

# INTERNATIONAL MASTERCLASSES HANDS ON PARTICLE PHYSICS

12<sup>a</sup> edizione



# Cosa vogliamo capire studiando la fisica delle particelle elementari?

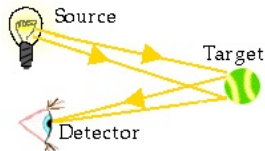
- quali sono i costituenti elementari della materia che ci circonda?
- quali forze agiscono fra questi costituenti elementari?
- queste forze sono in grado di spiegare la moltitudine di fenomeni che osserviamo?
- come ha avuto origine l'universo?

domandine semplici semplici, insomma ...

# Come faccio a "vedere" di cosa è fatta la materia?

## Guardandola da vicino

Con un microscopio posso vedere oggetti di dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda della luce con cui li osservo



Con la luce visibile posso risolvere oggetti grandi circa un millesimo di millimetro (fino a circa  $0.5 \mu\text{m}$ )

La radiazione elettromagnetica è composta da fotoni

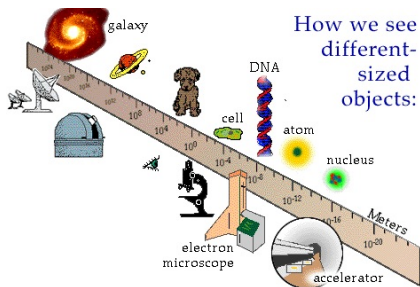
- la sorgente emette fotoni
- i fotoni colpiscono il bersaglio e alcuni vengono riflessi
- l'occhio riceve una parte dei fotoni che hanno colpito il bersaglio e il nostro cervello ricostruisce l'immagine

# Osservare l'infinitamente piccolo

Per osservare dimensioni al di sotto del  $\mu\text{m}$  devo usare lunghezze d'onda più piccole

Posso usare come sonda fotoni di lunghezza d'onda più corta oppure posso usare come sonda delle particelle:

- $\lambda = \frac{h}{p}$  lunghezza d'onda di De Broglie  
lunghezza d'onda associata ad una particella di momento  $p$   
(meccanica quantistica)
- per avere momento sufficientemente elevato devo accelerare le particelle
- tanto maggiore l'energia tanto minori le dimensioni che riesco a studiare



# Unità di misura dell'energia

Nel SI l'energia si misura in joule

$$1 J = 1 N \times 1 m$$

per un'auto di 1000 kg che viaggia a 100 km/h

$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 = 3.9 \cdot 10^5 J = 2.4 \cdot 10^{24} eV$$

nel mondo microscopico si usa l'elettronvolt

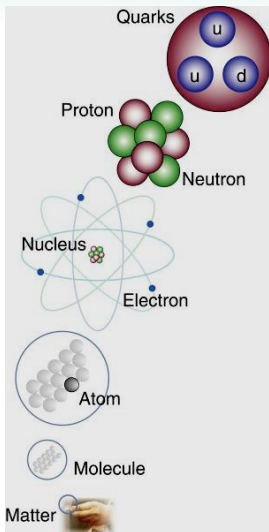
$$1 eV = 1.6 \cdot 10^{-19} J$$

protone ( $m = 1.67 \cdot 10^{-27} kg$ ) ad una velocità di  $10^5 m/s$

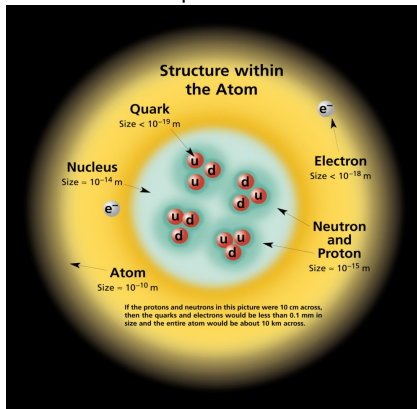
$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 = 6.4 \cdot 10^{-19} J = 4 eV$$

- 1 keV =  $10^3 eV$  (raggi X)
- 1 MeV =  $10^6 eV$
- 1 GeV =  $10^9 eV$  (particelle in un piccolo acceleratore)
- 1 TeV =  $10^{12} eV$  (particelle nei grandi acceleratori)

# Struttura della materia



Studiando la materia che ci circonda a distanze sempre più piccole abbiamo capito che è fatta di atomi, che gli atomi sono fatti di elettroni con un nucleo fatto di protoni e neutroni, che protoni ed elettroni sono fatti di quark



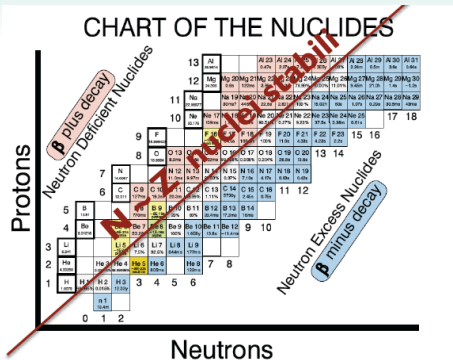
# Regolarità e sottostrutture

**Periodic Table of the Elements**

IA																	0	
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	+La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113					

\* 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 degli atomi**

forza elettromagnetica fra elettroni e nuclei

**regolarità dei nuclei**

forza "forte" fra protoni e neutroni

**ci sono altre regolarità?**

bisogna osservare con "sonde" di lunghezza d'onda più piccole

⇒ energia maggiore



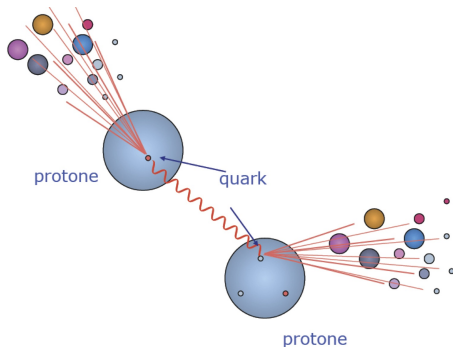
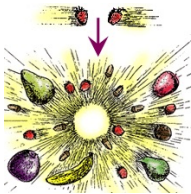
# La massa si può trasformare in energia

Negli urti fra particelle di energia sufficientemente elevata possono prodursi altre particelle



$$E = mc^2$$

Si crea sempre materia ed antimateria in parti uguali



Non solo si crea materia e antimateria, ma possono venire prodotte particelle elementari che non sono presenti nella materia che conosciamo!



# Quark, leptoni e mediatori delle forze

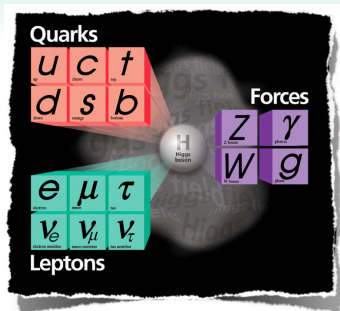
Non ci sono solo i quark  $u$  e  $d$  che compongono protoni ed elettroni

- ci sono altre due "famiglie" di quark

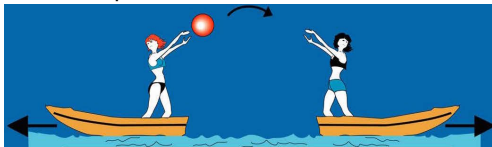
Non ci sono solo l'elettrone e il neutrino  $\nu_e$  (osservato nei decadimenti radioattivi)

- ci sono altre due "famiglie" di "leptoni"

(e le loro antiparticelle!)



... e ci sono anche delle particelle "mediatrici" delle forze:  $\gamma$ ,  $g$ ,  $W$ ,  $Z$



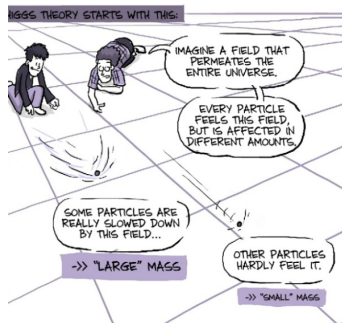
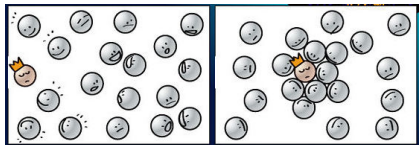
E c'è il bosone di Higgs, altrimenti nessuna di queste particelle potrebbe avere massa!

# "il bosone di Higgs dà massa alle particelle" (?????)

Cosa significa per una particella avere massa? Sono oggetti puntiformi...

- se la massa è zero viaggia alla velocità della luce
- se la massa è diversa da zero no

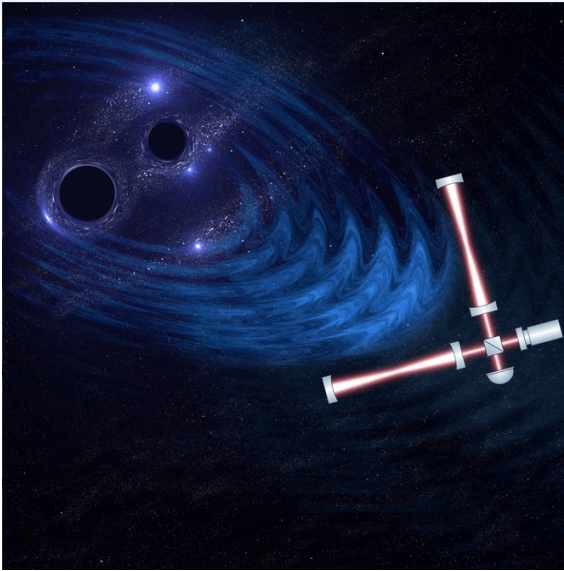
avere massa per una particella è un po' come essere "trattenuta" da una forza esercitata dal vuoto



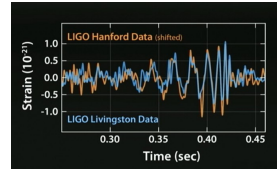
se c'è una forza c'è una particella scambiata: il bosone di Higgs

osservato nel 2012!

# Fuori tema? Onde gravitazionali



emesse nel processo  
di fusione di due  
buchi neri



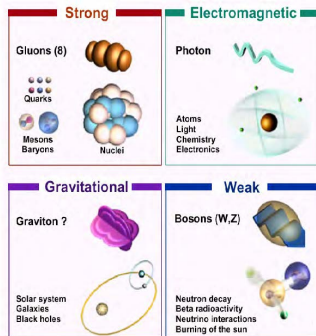
previste dalla teoria  
della relatività  
generale, finalmente  
osservate

# Modello Standard delle particelle elementari

Forza	Raggio d'azione	Intensità relativa	'Carica'	
Gravitazionale	$\infty$	$10^{-38}$	Massa	Caduta dei gravi, moti celesti
Elettromagnetica	$\infty$	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

Le interazioni mediate dai bosoni riescono a spiegare la struttura atomica, le (tante) particelle composte da quarks (e antiquarks), i decadimenti radioattivi, le reazioni nucleari nel sole...

TUTTO BENE? sì e no



# Materia e antimateria

Ad ogni particella corrisponde una antiparticella

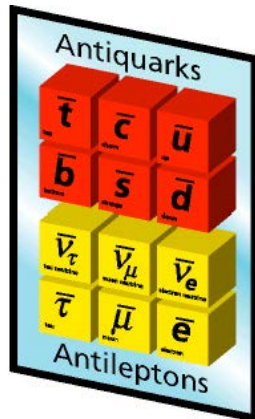
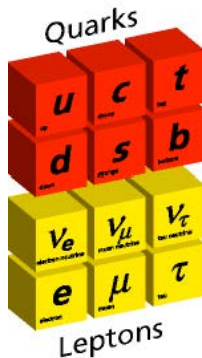
(i mediatori delle forze non hanno antiparticelle: non esiste l'antifotone!)

La carica dell'antiparticella è opposta a quella della particella

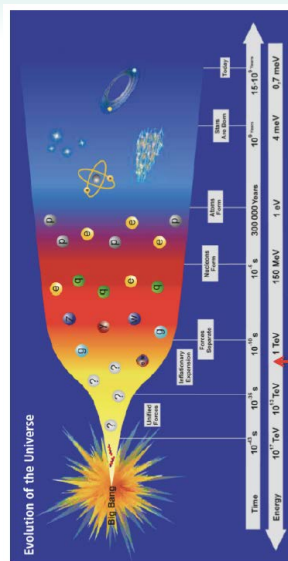
Quando particella e antiparticella si incontrano si annichilano

Particelle e antiparticelle vengono prodotte in quantità uguali nelle interazioni

(le antiparticelle non solo sono osservate normalmente, ma sono usate di routine nella PET)



# Dove è finita l'antimateria?



Dal Big Bang e dalla conversione di energia in materia, particelle e antiparticelle sono state prodotte in egual misura

- però il nostro universo è formato solo da materia (almeno per quanto riusciamo ad osservare astronomicamente)

Dove è finita l'antimateria?

L'annichilazione fra particelle e antiparticelle non può eliminare solo antiparticelle

L'unico meccanismo che conosciamo sono le piccole differenze ("violazione di CP") fra particelle e antiparticelle composte da quark pesanti

Basta a spiegare la sparizione dell'antimateria nell'universo?

# Materia oscura ed energia oscura

L'universo ha una massa molto maggiore di quella "visibile" dovuta alla materia "ordinaria"

Come ce ne siamo accorti?

Misurando la velocità di rotazione delle galassie

La velocità di rotazione dipende dalla massa all'interno dell'orbita

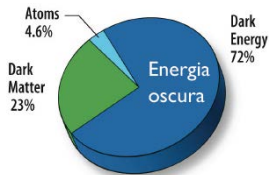
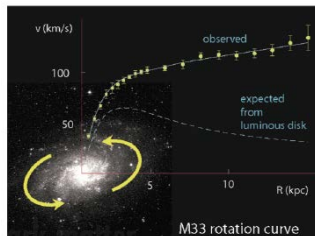
La massa è circa 20 volte più grande di quella visibile!

**Materia oscura!**

si può produrre in interazioni fra particelle?

E non basta: la velocità di espansione dell'universo non è compatibile con la sua massa

**Energia oscura?**



La materia ordinaria è meno del 5%!!

# Altri problemi aperti nel Modello Standard

- Ci sono tante particelle...
  - 6 quark
  - 6 leptoni  
(e le loro antiparticelle!)
  - 4 mediatori delle forze
  - il bosone di Higgs

Troppe?

- perchè ci sono tre famiglie?  
(3 è il numero minimo che consente piccole differenze fra materia e antimateria, ma potrebbero essere anche di più)
- perchè hanno masse così diverse?
- e la gravità come la includo nella teoria?





# Estensioni del Modello Standard?

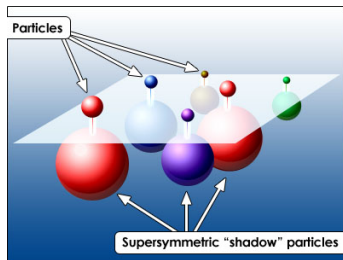
Ci sono diverse idee su come sia possibile estendere il modello standard

Alcuni modelli ipotizzano che ad ogni particella corrisponda una particella "supersimmetrica"

Le particelle supersimmetriche sono (molto?) più pesanti

La più leggera di queste particelle supersimmetriche sarebbe stabile

E' stato anche proposto che ci siano anche altre dimensioni oltre alle 3 spaziali che conosciamo

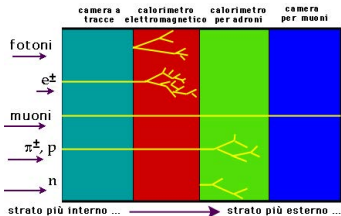


Tutte queste teorie prevedono qualche fenomeno osservabile solo ad energie di interazione più alte di quelle studiate fino ad oggi

# Una possibile strategia:

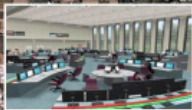
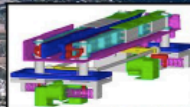


Un acceleratore in grado di produrre moltissime collisioni ad altissima energia (devono essere tante perchè le particelle che cerchiamo possono essere prodotte molto raramente)



un insieme di rivelatori, che sfruttano nel modo migliore le diverse interazioni coi diversi tipi di particelle in modo da ricostruire quello che viene prodotto nelle collisioni

# Il CERN, LHC e gli esperimenti



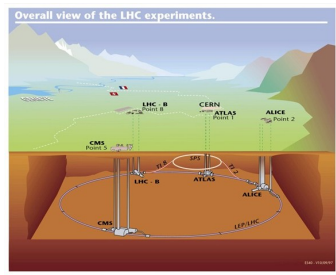
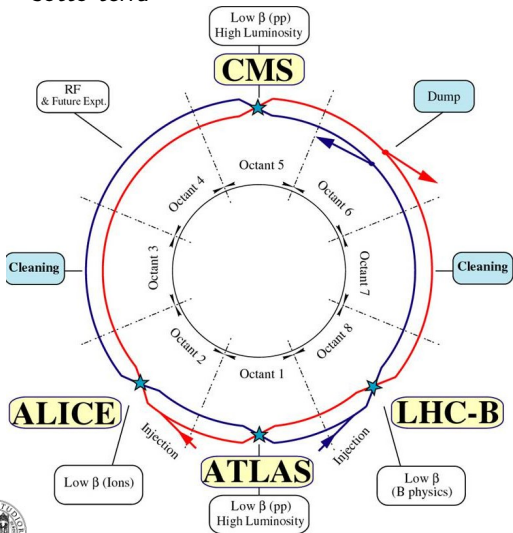
# CERN: Centro Europeo di Ricerca Nucleare

- 1949: prima proposta per un laboratorio europeo L. de Broglie
- 1950: proposta all'UNESCO
- 1952: scelta della sede di Ginevra  
E. Amaldi nominato Segretario Generale del CERN
- 1954:ratifica della convenzione tra i 12 Stati Fondatori Repubblica Federale Tedesca, Belgio, Danimarca, Francia, Grecia, Italia, Norvegia, Olanda, Gran Bretagna, Svezia, Svizzera, Jugoslavia
- **OGGI:** 21 stati membri contribuiscono al finanziamento rappresentati nel Council responsabile di tutte le decisioni



# LHC

Due fasci di protoni accelerati fino a 7 TeV e portati a collidere frontalmente in un anello di 27 km che si trova mediamente 100 metri sotto terra



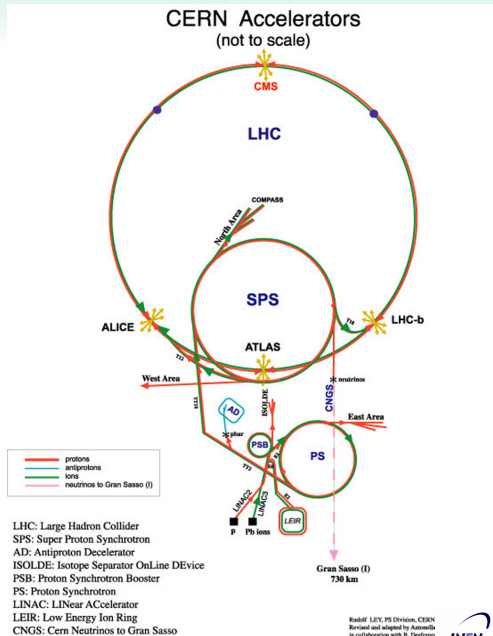
I ricercatori di Bologna partecipano a quattro degli esperimenti: LHCb, Atlas, CMS e ALICE

# Accelerare le particelle fino a 7 TeV

Portare i protoni a quelle energie richiede un sistema che li acceleri gradualmente

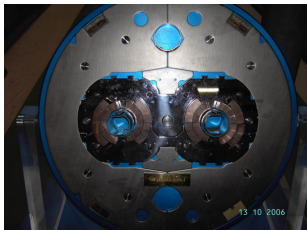
possono essere anche utilizzati per altri tipi di esperimenti, utilizzando le tante "linee di estrazione" dei fasci

Tantissime misure diverse, non solo LHC!

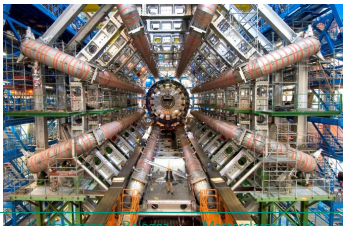


# Una impresa tecnologica!

magneti superconduttori alla temperatura di 1.9 K (-271°C) in tutti e 27 i km del tunnel



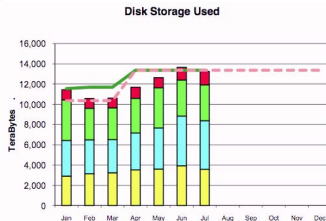
progettare costruire e installare rivelatori alti come un palazzo di 5 piani



scavare e attrezzare caverne per alloggiare i rivelatori



migliaia di Terabytes al mese da acquisire e analizzare



# Quanto è costato?

Circa 20 anni di lavoro tra progettazione e costruzione, circa 10.000 fisici ed ingegneri di 85 paesi.

- 6 miliardi di euro
  - un quarto delle Olimpiadi di Londra
  - una settimana di guerra in Iraq
- 36 milioni di euro all'anno
  - 60 cent/anno per ciascuno di noi
  - le commesse alle ditte italiane sono state molto maggiori dell'investimento italiano  
(l'Ansaldo ha costruito circa 1/3 dei magneti)





# Non è solo questione di soldi

La conoscenza non ha prezzo... .. ma ha un valore!

Dalle ricerche in fisica delle particelle

- strumenti per la diagnostica medica  
PET, risonanza magnetica,...
- cura dei tumori con adroterapia  
tre centri in Italia
- radiofarmaci
- studio dei coni vulcanici coi raggi cosmici
- strumenti per la conservazione dei beni culturali
- .....
- schermi "touch screen"
- il WorldWideWeb è nato al CERN ed è stato messo gratuitamente a disposizione di tutti nel 1993
- GRID
- tanti piccoli e grandi contributi a telecomunicazioni, transistor e microchip, laser, cristalli liquidi, materiali innovativi
- ...

