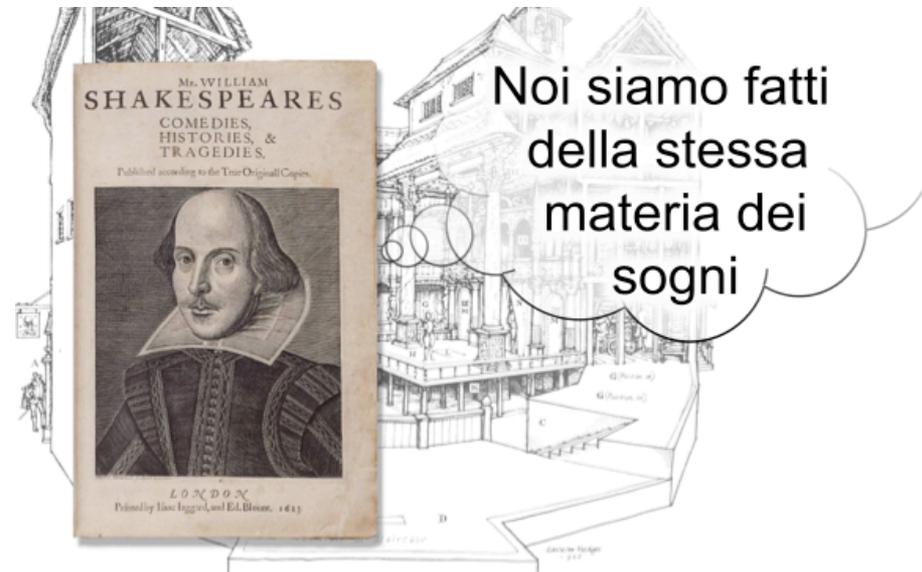


La fisica delle particelle elementari: un'introduzione

Tommaso Tabarelli

La fisica delle particelle elementari

- ▶ Di che cosa è fatta la materia che ci circonda?
- ▶ Come interagiscono – e dunque quali forze tengono assieme – i componenti della materia?



Problema

- ▶ Ciò che ci circonda è estemamente complesso e coinvolge la sovrapposizione di molti fenomeni diversi
 - ▶ Abbiamo un programma per indagare il mondo?
 - ▶ Possiamo ridurre il problema a ‘cause semplici’?
- ▶ *Le proprietà dei sistemi complessi si possono interpretare in termini delle proprietà delle parti più semplici che li compongono e delle forze che intervengono a comporli*
 - ▶ Non è sempre vero: “*Senatores boni viri, senatus autem mala bestia*”
 - ▶ *Funziona abbastanza bene in fisica e in fisica delle particelle*

Il piano programmatico!

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Non è un'identità matematica!

- ▶ **È un programma di lavoro:**
 - ▶ **c'è un'accelerazione, allora c'è una forza: trovala!**

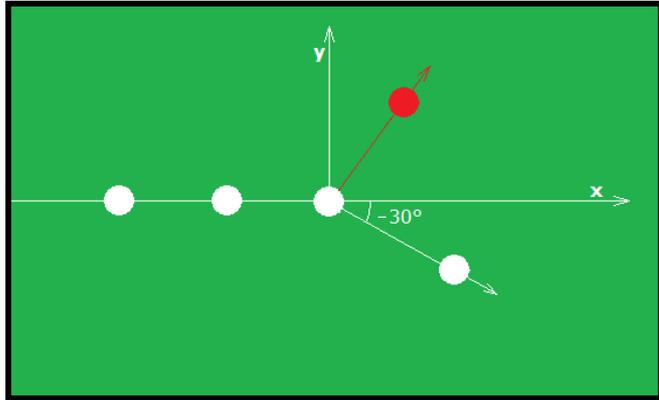
$$\vec{F} = m\vec{a}$$

LEGGI DELLA FORZA:
DESCRIVONO L'INTERAZIONE
DEL CORPO CON L'AMBIENTE

MASSA:
PROPRIETÀ DEL CORPO

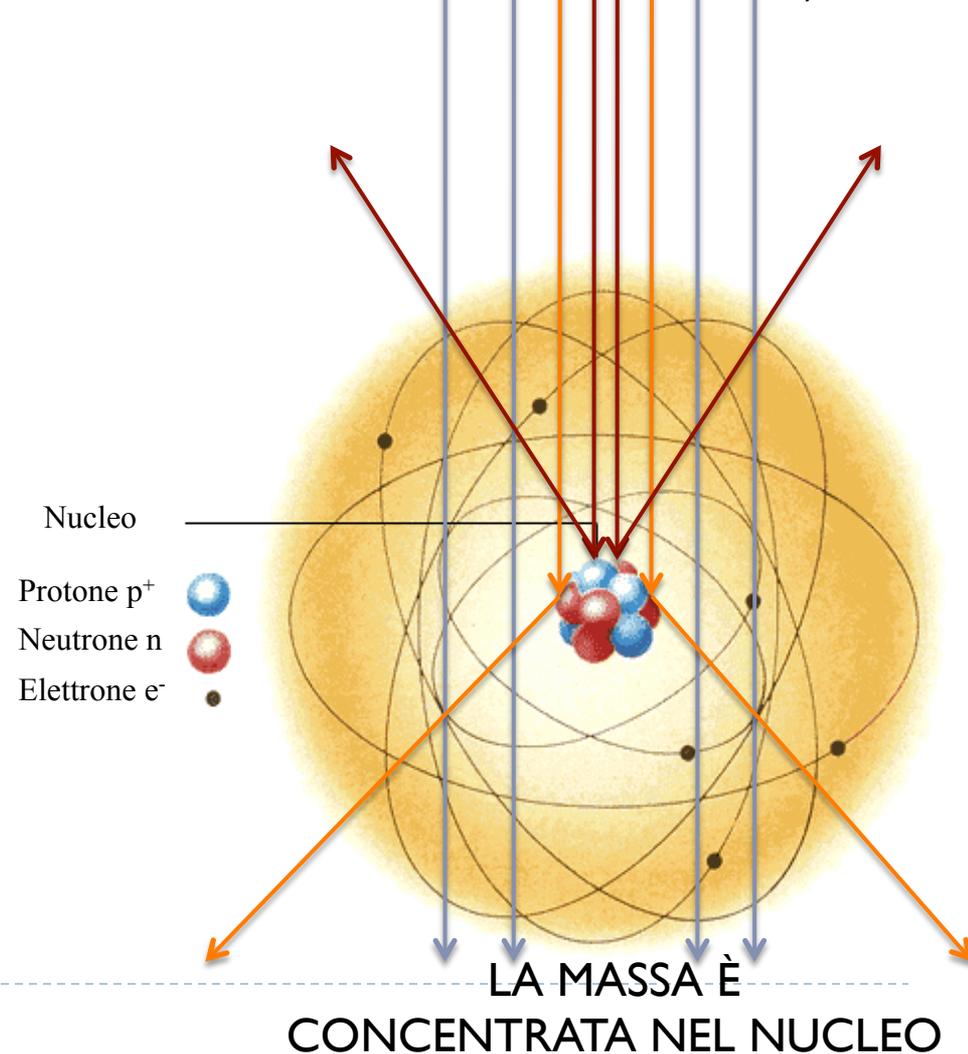
ACCELERAZIONE:
EFFETTO CINEMATICO
DELL'AZIONE DINAMICA
DELLA FORZA

Urti (impulsivi) e fasci di 'particelle' per sondare la materia



- ▶ La variazione di stato di moto dipende solo dall'interazione reciproca tra i corpi
→ si può risalire alla **natura della forza** e alla **struttura dei corpi**
- ▶ **Urti inelastici**: le biglie si possono rompere e si può 'vedere' la struttura interna

DIFFUSIONE RUTHERFORD (URTO ELASTICO ELETTROMAGNETICO)



Le forze fondamentali

- ▶ Riconducibili a proprietà irriducibili della materia ('carica')

Forza	Raggio d'azione	Intensità relativa	'Carica'	
Gravitazionale	∞	10^{-38}	Massa	Caduta dei gravi, moti celesti
Elettromagnetica	∞	1/137	Carica elettrica (2 tipi)	Proprietà elettriche, magneti, chimica, ...
Forte	10^{-15} m	1	Colore (forte) (3 tipi)	Coesione nucleare, stabilità del protone
Debole	10^{-18} m	10^{-6}	Sapore (debole)	Radioattività, energia del sole e delle stelle

- ▶ Solo la forza gravitazionale è 'normalmente' manifesta su grandi distanze (materia mediamente neutra)
- ▶ Non ha nessun ruolo a livello elementare (fino a cortissime distanze)

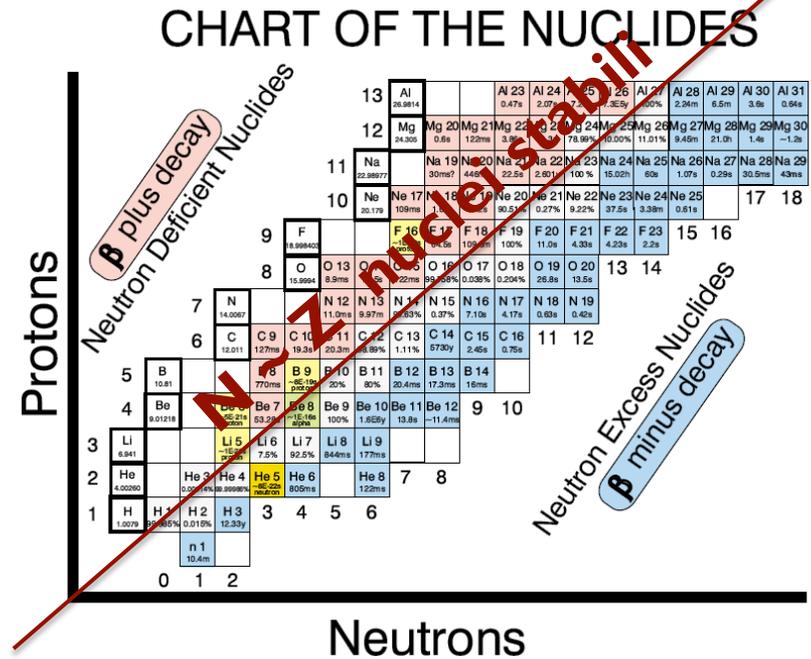
Regolarità e sottostrutture

Periodic Table of the Elements

1	IA	H																	2	0	
2	IIA	Li	Be																	10	Ne
3	IIIA	Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VII	VIII	IX	X	XI	XII	IIIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	18	Ar
4	IIIA	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	IIIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	18	Ar
5	IIIA	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	IIIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	18	Ar
6	IIIA	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	IIIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	18	Ar
7	IIIA	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113	114	115	116	117	118	118	Rn

* Lanthanide Series
+ Actinide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr



Regolarità negli atomi
(dovuta alla forza elettromagnetica)

Regolarità nei nuclei
(dovuta alla forza forte)

- ▶ Esistono strutture più profonde (elementari)?

Due relazioni molto importanti

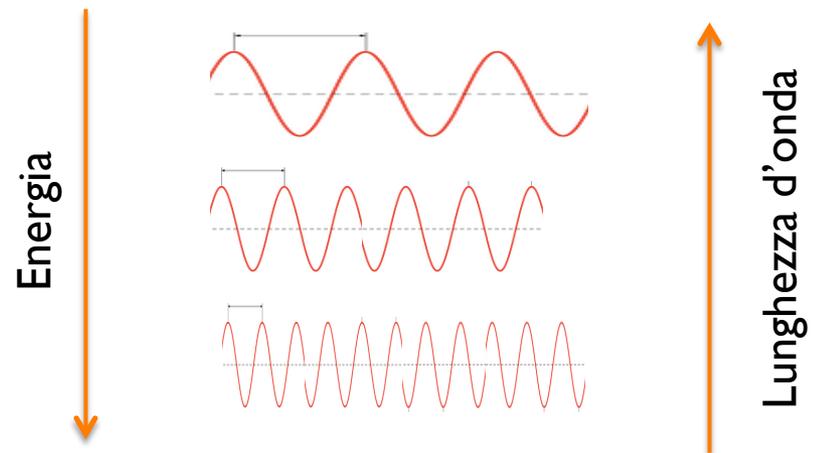
- ▶ L'equazione di De Broglie (meccanica quantistica):
 - ▶ $\lambda = h/p$ - lunghezza d'onda associata a una particella quantità di moto p
 - ▶ *'Risolve' bersagli di estensione $d \sim \lambda$ (diffrazione)*
- ▶ L'equazione di Einstein (meccanica relativistica):
 - ▶ $E = mc^2$ - Equivalenza massa-energia
- ▶ Con energia e quantità di moto sufficienti è possibile:
 - ▶ **Risolvere strutture piccole (distanze sub-atomiche)**
 - ▶ **Creare particelle non esistenti nella materia ordinaria**

Un esempio di diffrazione

- ▶ La luce visibile ‘risolve’ le strutture di un CD?
 - ▶ Qual è la il passo reticolare?

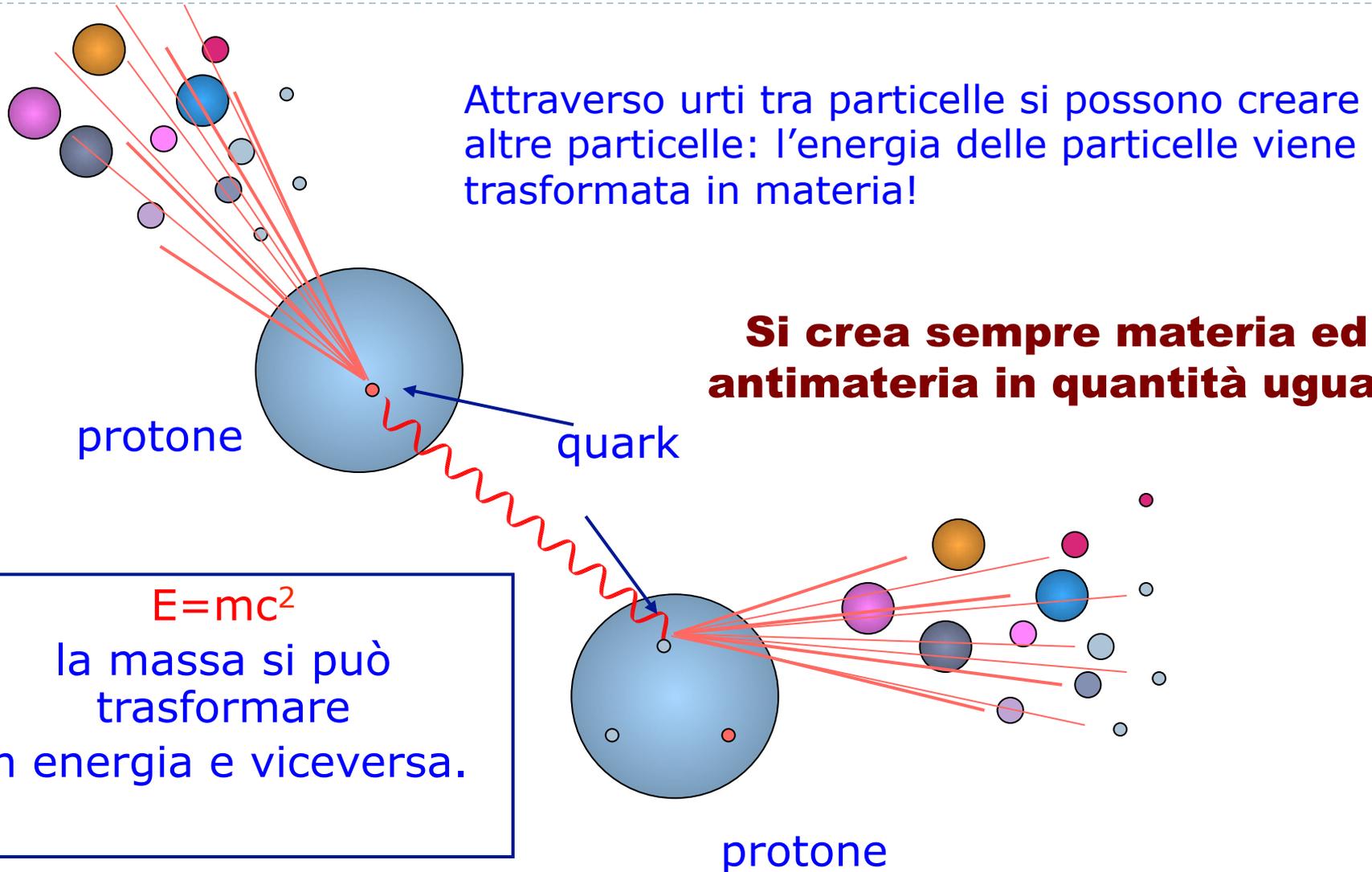


1 eV → 1 μm
1 keV → 1 nm
1 MeV → 1 pm
1 GeV → 1 fm



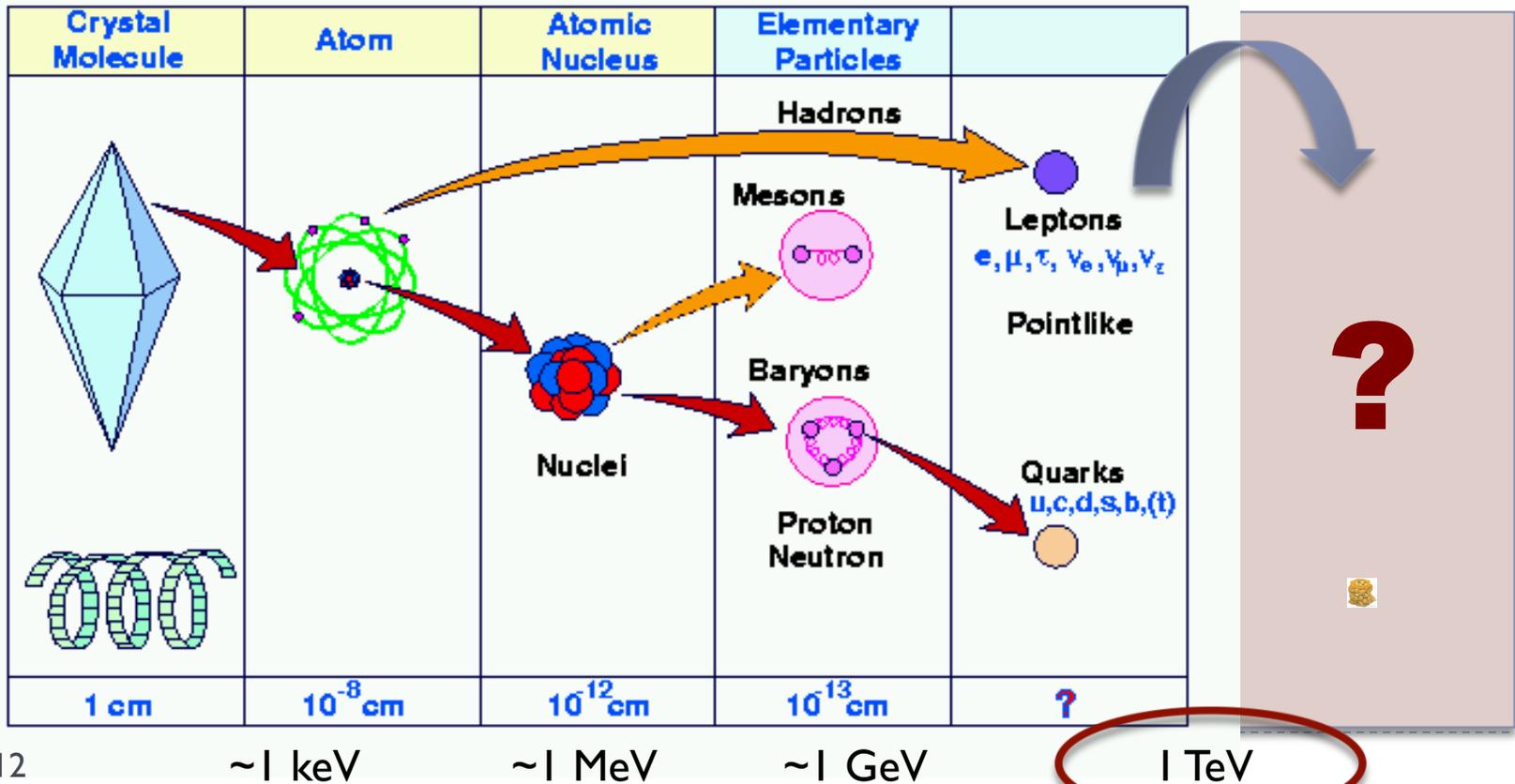
“Risoluzione ~ tacche del metro”

Come si creano le particelle in laboratorio?



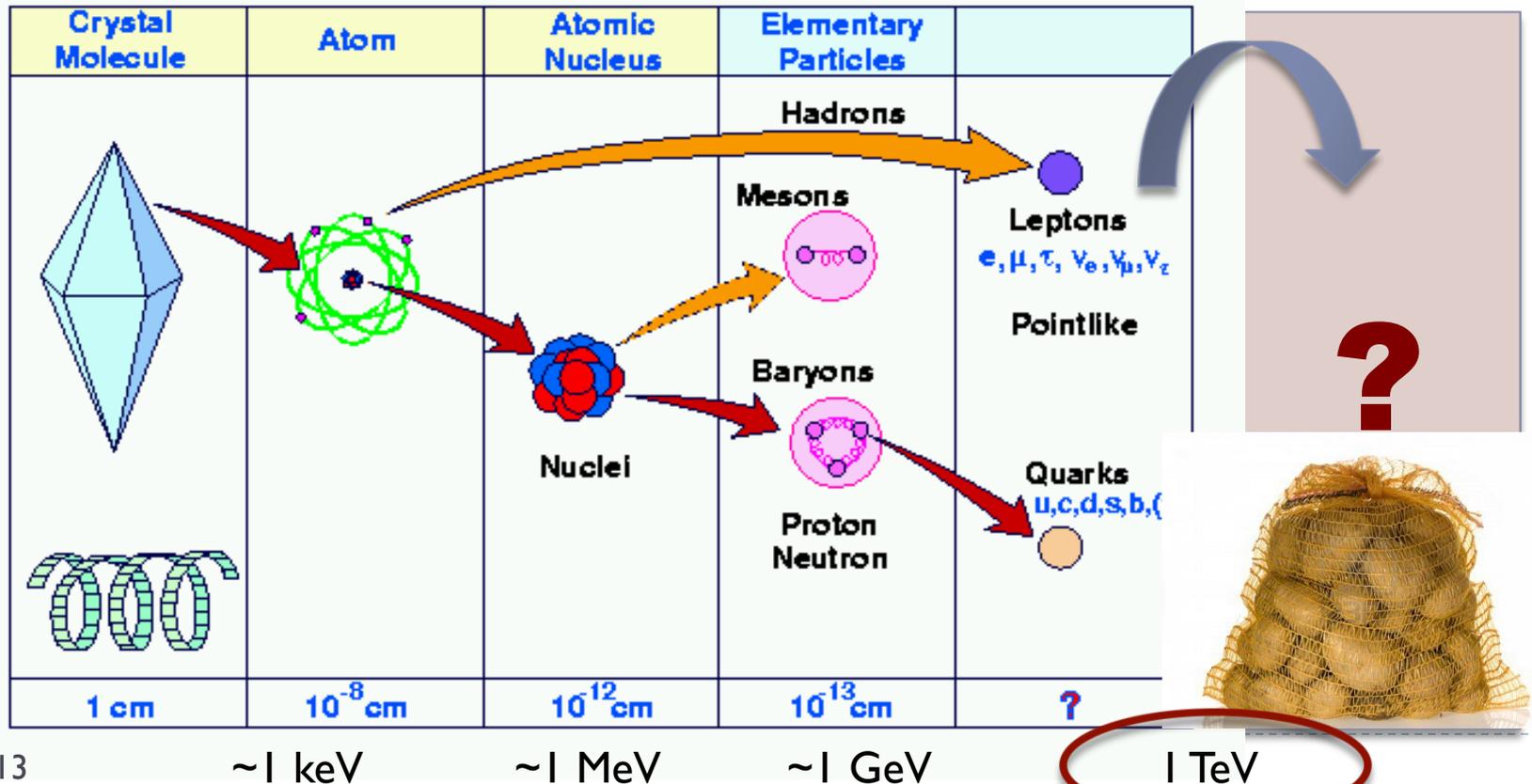
Struttura della materia e particelle

- ▶ **Particella: identità e permanenza di proprietà irriducibili**
 - ▶ massa, spin, carica elettrica, colore, carica debole, ...
- ▶ **Definizione 'transitoria':** *particelle che riteniamo puntiformi possono avere struttura interna*

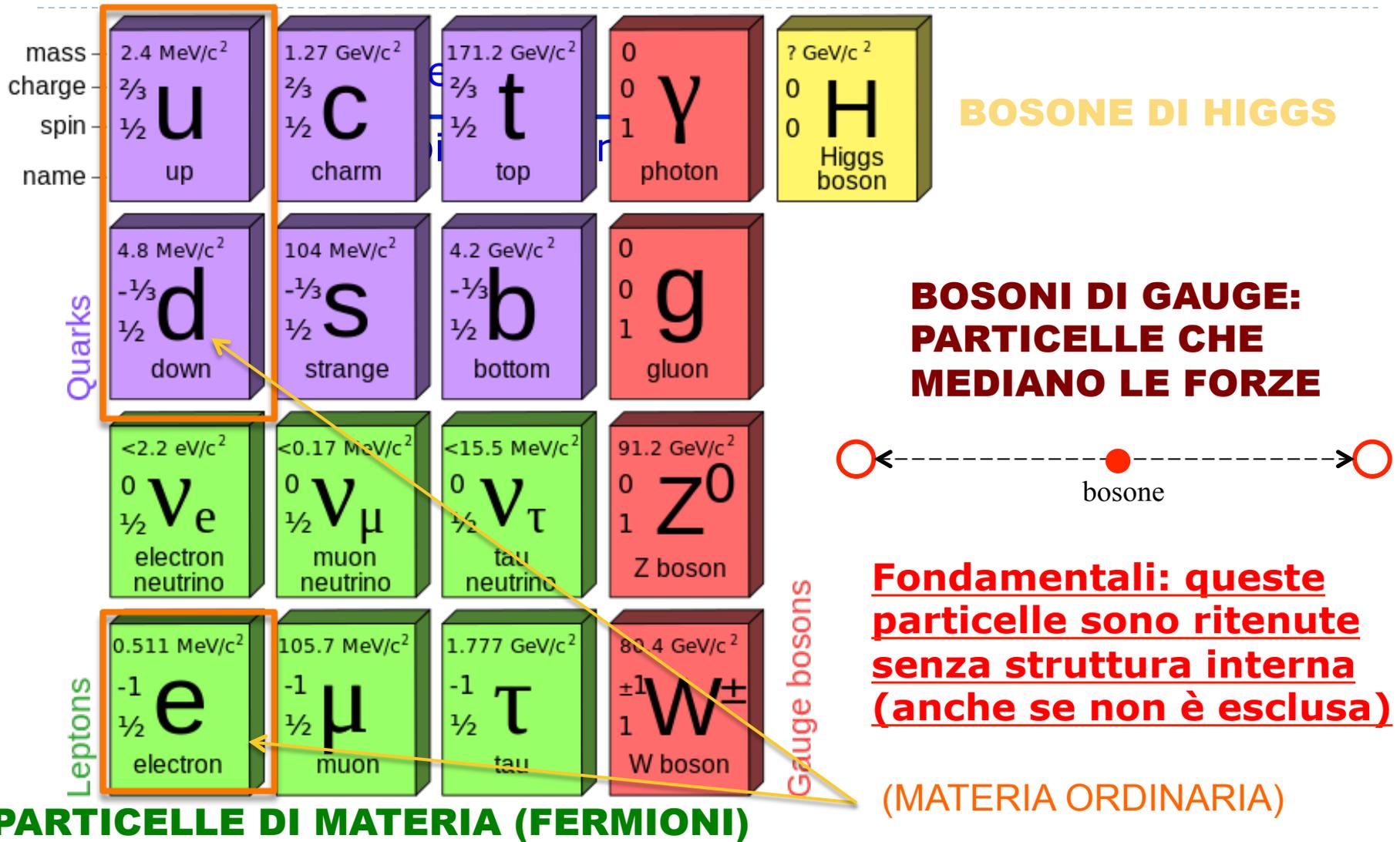


Struttura della materia e particelle

- ▶ **Particella: identità e permanenza di proprietà irriducibili**
 - ▶ massa, spin, carica elettrica, colore, carica debole, ...
- ▶ **Definizione 'transitoria':** *particelle che riteniamo puntiformi possono avere struttura interna*



Una nuova regolarità: il modello standard e le particelle elementari



Il modello standard in una pagina!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}\mathbf{W}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} \quad \left\{ \begin{array}{l} W^\pm, Z, \gamma \text{ kinetic} \\ \text{energies and} \\ \text{self-interactions} \end{array} \right.$$

$$+\bar{L}\gamma^\mu (i\partial_\mu - g\frac{1}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - g'\frac{Y}{2}B_\mu) L \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{lepton and quark} \\ \text{kinetic energies} \\ \text{and their} \\ \text{interactions with} \\ W^\pm, Z, \gamma \end{array} \right.$$

$$+\bar{R}\gamma^\mu (i\partial_\mu - g'\frac{Y}{2}B_\mu) R$$

$$+\left| (i\partial_\mu - g\frac{1}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - g'\frac{Y}{2}B_\mu) \phi \right|^2 \quad \left\{ \begin{array}{l} W^\pm, Z, \gamma \text{ and} \\ \text{Higgs masses} \\ \text{and couplings} \end{array} \right.$$

$$-V(\phi)$$

$$-(G_1\bar{L}\phi R + G_2\bar{L}\phi_c R + h.c.) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{lepton and quark} \\ \text{masses and} \\ \text{coupling to Higgs} \end{array} \right.$$

L ... left-handed fermion (l or q) doublet
 R ... right-handed fermion singlet

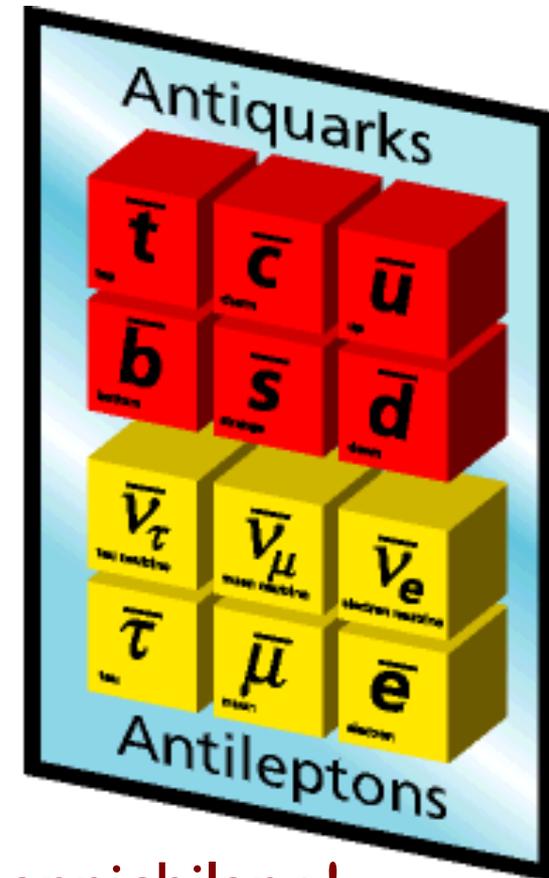
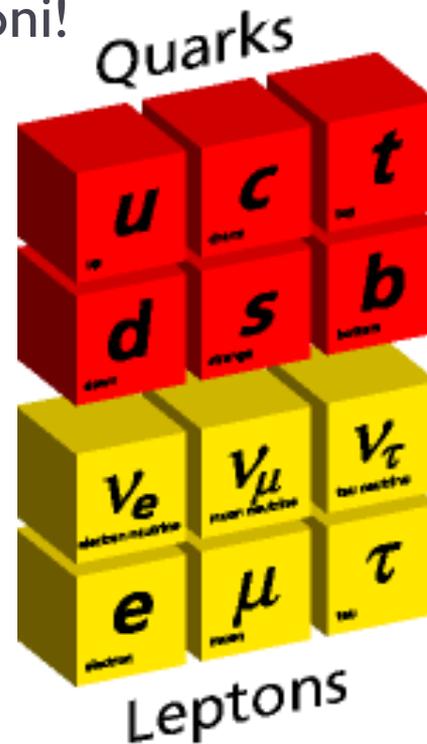
\mathcal{L} from QCD:

$$\mathcal{L} = \underbrace{\bar{q}(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)q}_{E_{\text{kin}}(q)} - g \underbrace{(\bar{q}\gamma^\mu T_a q)G_\mu^a}_{\text{Interaction } q, g} - \underbrace{\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu}}_{E_{\text{kin}}(g)} \quad \begin{array}{l} \text{includes} \\ \text{self-interaction} \\ \text{between gluons} \end{array}$$

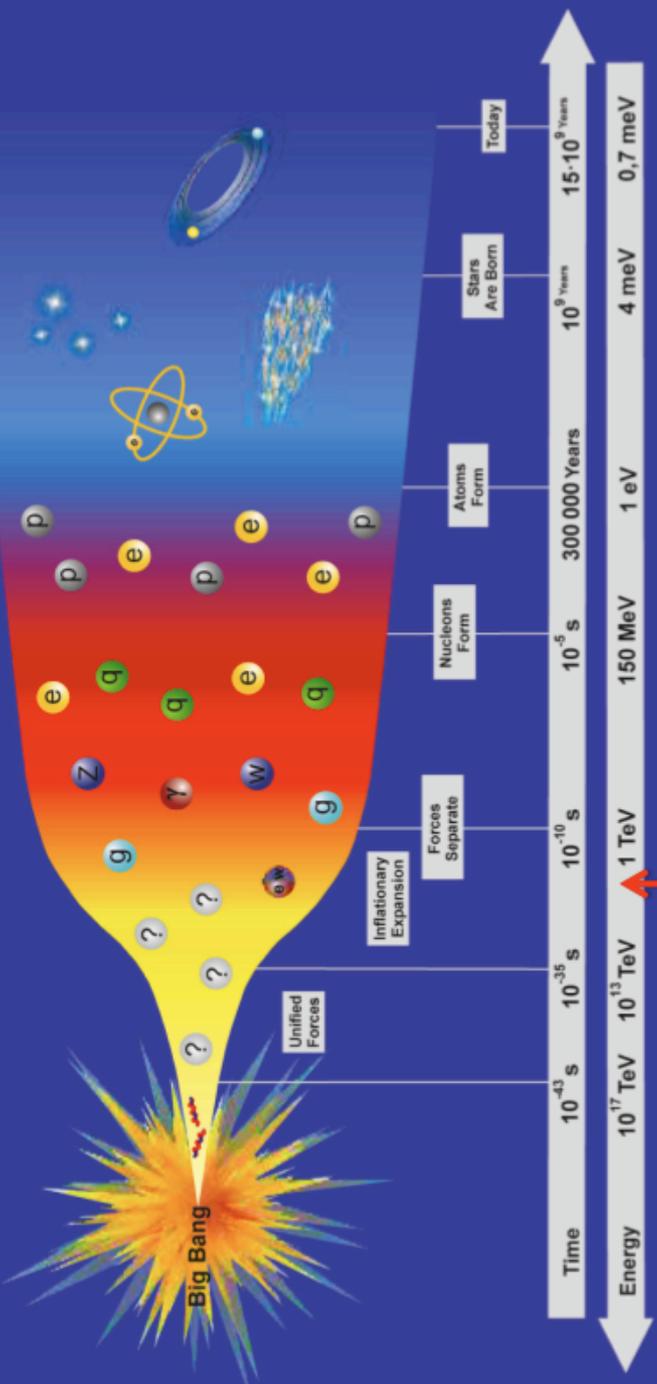
- **Contiene parametri:**
 - Costanti di interazione (carica elettrica, debole, ...)
 - **Masse (dall'interazione con il bosone di Higgs)**
 - ...
- **Predice:**
 - Sezioni d'urto
 - Rapporti di diramazione
 - Vite medie
 - ...

Materia e antimateria

- ▶ Ogni particella di materia ha la propria antiparticella.
 - ▶ I mediatori non hanno le antiparticelle: non esistono gli anti-fotoni!
 - ▶ Le antiparticelle hanno cariche opposte a quelle delle particelle
- ▶ L'antimateria non è una congettura!
 - ▶ È anche sfruttata in diagnostica medica
 - ▶ (Positron Emission Tomography)



- ▶ **Se materia e antimateria si incontrano, si annichilano!**

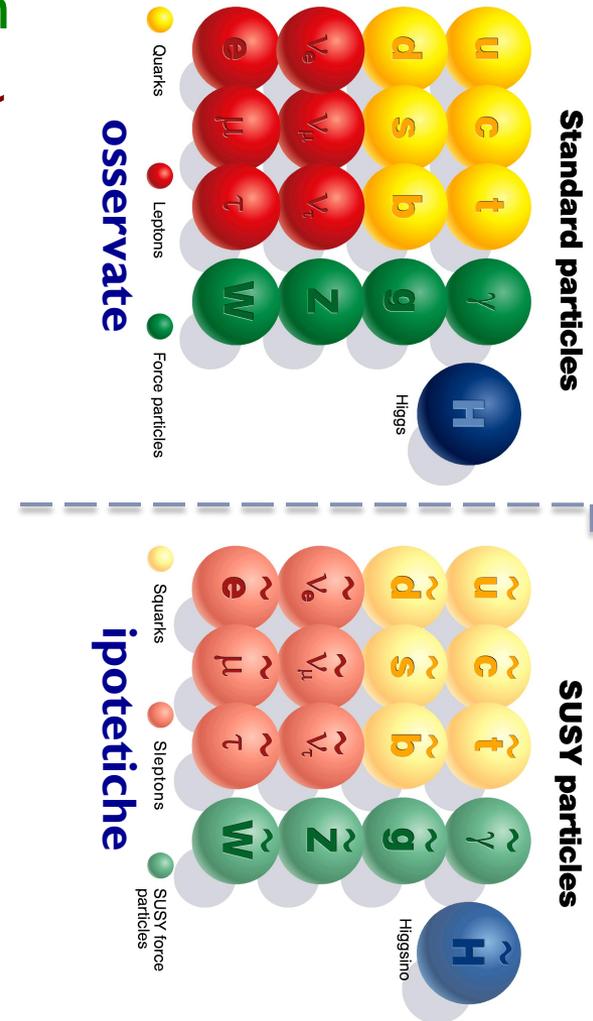


Un problema ovvio ...

- ▶ Dal big bang e nella conversione di energia in materia, materia e anti-materia emergono in modo simmetrico
- ▶ L'Universo attuale è di materia (*almeno localmente*)
 - ▶ **Dove è finita l'anti-materia?**
 - ▶ Imbarazzante: non abbiamo idea
→ Abbiamo perso il 50% delle particelle...
- ▶ Nota: da alcune misure sappiamo che **materia e antimateria non sono esattamente 'speculari'**:
 - ▶ Questo problema si chiama "CP violation"
 - ▶ *Può spiegare l'asimmetria dell'Universo?*

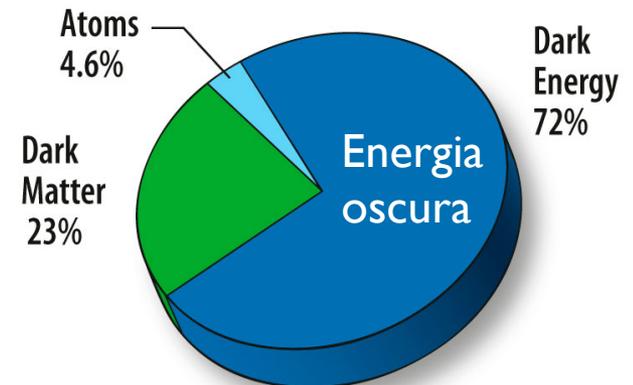
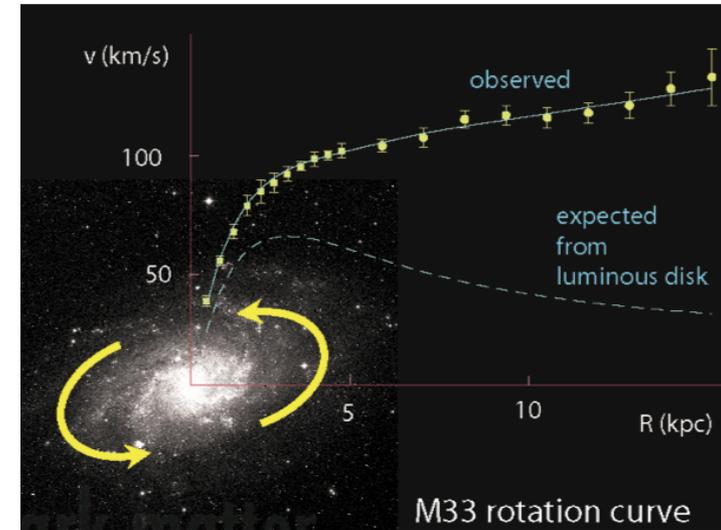
... due problemi connessi

- ▶ Ci sono **tre generazioni** simili (ma non identiche) di quark e leptoni e **non si sa perché...**
- ▶ Tuttavia tre generazioni è il **numero minimo** per permettere **differenza tra materia ed antimateria**
 - ▶ Se ci fossero solo due generazioni non saremmo qui
 - *Tutta la materia ed anti-materia si sarebbero annichilite*
- ▶ Dato che non si sa perché ci sono tre generazioni, si cerca la quarta... e molto altro



La materia oscura e l'energia oscura

- ▶ **Evidenza astrofisica della materia oscura dalle curve di rotazione delle galassie**
 - ▶ La velocità di rotazione di un corpo orbitante dipende dalla massa all'interno dell'orbita
 - ▶ **Sistema solare: $v \propto 1/\sqrt{r}$**
- ▶ **La materia oscura è 20 volte più abbondante della materia luminosa (ordinaria)**
 - ▶ C'è una nuova particella?
 - ▶ Si può produrla in collisioni tra particelle?
- ▶ **Velocità di espansione incompatibile con l'effetto gravitazionale della massa:**
 - ▶ Energia Oscura



Imbarazzante ci siamo persi il 95% della massa

The Large Hadron Collider

▶ Primary objectives:

- ▶ Search for the SM Higgs boson **up to 1 TeV**
 - Characterize it, if found
- ▶ Search for phenomena beyond the standard model
 - New gauge bosons, 'new physics' at the 1 TeV scale
 - Dark matter candidate
 - Matter/Antimatter asymmetry

▶ Centre of mass energy:

- ▶ 7-8 TeV (2010-2012)
- ▶ 14 TeV (design)

18 km/27 km of superconducting dipoles

$B = 8.3 \text{ T}$

$T = 1.9 \text{ K}$ (120 ton of L-He)

80 MW (+ 30 MW for the experiments)

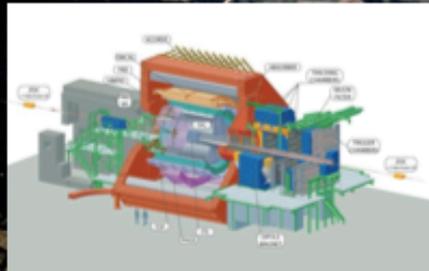
Approved in 1994

First collisions in 2009

Detectors at the LHC

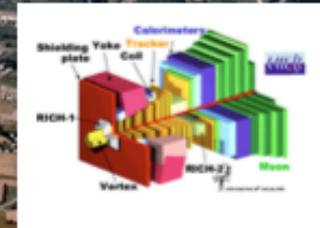


Studio della
violazione di CP

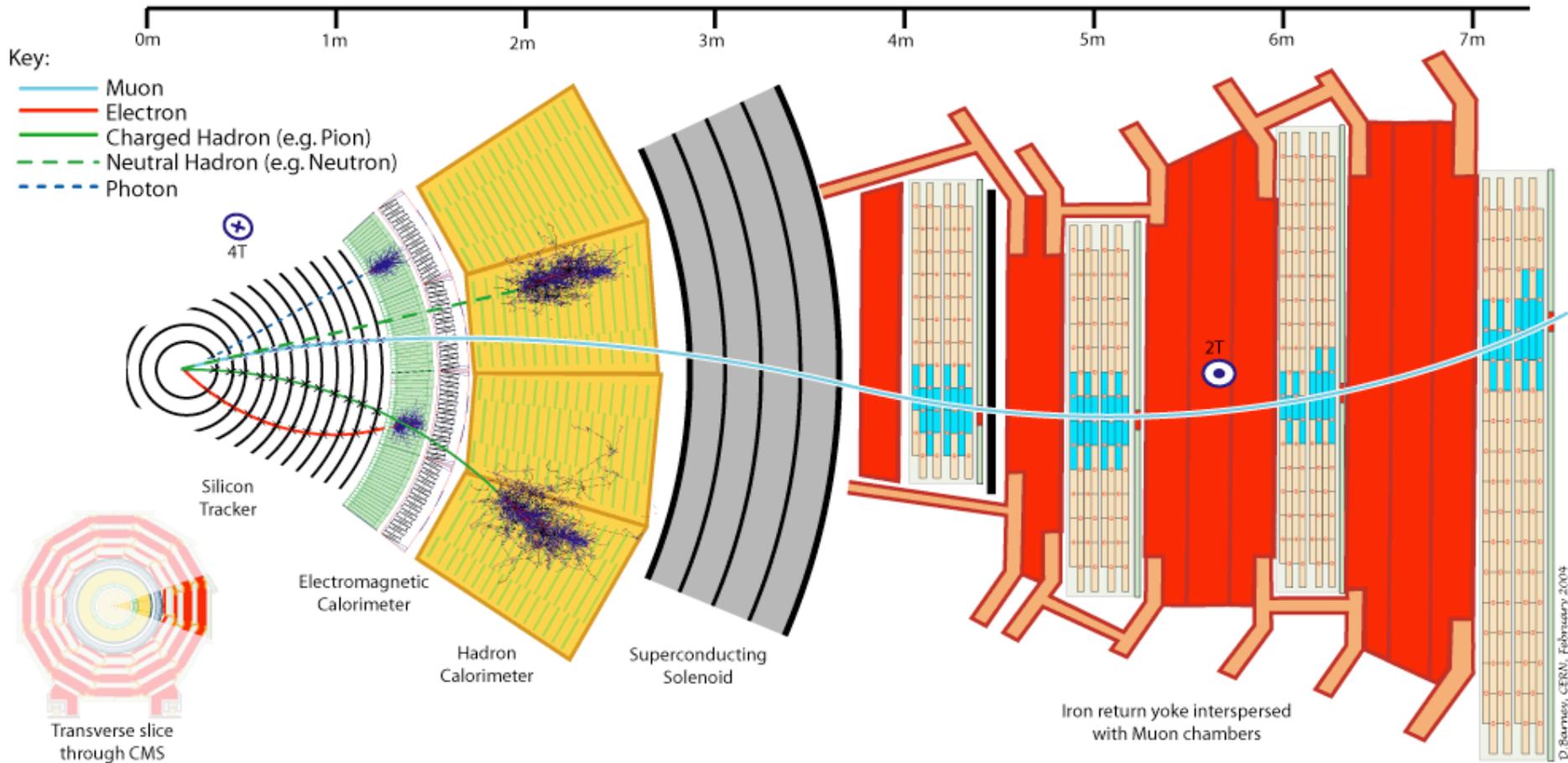


Interazioni nucleari

Bosone di Higgs
e ricerca di nuove particelle

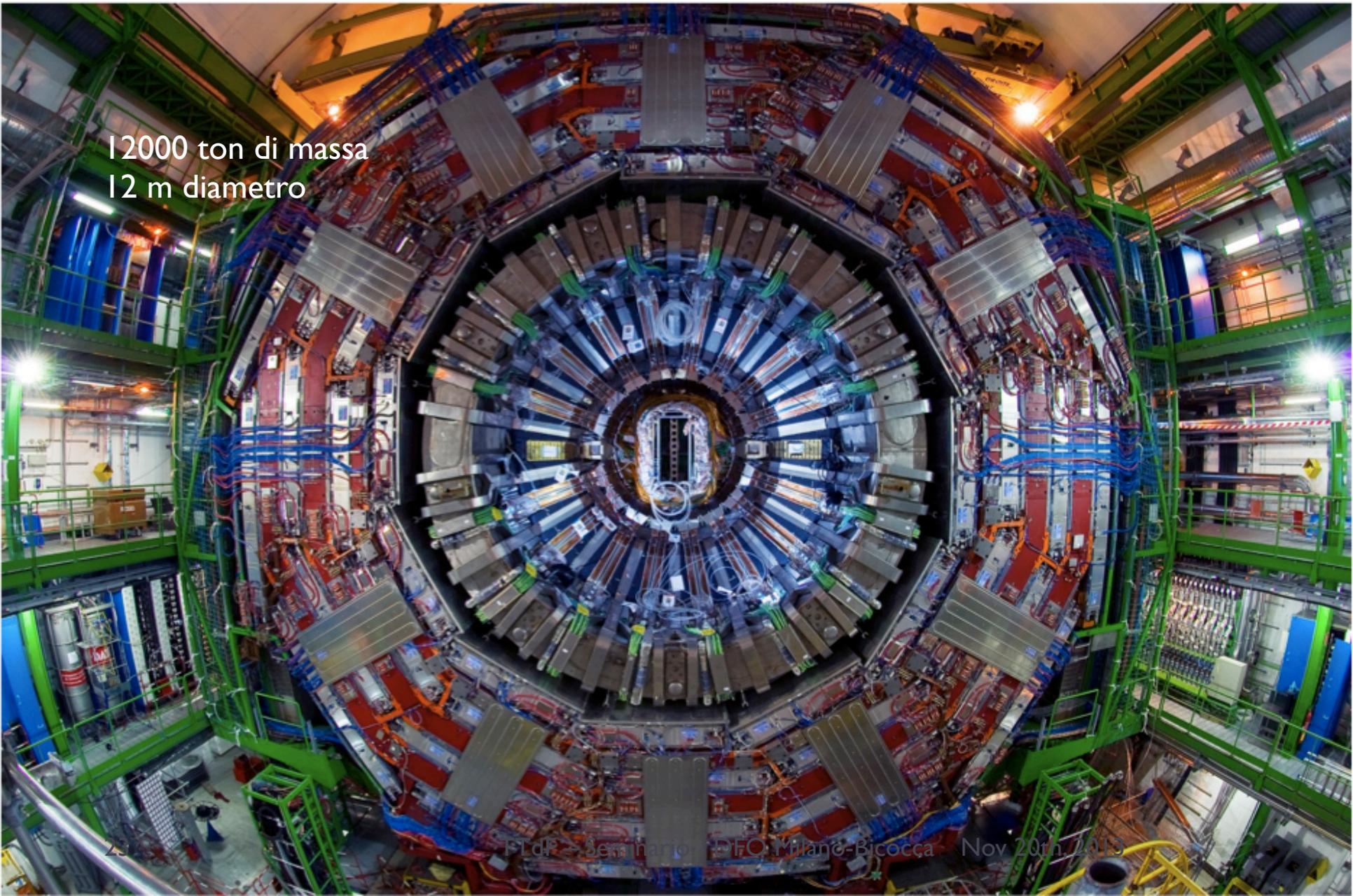


La rivelazione delle particelle

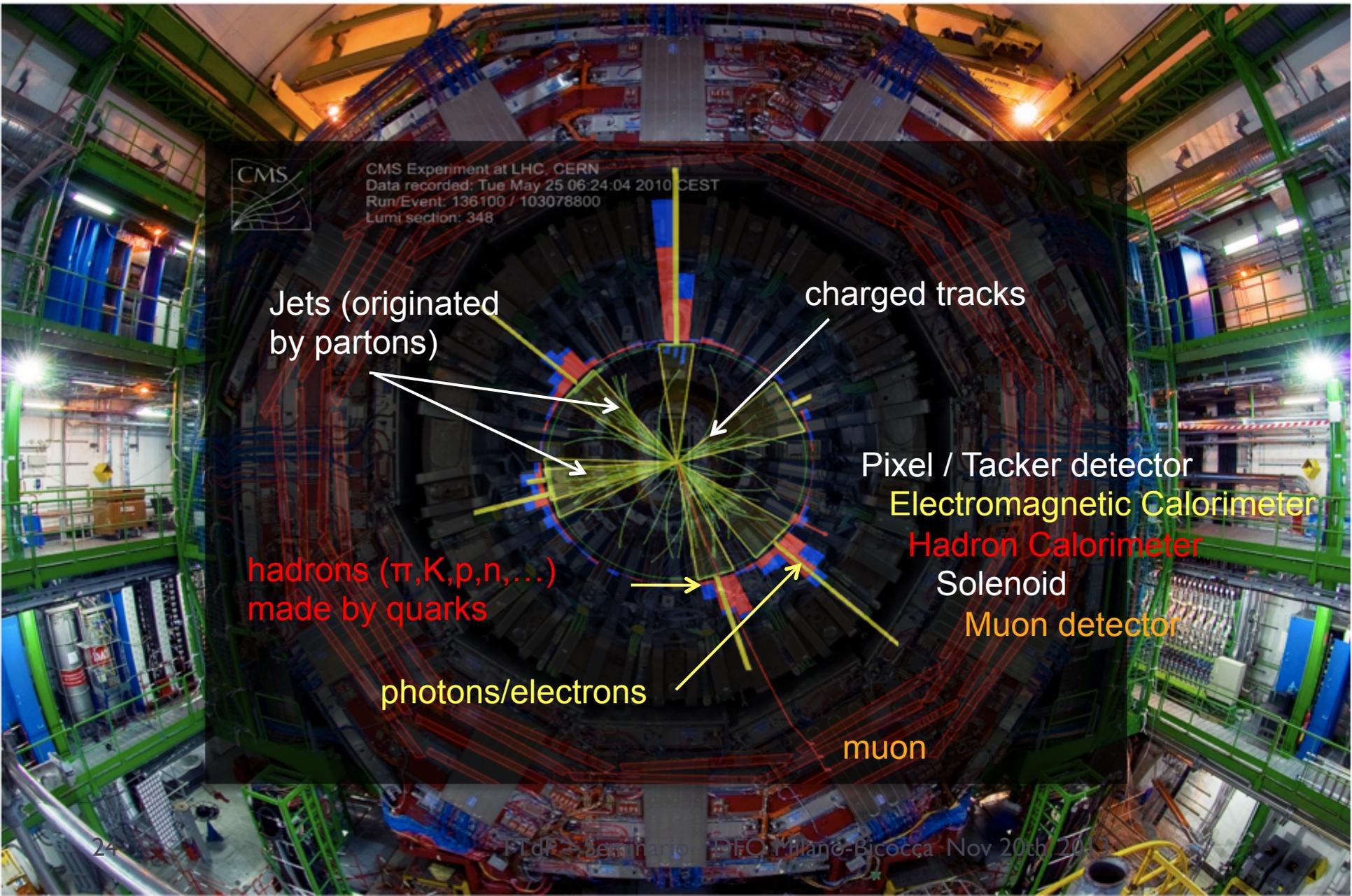


The Compact Muon Solenoid

12000 ton di massa
12 m diametro



The Compact Muon Solenoid



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Tue May 25 06:24:04 2010 CEST
Run/Event: 136100 / 103078800
Lumi section: 348

Jets (originated by partons)

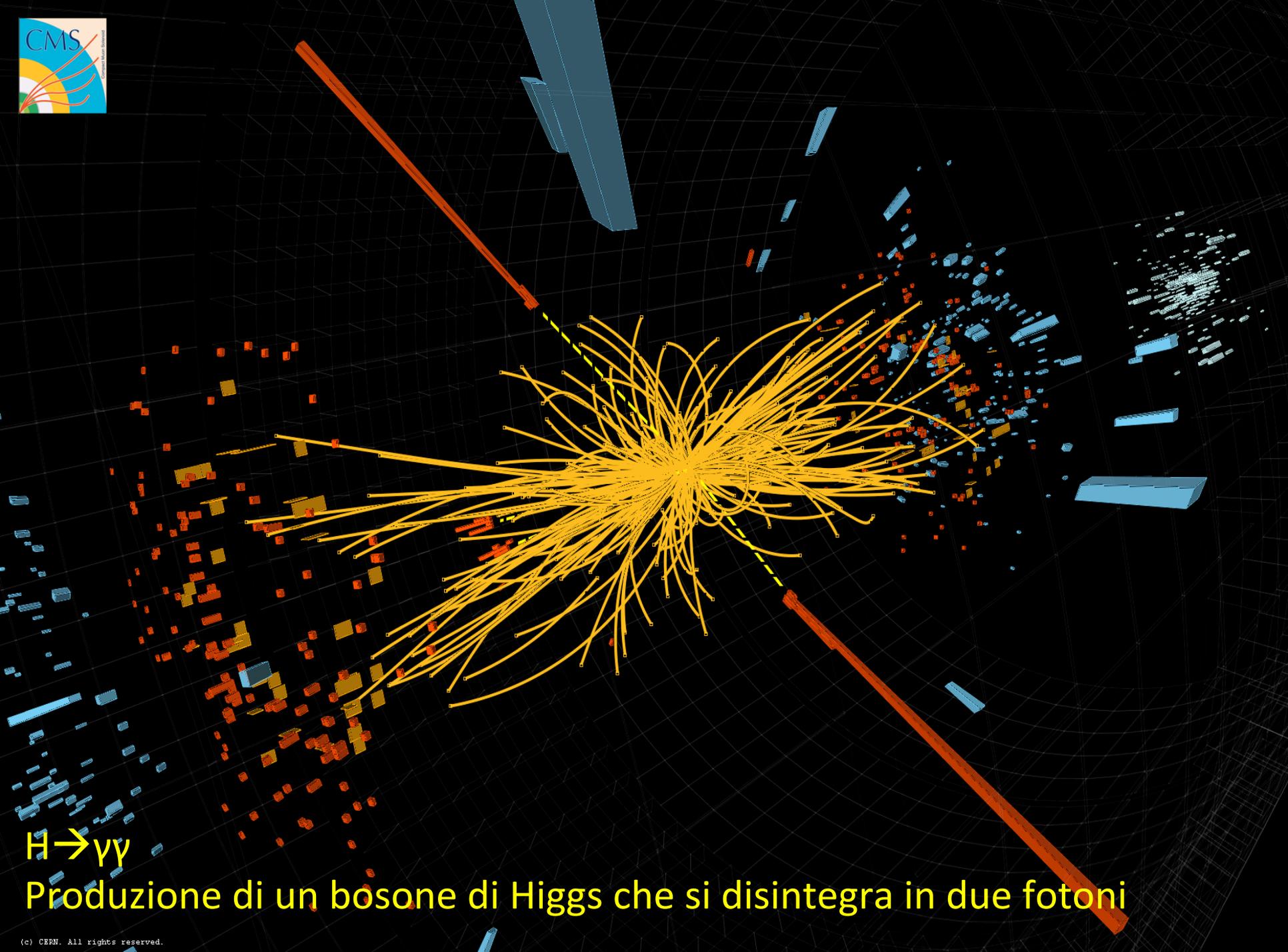
charged tracks

Pixel / Tracker detector
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Solenoid
Muon detector

hadrons (π, K, p, n, \dots)
made by quarks

photons/electrons

muon



$H \rightarrow \gamma\gamma$

Produzione di un bosone di Higgs che si disintegra in due fotoni

H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 μ

Produzione di un bosone di Higgs che si disintegra in 4 muoni

[Metodo di] Rivelazione del bosone di Higgs [e di particelle a vita breve]

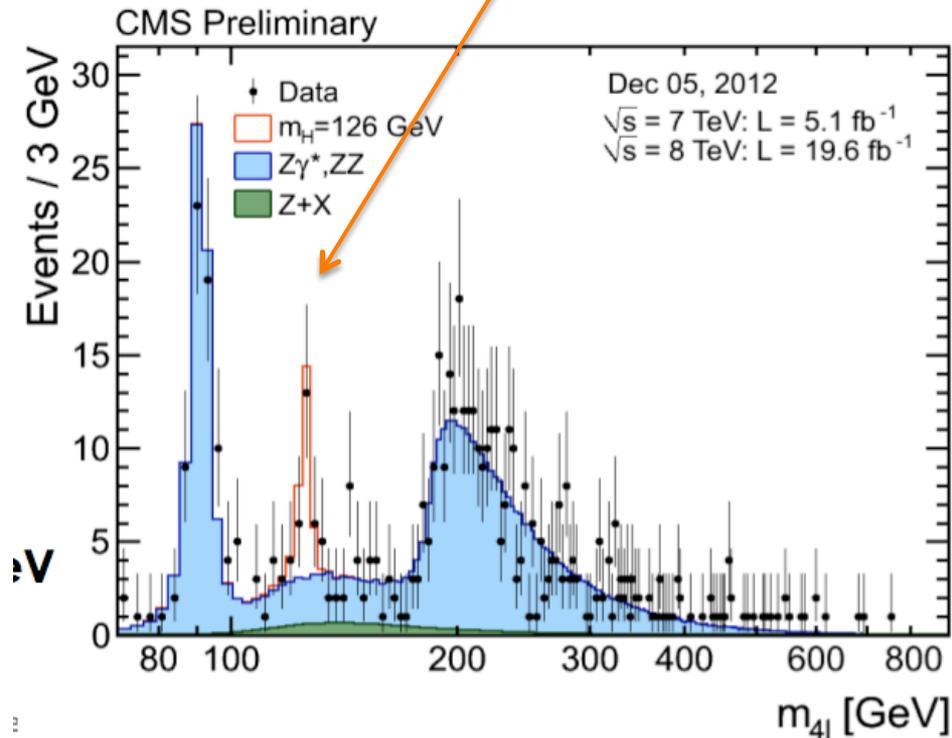
- ▶ La massa di una particella ...

$$M_H = \left[E_H^2 - \vec{p}_H^2 \right]^{1/2}$$

- ▶ Equivalenza di masse e energia relativistica (scritta con $c=1$)
- ▶ ... può essere ricostruita dalle energie e delle quantità di moto dei prodotti di decadimento

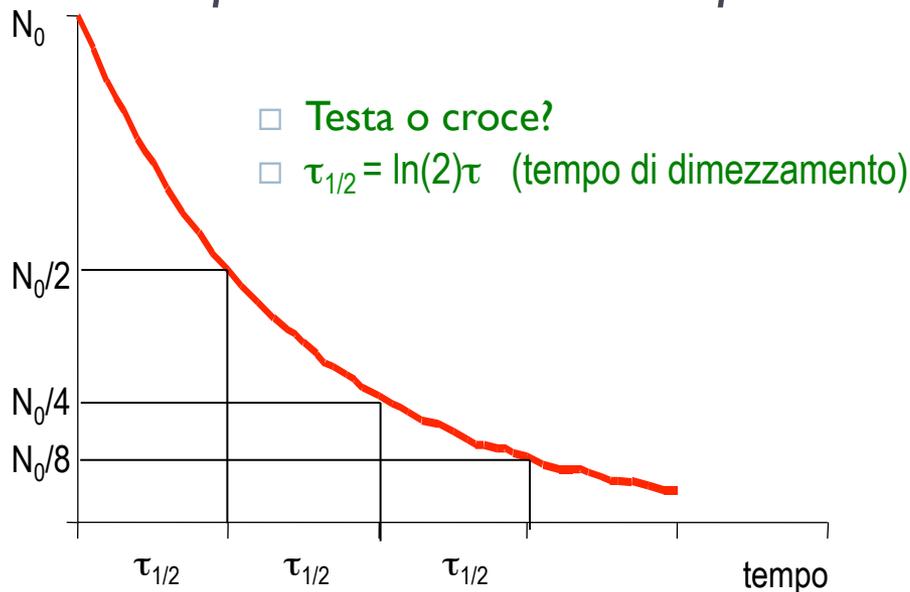
$$M_H = \left[\left(\sum_f E_f \right)^2 - \left(\sum_f \vec{p}_f \right)^2 \right]^{1/2}$$

- ▶ Conservazione di energia e quantità di moto

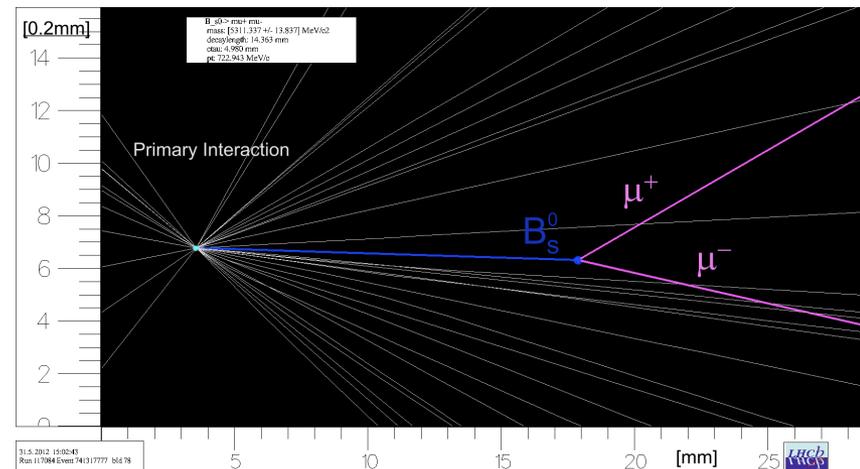


Misura di vita media di particelle a vita 'lunga'

- ▶ Curva di sopravvivenza di una particella:
 - ▶ $N(t) = N(t=0) \exp(-t / \tau)$
 - ▶ $\tau = \text{vita media}$
 - ▶ *Probabilità di sopravvivenza indipendente dalla storia passata*



- ▶ Lunghezza di decadimento:
 - ▶ $L = \gamma (\beta c) \tau$
 - ▶ γ = fattore relativistico di dilatazione del tempo
 - ▶ (βc) = velocità della particella
 - ▶ $L \sim 10$ mm per $\tau \sim 1$ ps

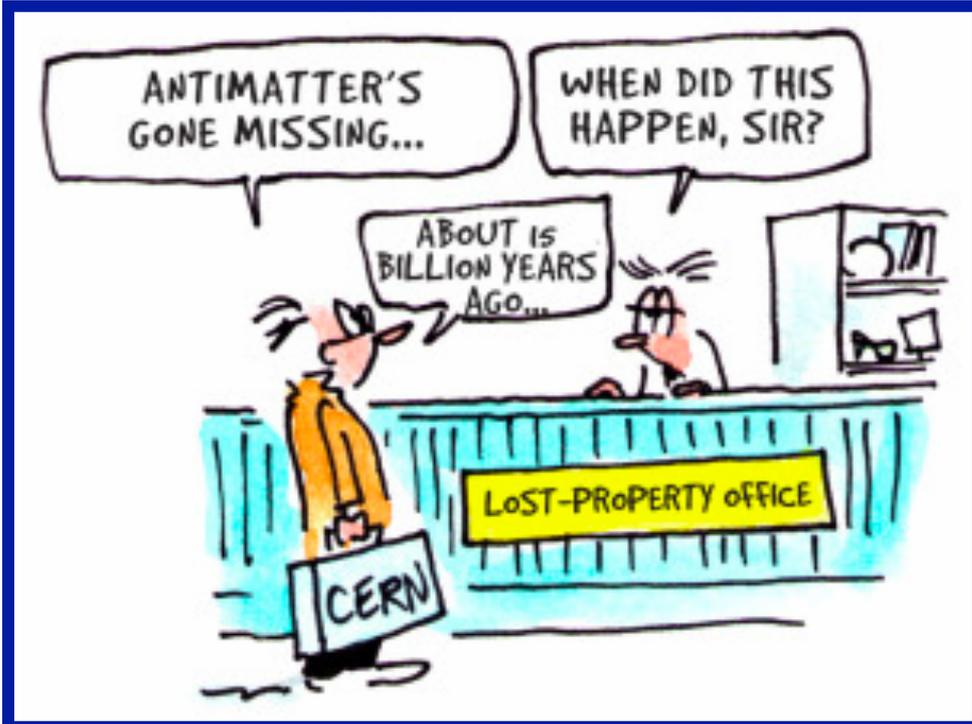


E adesso?

**Il bosone di Higgs è sufficiente?
Cosa spiega la gerarchia di massa?**

Dov'è finita l'antimateria?

Qual è la natura della materia oscura?
[Non si sono trovati candidati corpuscolari a LHC]



Quanto è costato e costa ?

- ▶ Circa 20 anni di lavoro tra progettazione e costruzione, circa 10.000 fisici ed ingegneri di 85 paesi.
- ▶ **6.000.000.000€: è molto?**
 - ▶ Un quarto delle Olimpiadi di Londra
 - ▶ Una settimana di guerra in Iraq
 - ▶ Meno del telescopio spaziale Hubble
- ▶ **Il contributo italiano è circa il 12% del totale.**
 - ▶ **36.000.000€/anno = 0,60 cent. l'anno per cittadino.**
 - ▶ L'industria italiana ha ricevuto più commesse dalla costruzione di LHC di quanto l'Italia abbia investito in ricerca
 - ▶ Ad esempio l'Ansaldo ha costruito in Italia 1/3 dei magneti superconduttori di LHC.



È servito a qualcosa[ltro] ?

- ▶ Alcuni “**effetti collaterali**” della **ricerca di base** in fisica delle particelle:
 - ▶ **La cura dei tumori con gli acceleratori**: tre centri in Italia: Pavia (CNAO), Catania (CATANA) e Trento
 - ▶ I **radiofarmaci** per diagnostica medica
 - ▶ I magneti per la **risonanza magnetica** nucleare usano la tecnologia dei superconduttori
 - ▶ La PET (**Positron Emission Tomography**) è un’applicazione medica dell’**antimateria**
 - ▶ Il **World-Wide Web** è nato al CERN: http, www, html, URL, ...
 - ▶ Studio dei **coni vulcanici** con i **raggi cosmici**
 - ▶ Applicazioni ai **beni culturali**
 - ▶ e altro ancora ...
- ▶ Anche **telecomunicazioni, transistor e microchip, laser, cristalli liquidi, magneti superconduttori**, ecc. sono possibili solo perché c’è stato grande impegno a vincere le grandi sfide della **ricerca di base**

