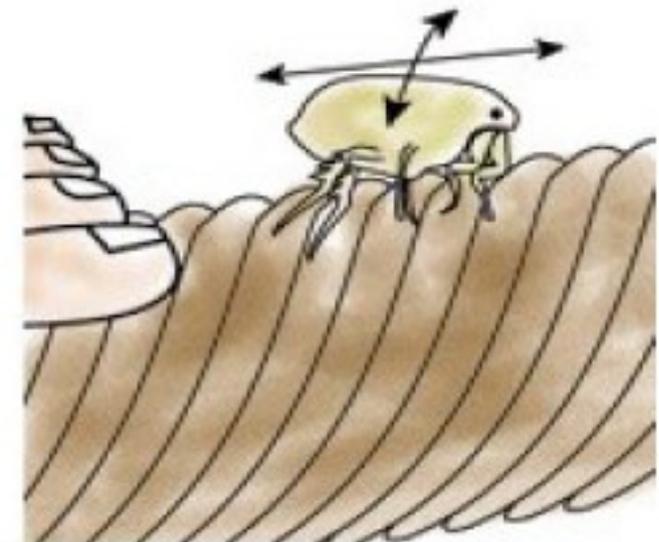
- La teoria delle stringhe prevede 11 dimensioni che potrebbero spiegare la debolezza della forza gravitazionale
  - Un piccolo magnete è più forte della gravità di tutta la terra
- Ipotesi:
  - Le altre forze sono confinate in 3D
  - La gravità si distribuisce invece in tutte le dimensioni indebolendosi



- Dove sono queste dimensioni addizionali?
  - Sono avvolte su loro stesse e noi non possiamo avvertirle



**An acrobat can only move in one dimension along a rope..**



**...but a flea can move in two dimensions.**

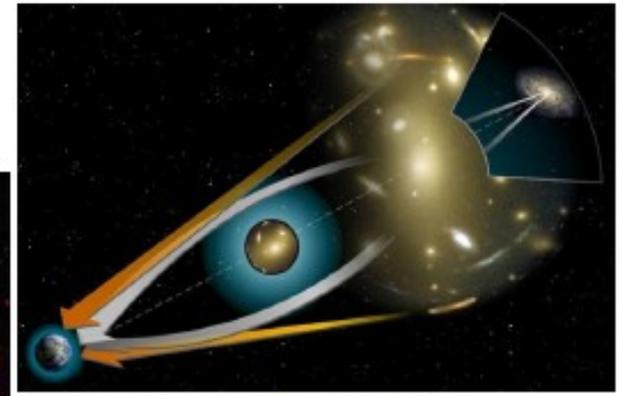
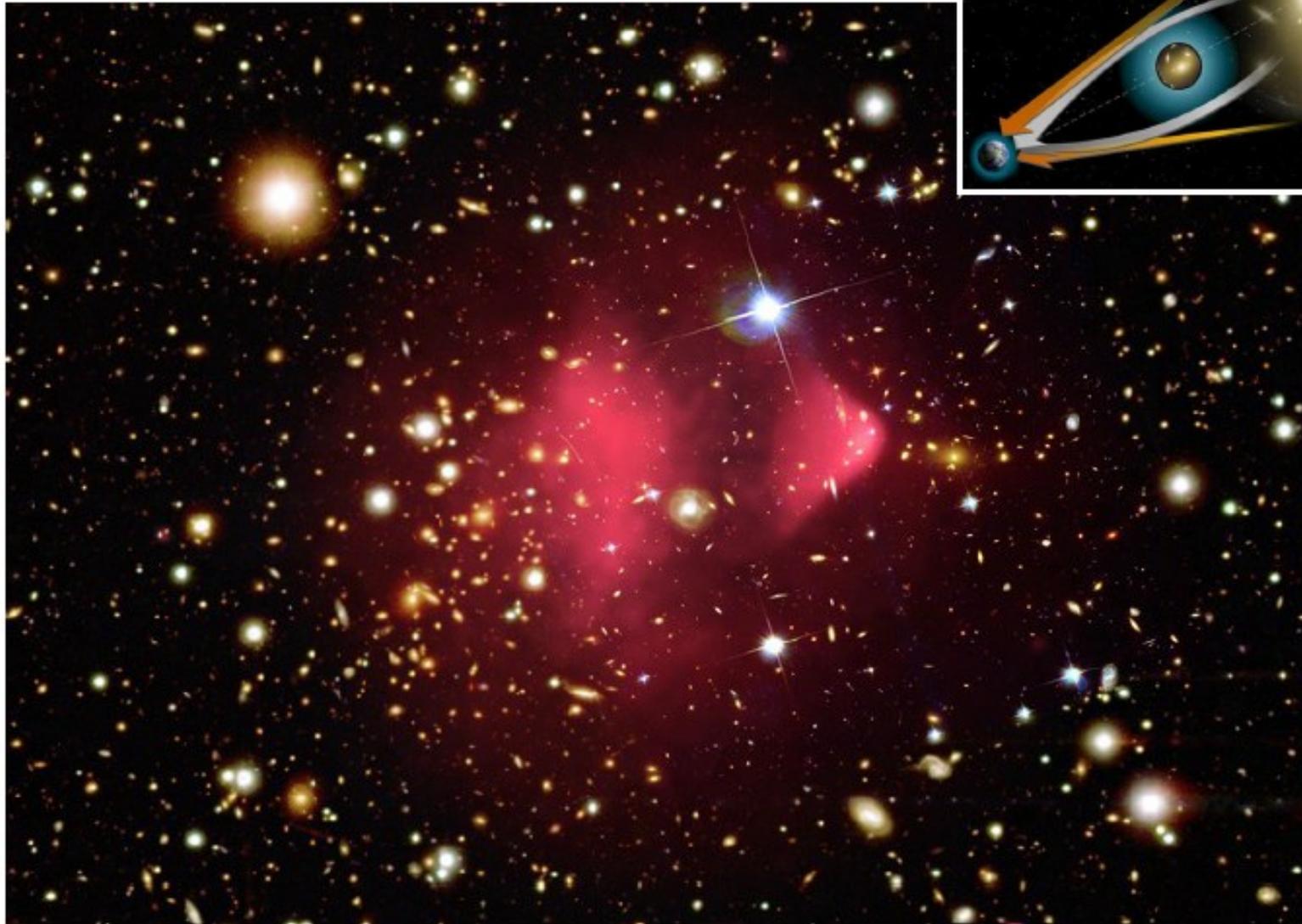
# Materia oscura: la nuova prova

- Ci viene fornita da un incidente frontale galattico

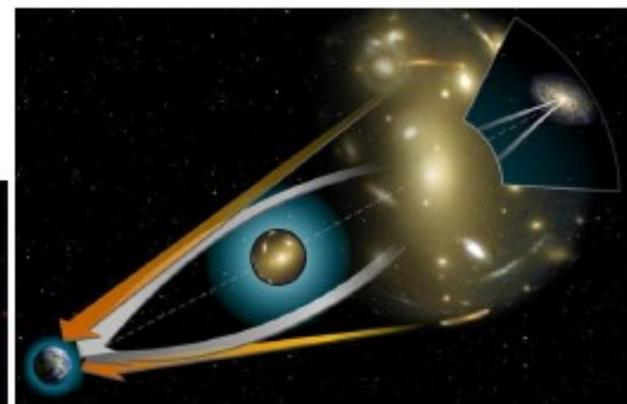
# La prova: eccola



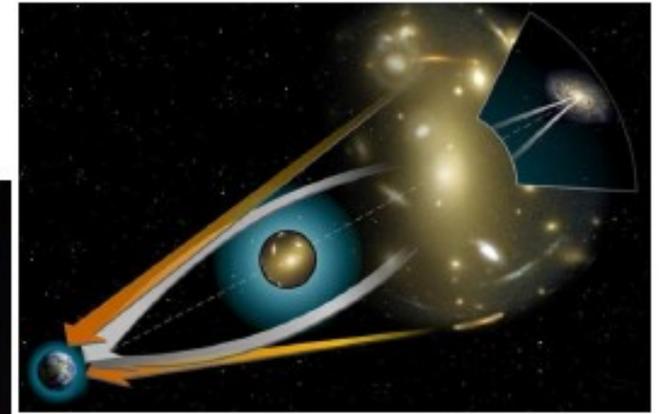
In rosso: materia ordinaria



# In blu: la massa



# Massa / Materia ordinaria



# Massa / Materia ordinaria

