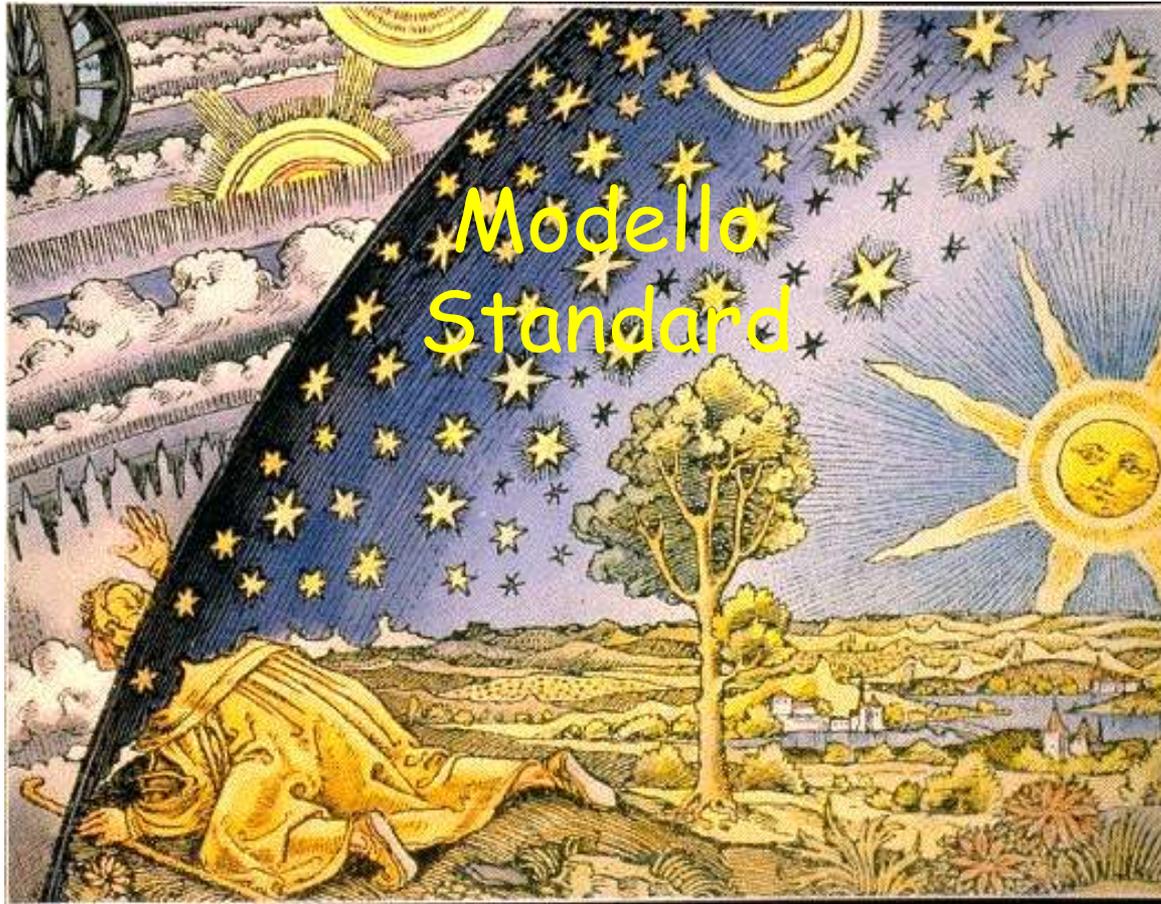


Capitolo 15

Oltre il Modello Standard

Carlo Dionisi,
AA 2012-2013, Corso FNSN II

Terra Incognita



Incisione su legno da autore ignoto. Appare la prima volta nell'edizione del 1888 di " L'Atmosphere " in un articolo dell'Astronomo Camille Flammarion (1842-1925).

Introduzione

(tratta da una presentazione di Gian Francesco Giudice)

L'esistenza del bosone di Higgs trova le sue radici nelle proprietà della forza debole – la forza che permette le reazioni termonucleari che alimentano il sole. Questa forza mostra la strana caratteristica di comportarsi in modo diverso se vista attraverso uno specchio (o, più precisamente, se si considera un processo in cui s'invertono le tre coordinate spaziali). Poiché la massa risulta identica in un mondo speculare, esiste un'apparente incompatibilità tra le proprietà di simmetria della forza debole e le masse di alcune particelle elementari, un fenomeno detto "rottura di simmetria". Per riconciliare questi due aspetti contrastanti, i fisici già da tempo sapevano che doveva esistere un nuovo elemento in natura associato alla rottura di simmetria e il bosone di Higgs era la spiegazione più plausibile.

Già prima della scoperta, molti fisici erano pronti a scommettere sull'esistenza del bosone di Higgs. Eppure nessuno si sarebbe stupito se le proprietà della nuova particella si fossero rivelate molto diverse da quanto misurato dagli esperimenti dell'LHC. La teoria del bosone di Higgs, infatti, può essere deformata in modo abbastanza arbitrario, al contrario di quanto avviene per le altre particelle fondamentali. Nello schema rigoroso ed elegante del Modello Standard – la teoria che descrive le particelle elementari e le forze con cui interagiscono – il bosone di Higgs è un elemento aggiuntivo necessario, ma precario e insoddisfacente. È la nota stonata in un concerto sublime.

I fisici teorici sono convinti che il bosone di Higgs non possa essere la fine della storia, ma solo una prima manifestazione di un mondo ancora sommerso. Per conoscere cosa si nasconde dietro il bosone di Higgs è necessario misurarne le proprietà con grande precisione. L'intensa fase di presa dati nelle collisioni tra protoni all'LHC, durata fino al dicembre 2012, ci ha già permesso, come visto nel capitolo 14, di indagare le caratteristiche della nuova particella.

L'intento è capire se le predizioni del modello più semplice di bosone di Higgs sono perfettamente azzeccate o se segnali di nuovi fenomeni cominciano a manifestarsi.



segue

La scoperta del bosone di Higgs ha fornito alcune risposte, ma ha aperto un gran numero di domande. La questione sul bosone di Higgs che più ha fatto meditare i fisici negli ultimi decenni è il cosiddetto "**principio di naturalezza**".

In soldoni, questo principio decreta che una teoria fisica valida in un certo intervallo di distanze non può essere sensibile in modo critico ai dettagli del comportamento della natura fino a distanze arbitrariamente piccole. In pratica, questa separazione tra diverse scale di distanza ci permette di trovare equazioni che descrivono le orbite dei pianeti, anche senza conoscere il moto di ogni singola molecola dentro Giove o Venere; ci permette di formulare una teoria atomica anche senza le equazioni che descrivono la struttura interna dei quark; e così via. Per quanto ne sappiamo, questo principio sembra rispettato nel nostro universo. Se continuasse a valere anche alle distanze ora esplorate dall'LHC, il principio di naturalezza avrebbe profonde implicazioni sulla natura del bosone di Higgs.

Il bosone di Higgs ha la particolarità di subire effetti quantistici che lo rendono vulnerabile al comportamento della teoria fino a distanze arbitrariamente piccole. Questa estrema sensibilità contraddice il principio di naturalezza, creando un ostacolo concettuale che si può aggirare solo se il bosone di Higgs è accompagnato da opportuni fenomeni capaci di smorzare gli effetti quantistici. Per questa ragione molti fisici teorici sono convinti che il bosone di Higgs faccia parte di una struttura più complessa, ancora sconosciuta.

Il filo logico suggerito dal principio di naturalezza ha guidato i fisici teorici lungo un affascinante percorso di idee, portandoli a immaginare che il bosone di Higgs sia solo l'araldo di nuove strutture nascoste dello spazio-tempo. Nel profondo della materia potrebbero esistere nuove dimensioni spaziali, nuovi tipi di forze, o addirittura una nuova concezione di spazio, come previsto dalla supersimmetria. Al momento non ci sono prove tangibili dell'esistenza di queste ipotetiche strutture, ma i fisici tengono il fiato sospeso nell'attesa che l'LHC potenzi la sua capacità esplorativa, raddoppiando l'energia dei fasci di protoni, in una fase prevista a partire dalla fine del 2014.



segue

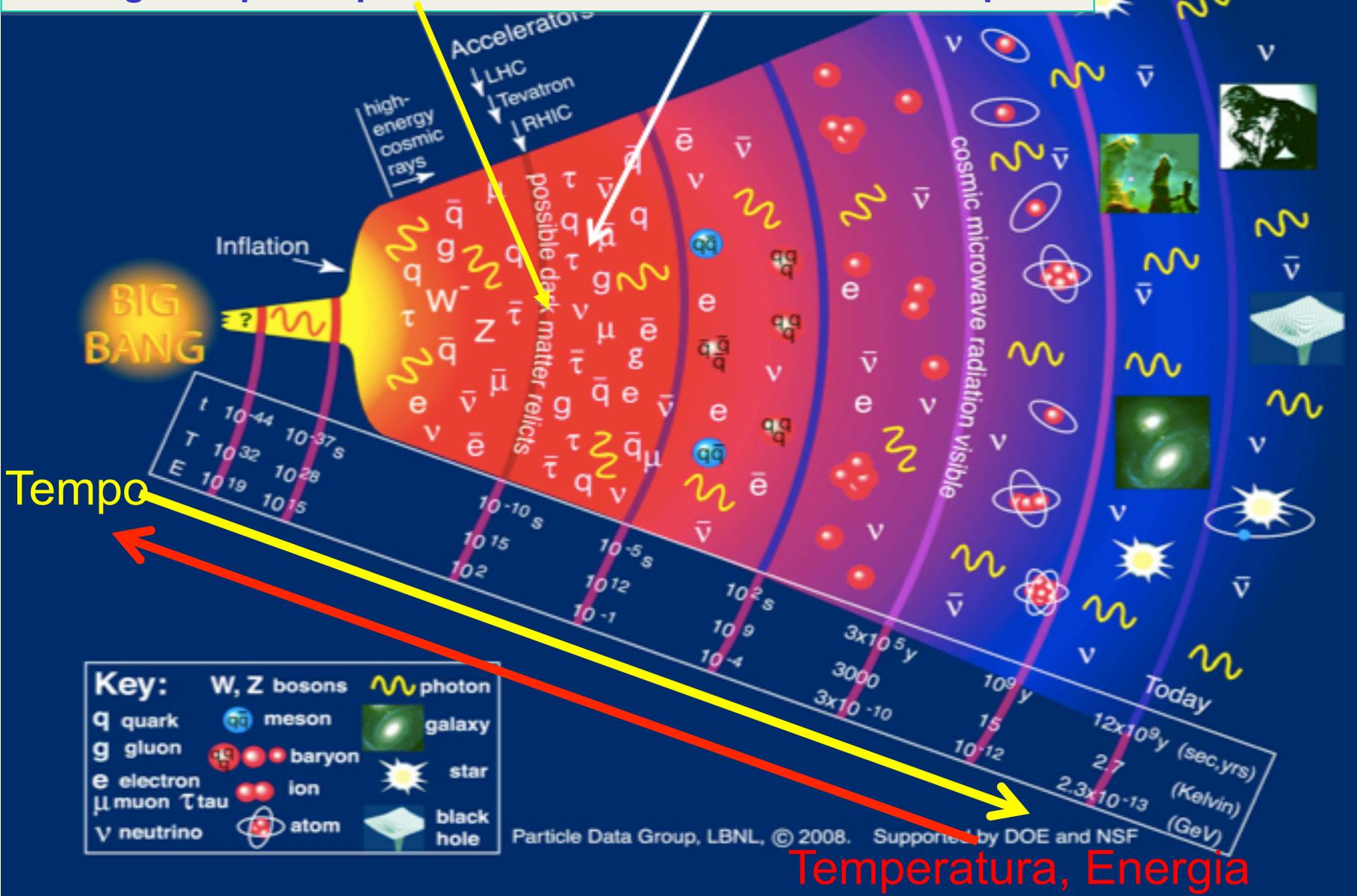
I risultati in nostro possesso ci stanno già fornendo dei primi indizi interessanti. I dati sperimentali mostrano che la massa del bosone di Higgs è tra 125 e 126 GeV, cioè circa quanto un intero nucleo di cesio. Recenti calcoli teorici hanno messo in luce una sorprendente coincidenza. Se il Modello Standard fosse valido anche a distanze ben più piccole di quelle finora esplorate, una massa del bosone di Higgs tra 125 e 126 GeV corrisponderebbe esattamente al minimo valore necessario per evitare che il nostro universo collassi in un enorme grumo massiccio. In altre parole, la massa del bosone di Higgs ha proprio il valore giusto per mantenerci in bilico sull'orlo di un'apocalisse cosmica. Secondo alcuni fisici teorici, questa singolare coincidenza potrebbe essere la manifestazione dell'esistenza di una moltitudine di universi paralleli, il cosiddetto "multiverso" (contrapposto cioè all'universo). Nel multiverso è raro trovare un universo che permette le caratteristiche necessarie alla vita e quindi, per motivi statistici, quelle caratteristiche sono soddisfatte nel nostro universo solo marginalmente. Questa potrebbe essere la spiegazione del perché la massa del bosone di Higgs è prossima a quel valore critico oltre al quale il nostro universo è condannato a una catastrofica transizione di fase.

Non c'è dubbio che la scoperta del bosone di Higgs sia stata una tappa fondamentale nel nostro cammino verso la conoscenza dei principi fisici che governano il nostro universo. Tuttavia, questa scoperta non ha dato tutte le risposte che cercavamo per comprendere il fenomeno della rottura di simmetria. Il bosone di Higgs fornisce solo una spiegazione rozza e incompleta, che non possiede l'eleganza presente nel resto del Modello Standard. Tutto sembra far credere che oggi i fisici siano nella stessa situazione dell'archeologo che festeggia il ritrovamento di alcune pietre, non sapendo ancora che sotto c'è un'intera piramide.



Nel seguito vengono elencate *“le questioni”* a cui non e' ancora stata data risposta nell'ambito della fisica fondamentale.

Storia dell'Universo: collisioni protone-protone a LHC, corrispondono alle condizioni in tempo, temperatura ed energia di questo punto. LHC e' una macchina del Tempo !



Elementary Particles and Small Distance and Early Universe

Early universe: high temperature T

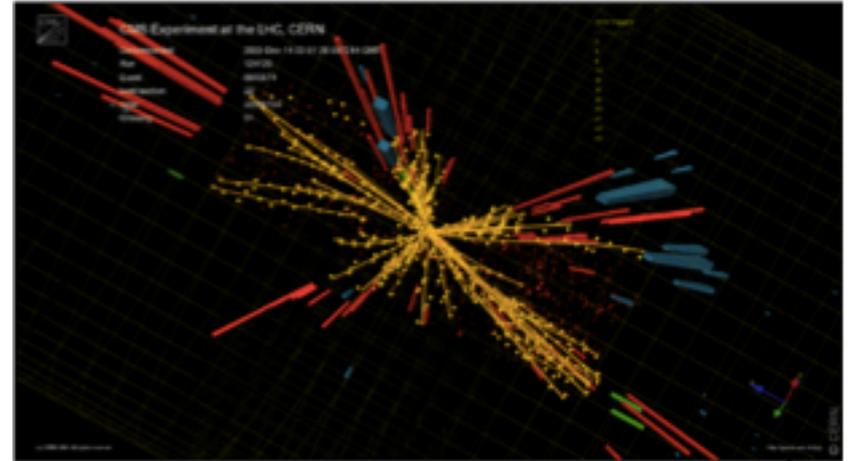
High energy $E = kT$

High momentum $p = E/c$

Small distance $x = \hbar/p$

Early universe: elementary particles play important roles

Guardando indietro nel tempo

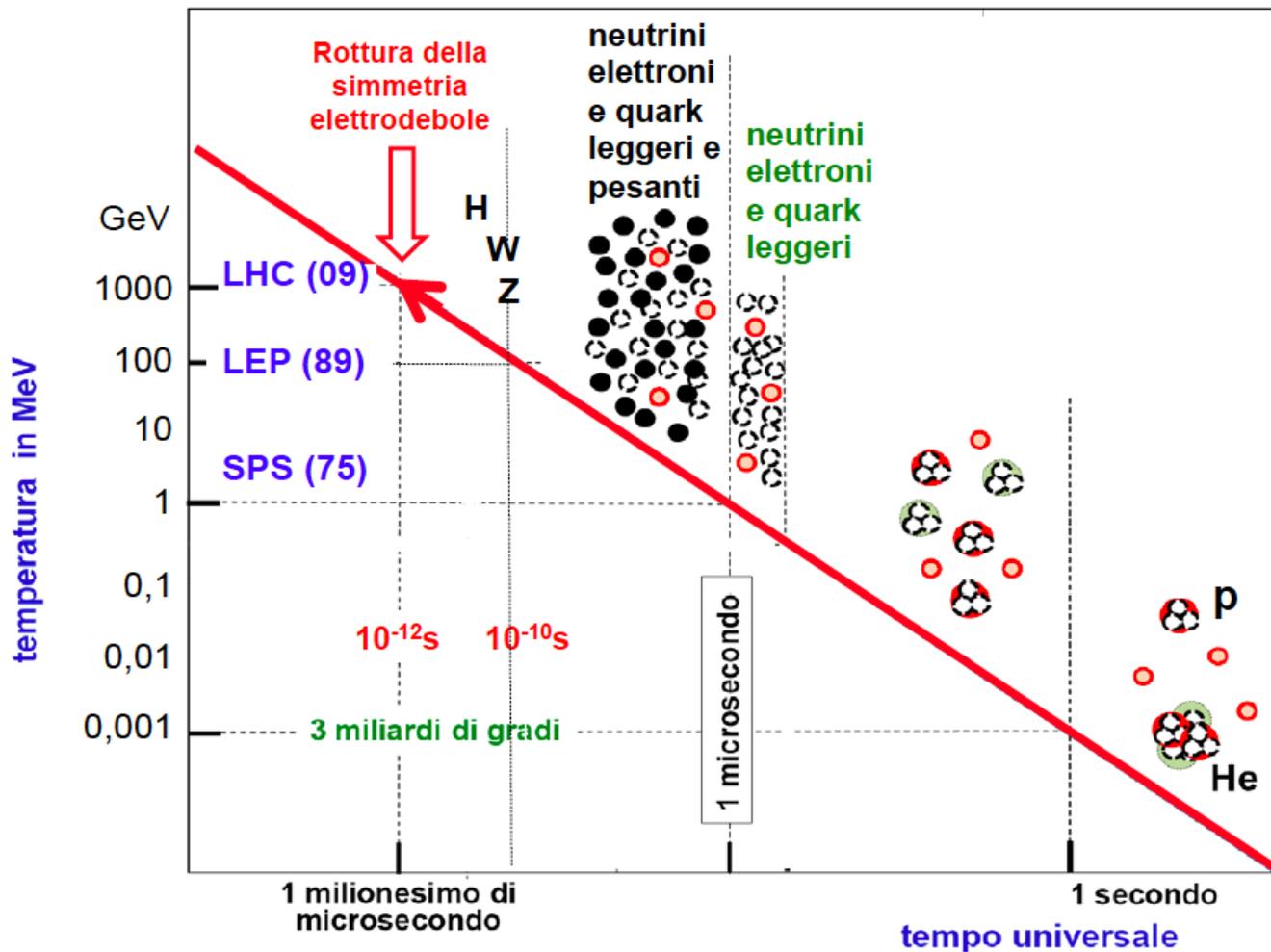


In una regione microscopica di spazio, creiamo interazioni che corrispondono a una temperatura un milione di volte più alta di quella del centro del sole.

Questa temperatura corrisponde a quella presente nell'universo un miliardesimo di secondo DOPO il Big Bang.

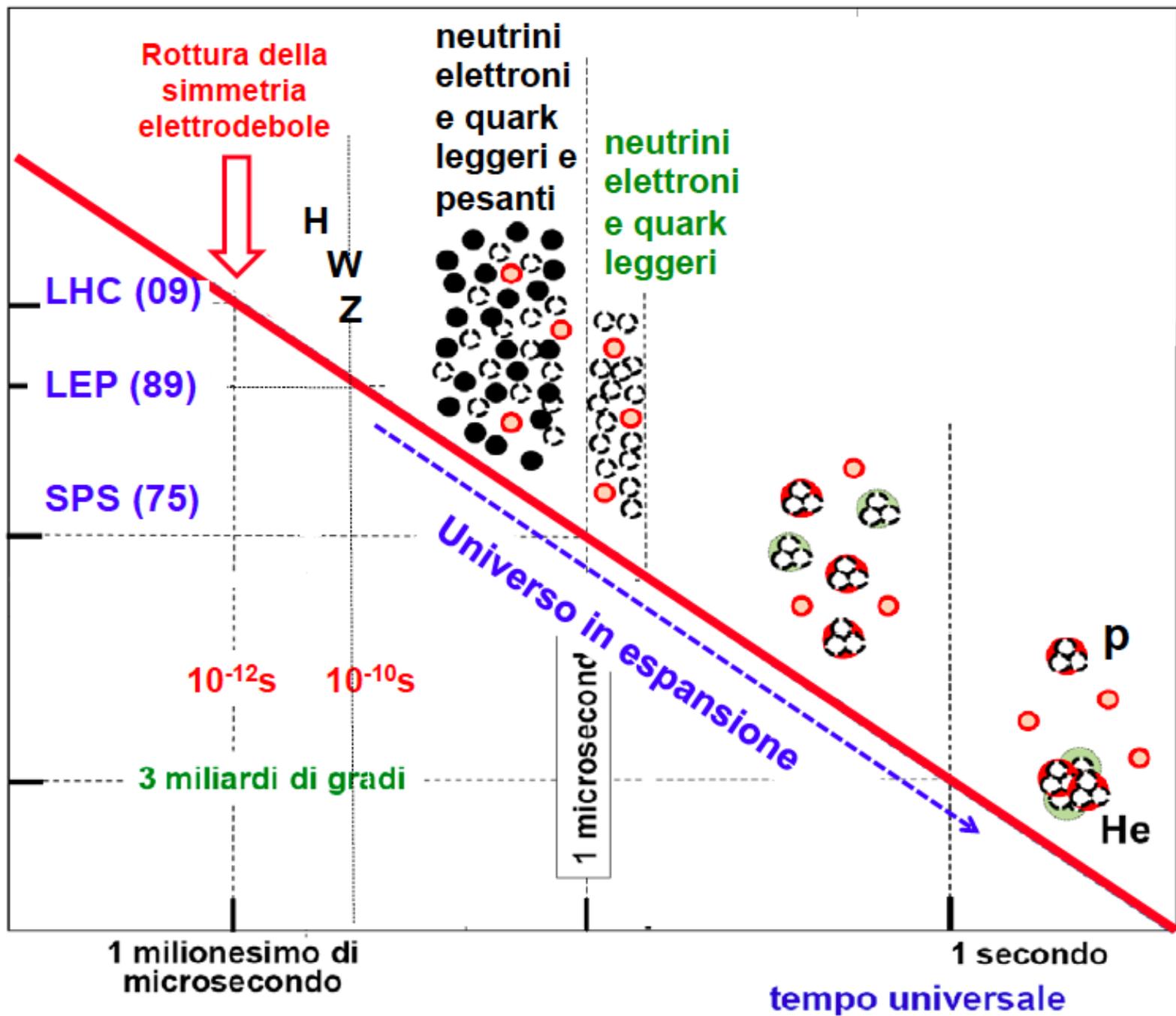
Ripetiamo che 1 TeV corrisponde all'energia di una zanzara che vola **MA** concentrata in una regione di spazio 10,000 miliardi di volte più piccola. Una ENORME DENSITA' di Energia !!

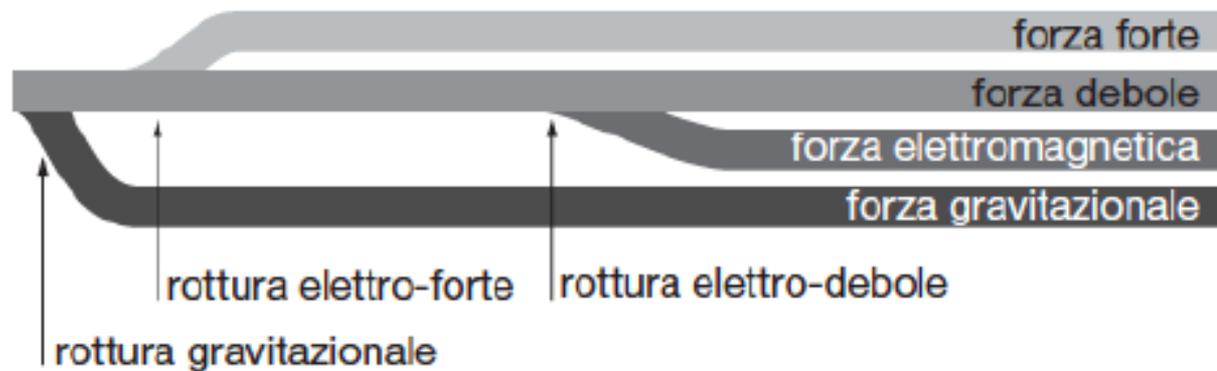
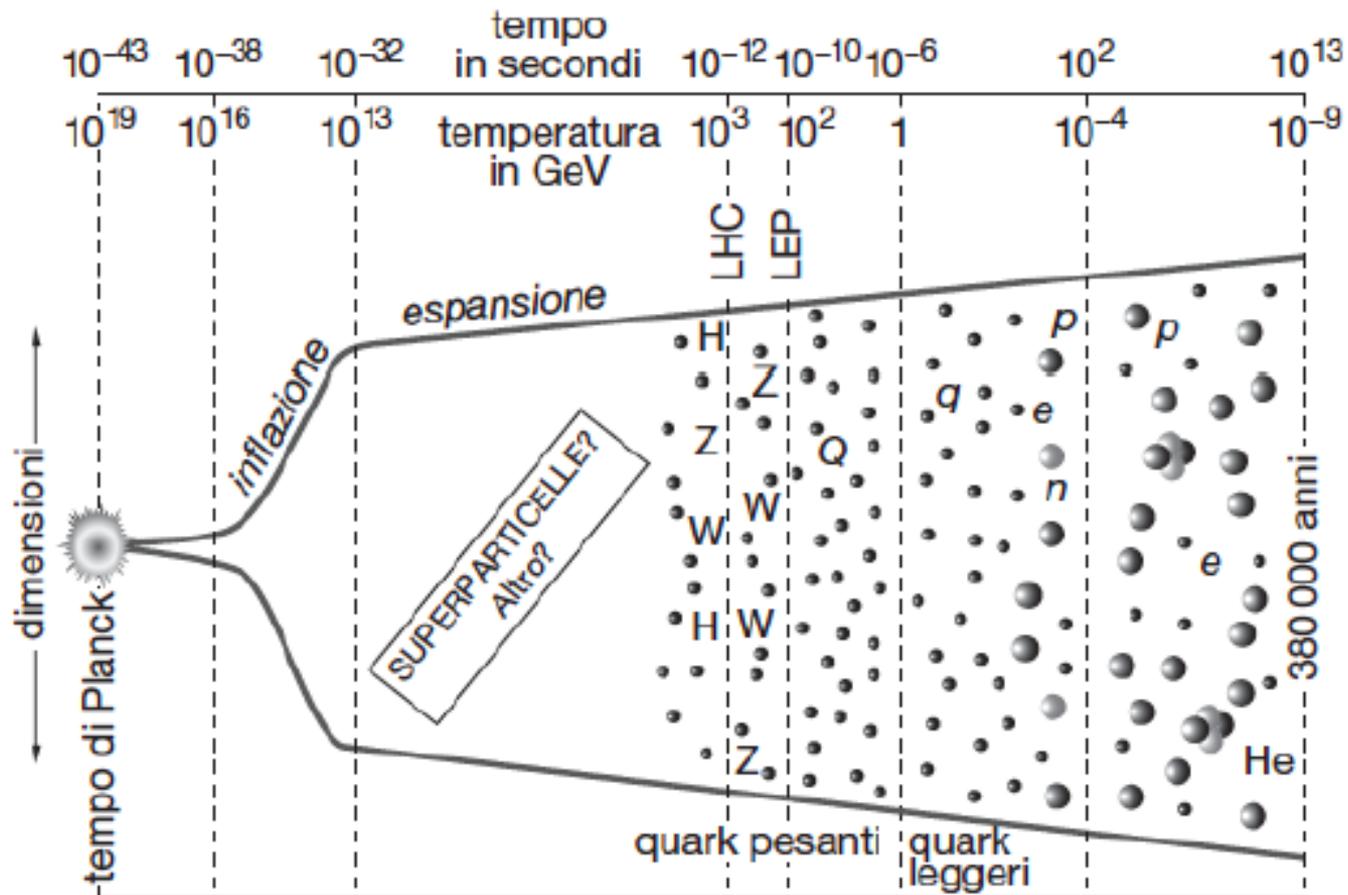
Il CERN risale il percorso del tempo universale



Ugo Amaldi
Sempre più veloci

temperatura in MeV





La materia oscura nelle collisioni delle galassie



La galassia ha una componente visibile e una oscura che interagisce solo per gravità.

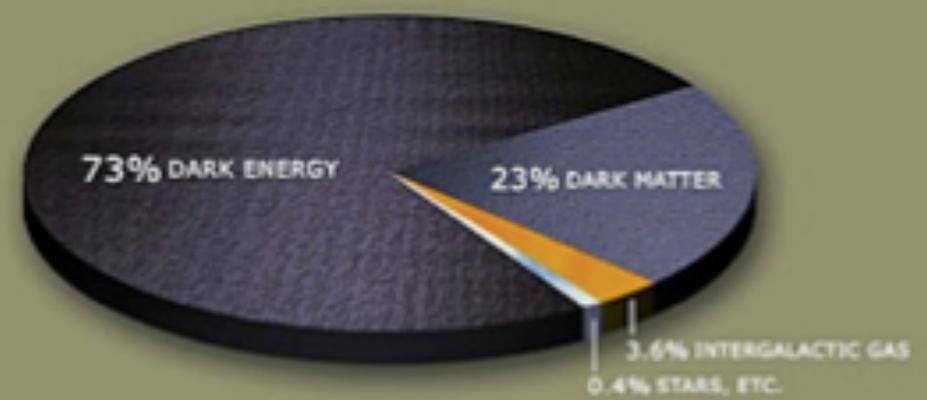
Le collisioni tra galassie potrebbero rivelare diversi tipi di interazioni tra la materia oscura e quella visibile che interagisce elettromagneticamente.

Oggi ci sono alcuni candidati per la materia oscura, per esempio dalle teorie SUSY.

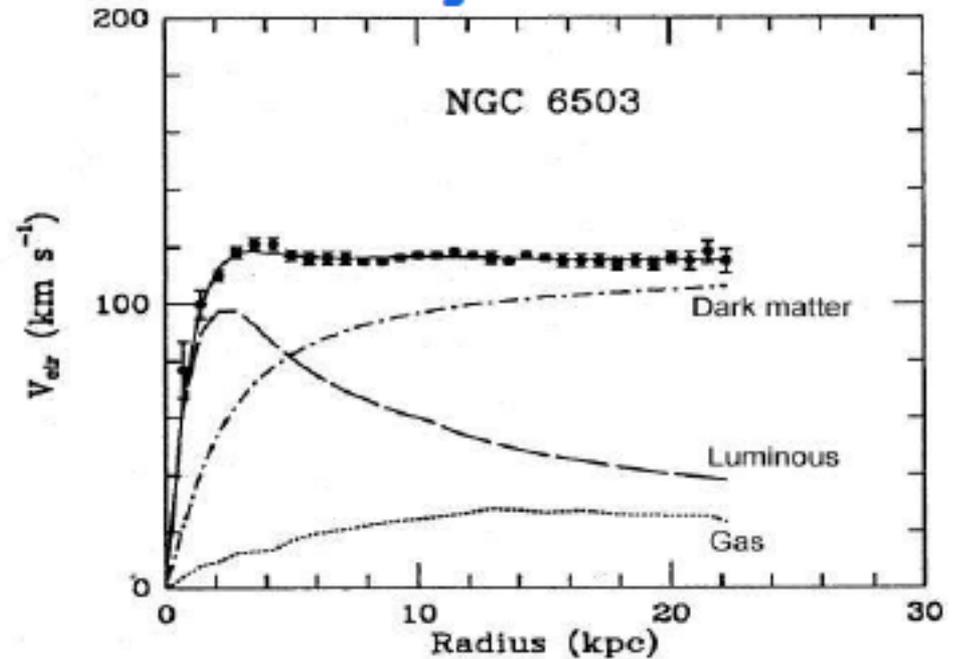
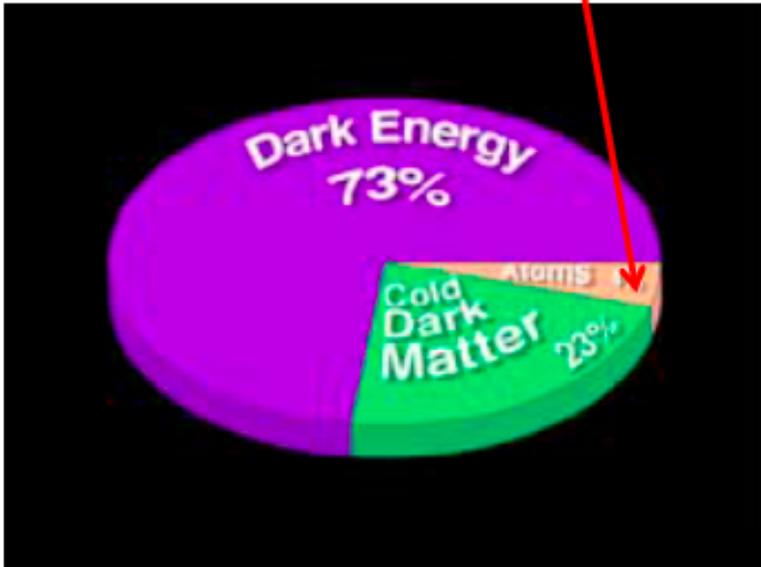
Conosciamo meno del 5% della materia che compone l'Universo ! Cosa e' la Materia Oscura ?



Le galassie hanno una velocita' di rotazione troppo grande rispetto alla forza gravitazionale delle stelle. Ci deve essere una materia gravitazionale che non emette radiazione: **La Materia Oscura** NON prevista nel MS



You are here



There is no known candidate for Dark Matter. Dark Matter is a stable, neutral relic particle from the earliest moments after the Big Bang – wonderful new physics.

NOTA

Recenti misure di precisione della radiazione di fondo cosmico e misure di astrofisica, confermano che circa il 20% della massa dell'universo è in forma di “Materia Oscura: Dark Matter (DM)”. Si tratta di materia che non si riesce a osservare direttamente né con le tecniche convenzionali della astrofisica né, a oggi, negli esperimenti di fisica delle particelle.

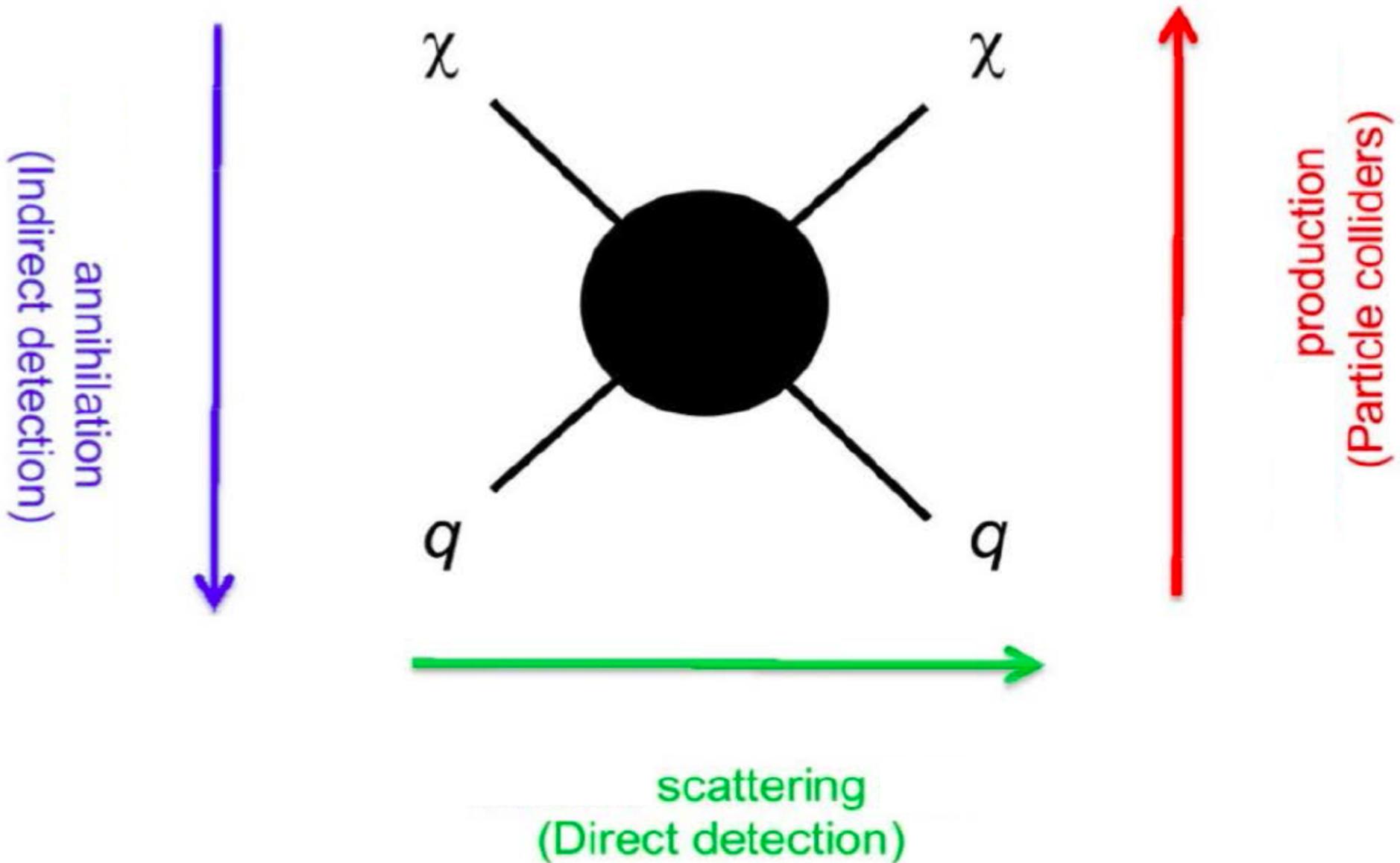
Questi risultati sono inoltre in ottimo accordo con quelli ottenuti dalle supernove e dalle curve di rotazione delle galassie spirali.

In fisica delle particelle ci sono modelli, come quello della Supersimmetria, che prevedono candidati (SUSY) che possono spiegare in modo naturale la esistenza della materia oscura. E' quindi molto importante studiare a LHC stati finali caratterizzati dalla presenza di Particelle Z + grande energia mancante stati legati appunto alla produzione di possibili candidati di materia oscura.

Questi processi . chiamati di electroweak Bremsstrahlung, sono caratterizzati da coppie di elettroni o muoni in eventi di grande energia mancante. Con lo studio complementare delle particelle SUSY, come i neutralini, LHC avrà' un ruolo determinante nella scoperta e nella comprensione della materia oscura.

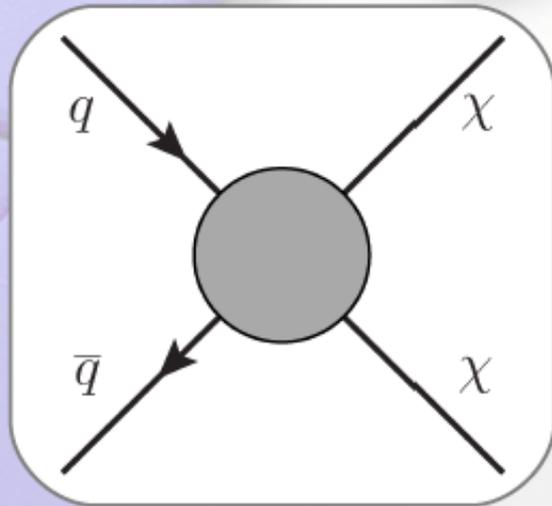
Il confronto con gli esperimenti di astrofisica come FERMI, DAMA e AMS sarà inoltre cruciale nella misura della presenza e della identità' della DM.

Come rivelare la Materia Oscura

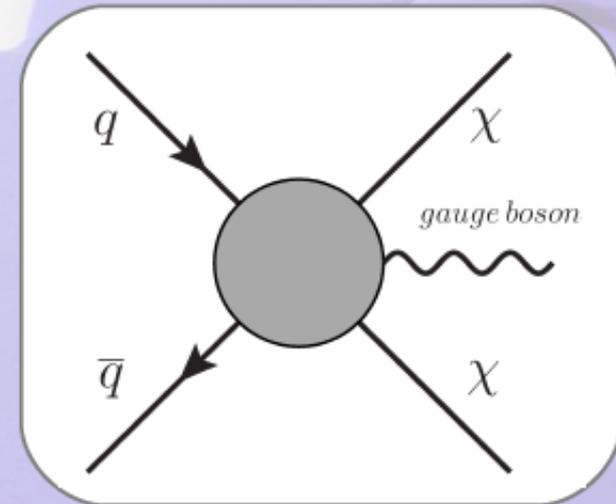


Dark Matter at the LHC

- If WIMP couples to quarks, possibility of production at LHC.



- Escape detector unseen, carries away momentum.
- Need visible final state to reconstruct missing transverse energy.



- Most generic process is the bremsstrahlung of a gauge boson off initial state or propagator.

Dark Matter visible as high p_T object + missing ET

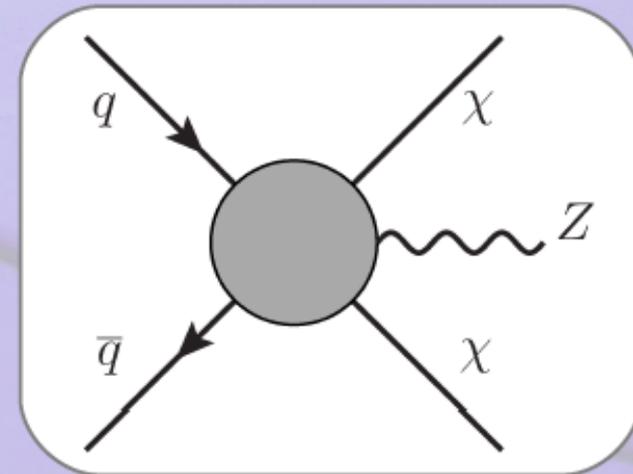
Bremsstrahlung

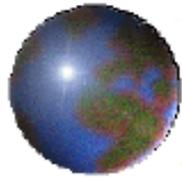
- Gluon radiation – high cross section large backgrounds (1109.4398).
- Photon – less constraining than jet searches (1204.0821).
- Interesting channels, but have high backgrounds.

Electroweak Processes

- Z – easily reconstructible invariant mass.
- Decays leptonically with a small branching fraction, has few backgrounds.

Signal: Z + missing ET





Dark Matter Searches - "Full Court Press"

Large Hadron Collider

Produce it
LHC

Cryogenic Dark Matter Search

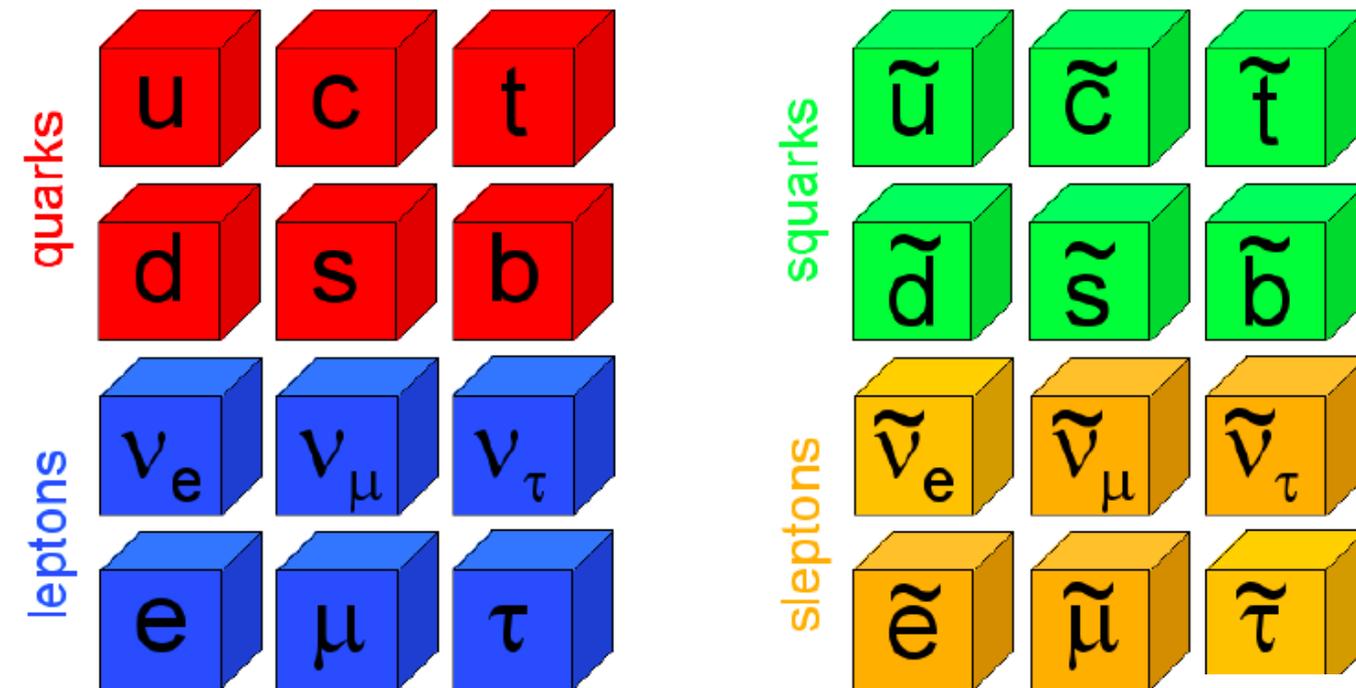
Scatter it
FNAL

Alpha Magnetic Spectrometer

Observe it
annihilate

These 3 could converge, making a tremendous scientific breakthrough

Supersymmetry: Double the whole table with a new type of matter!?



Heavy versions of every quark and lepton!

Politically Correct Dark Matter

According to the ideology that dominated past decades, the Higgs mass has a **hierarchy problem** solved by many new particles at the weak scale.

The most popular solutions are the supersymmetric sparticles. SUSY ruins B, L conservation, so theorists add a new Z_2 symmetry (R -parity, KK parity):

$$\text{SM} \rightarrow \text{SM} \quad \text{new} \rightarrow -\text{new}$$

which makes the lightest new particle stable: DM candidate if neutral!

WIMP miracle: the thermal abundance of a weak particle can reproduce $\Omega_{\text{DM}}!!$

“Neutralino” is often used as a synonymous of “Dark Matter” !!!

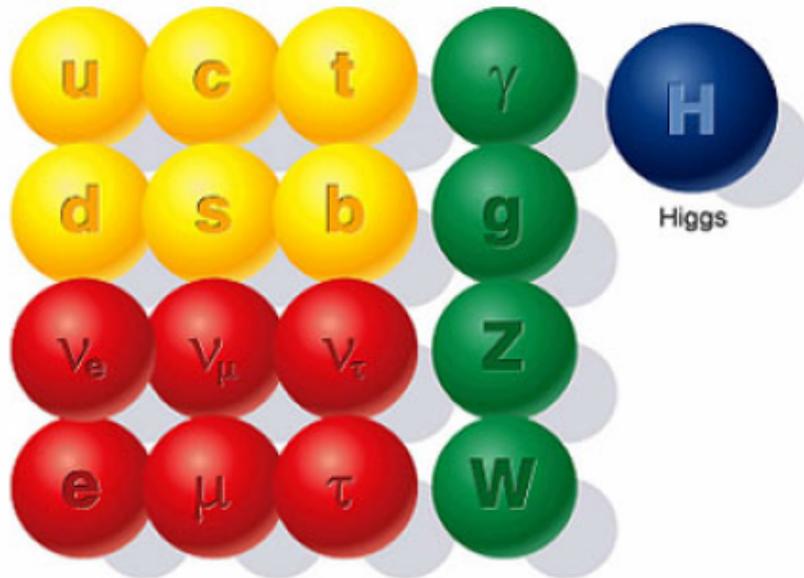
Big signals! DM is the last step of a decay chain that starts with g/\tilde{q} production

$$\tilde{g} \rightarrow g\tilde{q} \rightarrow g\ell\chi \rightarrow gllN$$

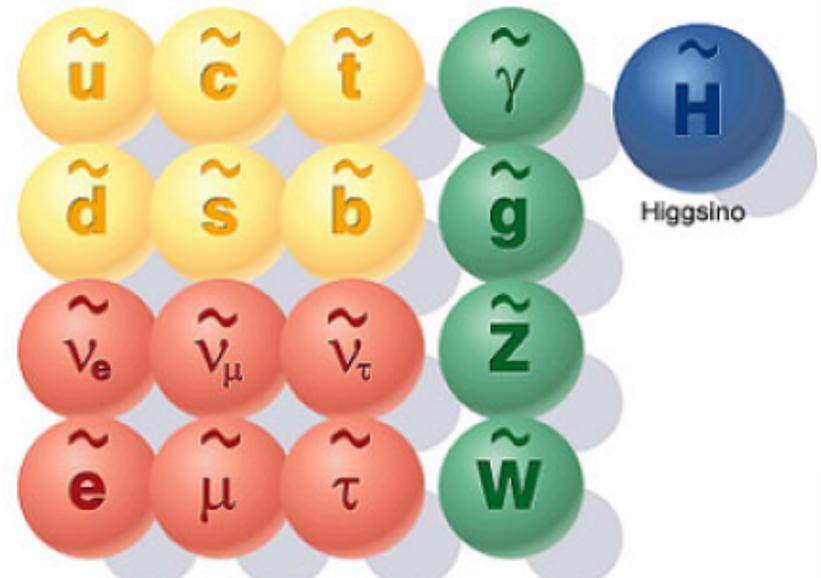
Many authors proposed kinematical variables to reconstruct intermediate masses..

But next LHC was turned on and nothing like this has been seen so far

SEEN



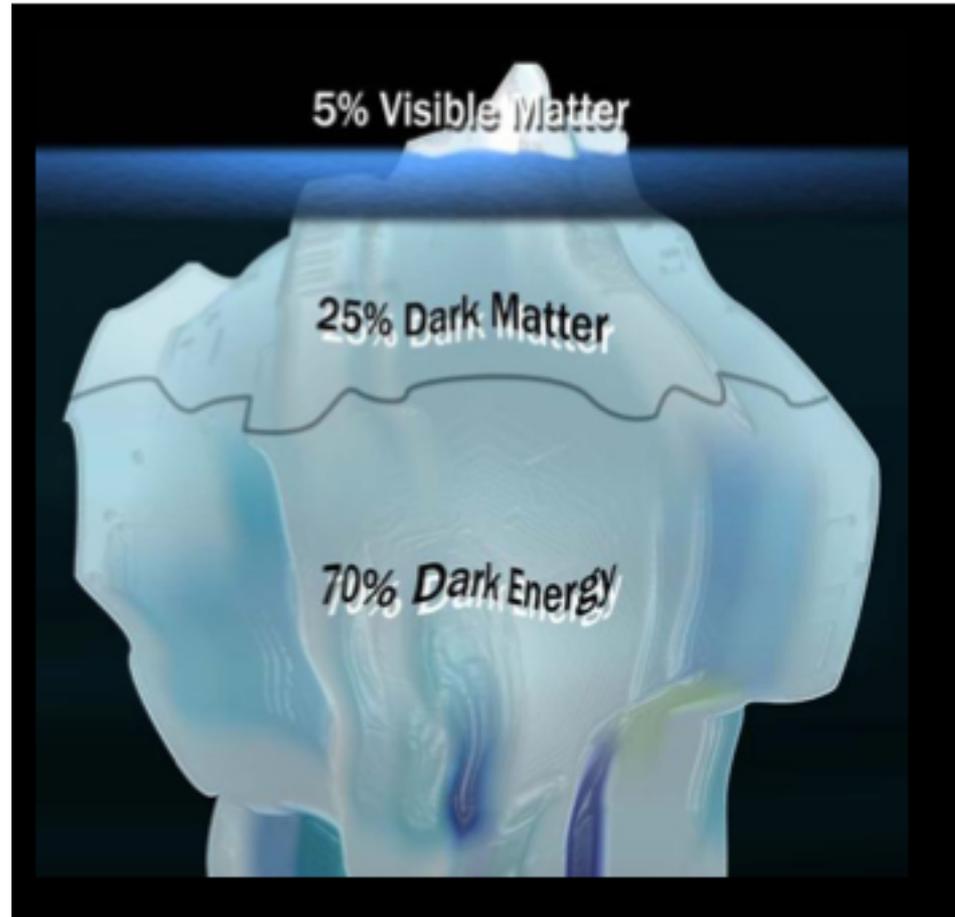
MISSING



The missing super-partner problem

Mistero: Che cosa e' l'Energia Oscura ?

L'universo si
espande
accelerando.
Perche' ?
Non ci sono
indizi !

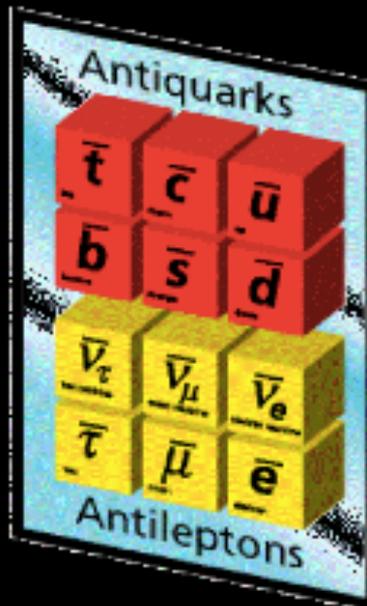


MISTERO: dove e' finita l'antimateria ?

matter
particles



antimatter
particles



Dove siamo oggi ?

- ❖ Statistica accumulata: $\approx 25 \text{ fb}^{-1}$ da ciascun esperimento.
- ❖ Determinazione di massa, BR, spin etc della nuova particella
- ❖ Determinazione degli altri canali di decadimento della nuova particella

Conclusioni

- L'annuncio del 4 di luglio 2012 ha segnato un momento epocale nella storia della Fisica delle Particelle Elementari.
- Ora stiamo analizzando le caratteristiche della nuova particella per conoscerne le sue proprietà, "DNA".
- Contemporaneamente stiamo cercando la presenza di altre nuove particelle.
- Da febbraio 2013 sono iniziati i lavori per portare LHC alla sua energia di progetto, 14 TeV, e aumentare così le sue potenzialità di scoperta.

Dopo la scoperta del Bosone di Higgs, il prossimo obiettivo sarà la scoperta della Materia Oscura: il vero ponte tra la Fisica delle Particelle e l'Astrofisica e cosmologia.

Bibliografia

- A. Bettini: Introduction to Elementary particle physics
cap 10 pag 382 - 385
- Burcham and Jobes: Nuclear and Particle Physics
cap 13 pag 507 – 524
- Ugo Amaldi: Sempre piu' veloci
- Gian Francesco Giudice: Odissea nello zeptospatio