



Pieralberto Marchetti

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Università di Padova

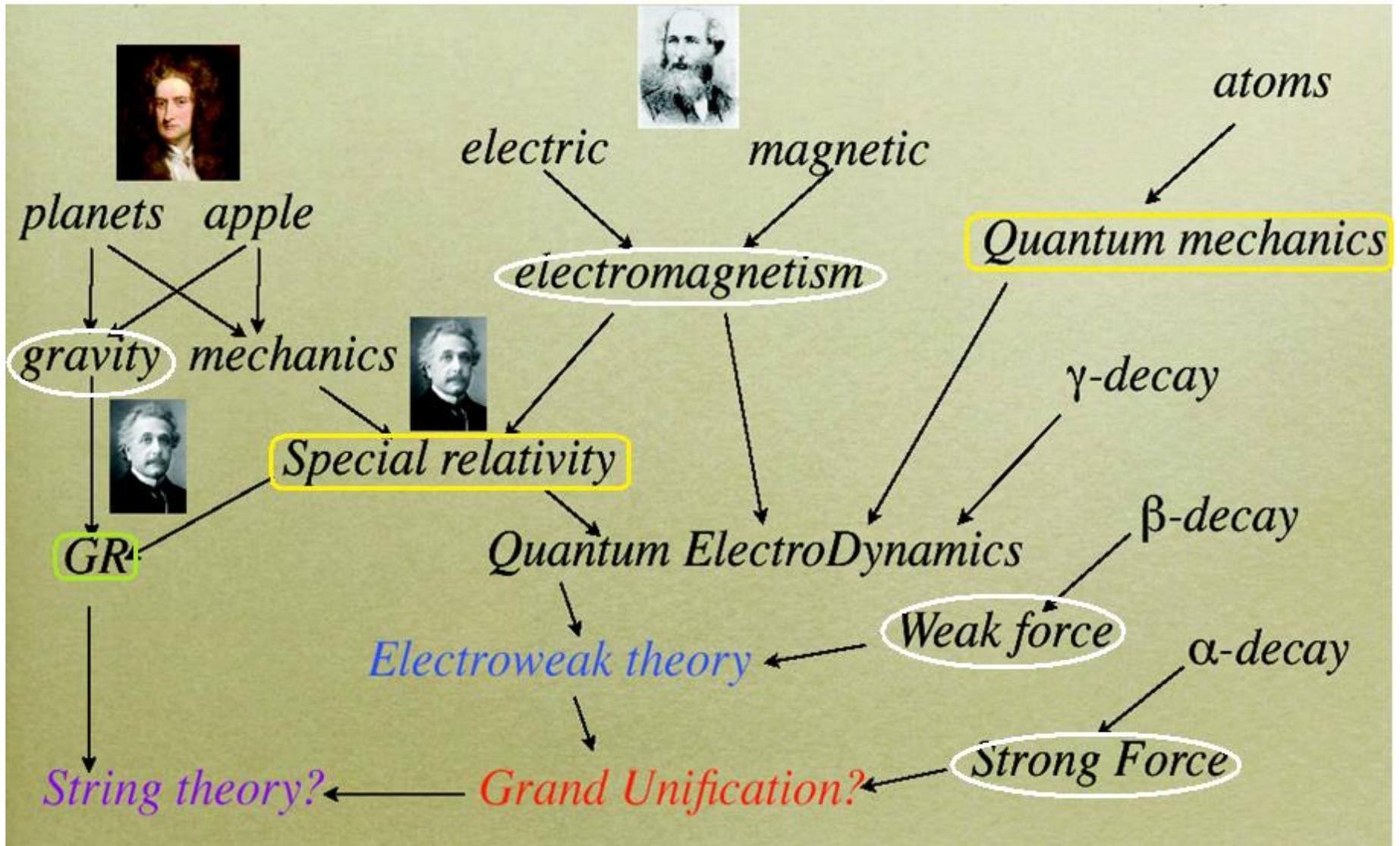


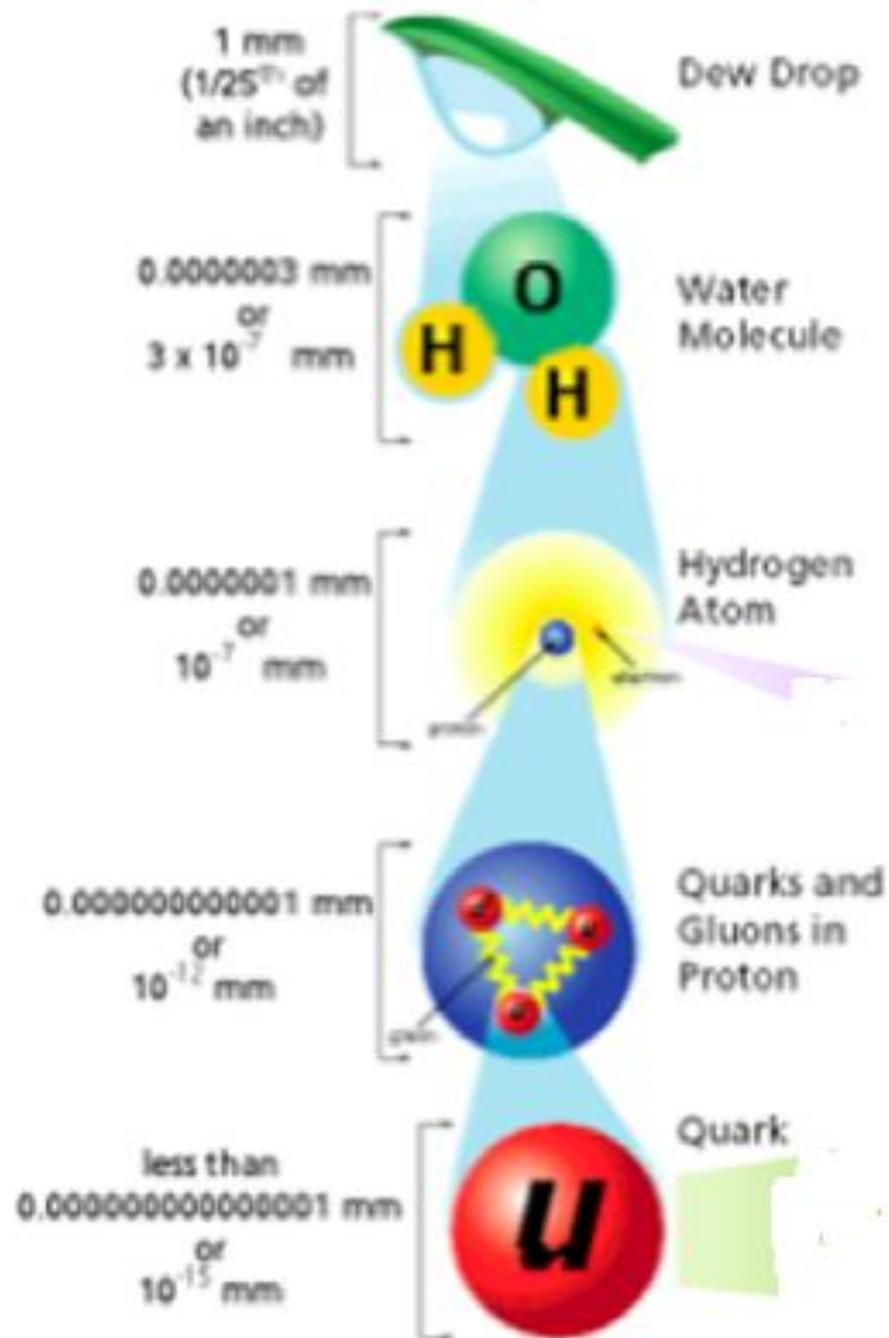
Le Particelle elementari:  
i fondamenti della materia

# Modello Standard: DOMANDE “FONDAMENTALI” SULLA MATERIA

- Scomponendo la materia parti sempre piu' piccole, e' possibile arrivare a “costituenti fondamentali” della materia , particelle di materia che non sono divisibili e che non hanno struttura?
- Quali sono le forze ( “interazioni”) che agiscono sulla materia?
- Esiste una UNIFICAZIONE delle forze per cui la varieta' delle interazioni discende da un'unica interazione fondamentale?
- Referenze: R.P. Feynman “ QED, la strana teoria della luce e della materia” Adelphi; G.F. Giudice “Odissea nello zeptospazio” Springer

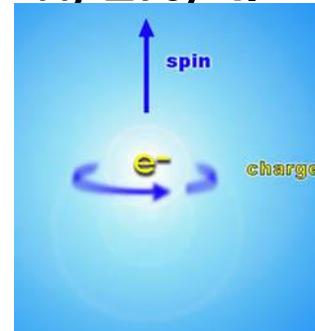
# UNIFICAZIONE DELLE INTERAZIONI FONDAMENTALI





# FERMIONI & BOSONI

- Le particelle quantistiche sono caratterizzate dalla massa (in quiete) e da una quantità solo quantistica correlata alle rotazioni...lo spin  $s$  che rappresenta (in unità di  $\hbar=h/2\pi$ ) il loro momento angolare intrinseco (idea intuitiva di spin: particella ruotante attorno a un asse, ma falsa: puntiforme non può ruotare su se stessa)
- Particelle suddivise in 2 categorie:
- **Fermioni** -> spin semintero (elettroni, quarks ...) **particelle di materia**
- **Bosoni** -> spin intero (fotoni, Higgs...) trasmettono le interazioni = **radiazione** (elettromagnetica...)



# MATERIA & RADIAZIONE

Particelle elementari di due tipi

Particelle

Mediatori

di materia

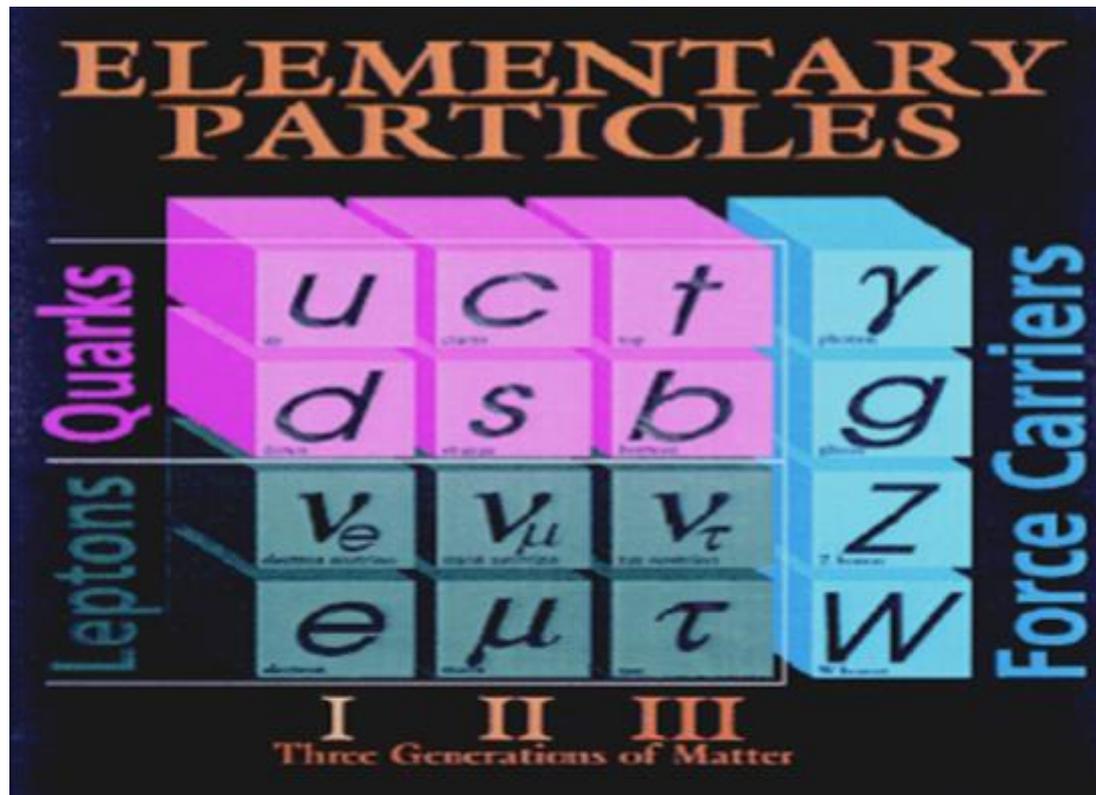
delle

interazioni

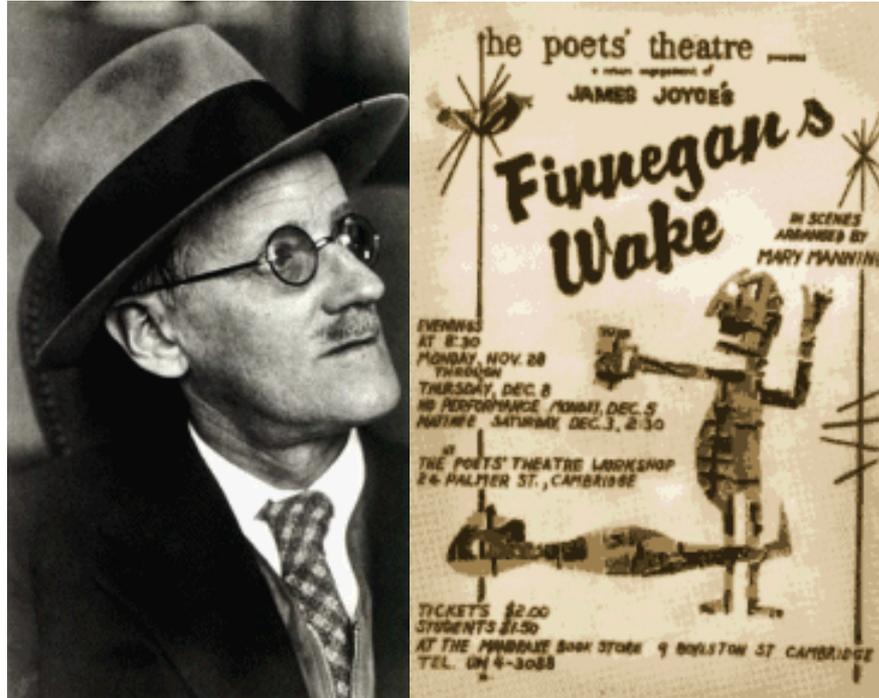
Fermioni

(radiazione)

Bosoni



# Da dove la parola Quark?



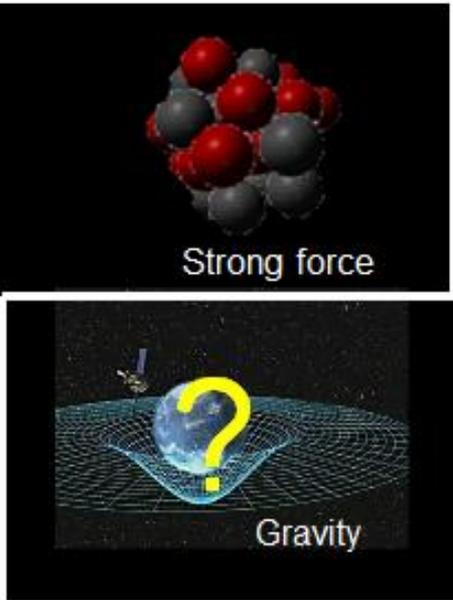
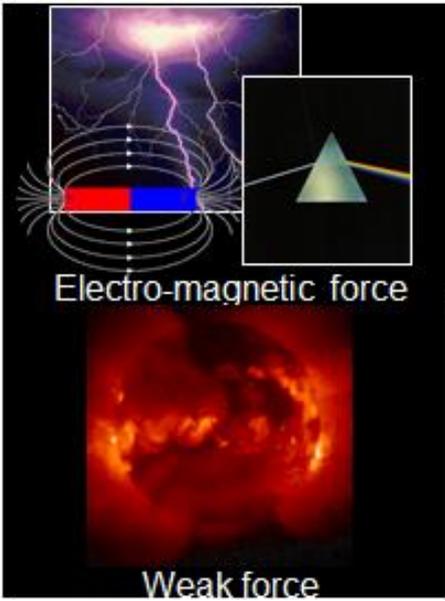
James Joyce  
**Three Quarks  
for Muster Mark**

— Three **quarks** for Muster Mark!  
Sure he hasn't got much of a bark  
And sure any he has it's all beside the mark.



Murray Gell-Mann

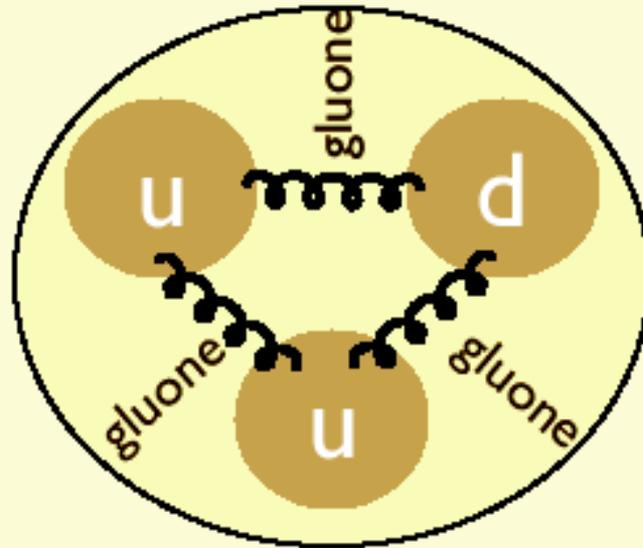
# Interazioni



<u>Interazione</u>	<u>Mediatore</u>	<u>R</u> (cm)	<u>Forza</u>	<u>Azione</u>
Gravitazionale	Gravitone (G) ?	$\infty$	$\approx 10^{-43}$	Q , L
Elettromagnetica	Fotone ( $\gamma$ )	$\infty$	$\approx 10^{-2}$	Q , L
Debole	3 Bosoni ( $W^{\pm}, Z^0$ )	$10^{-15}$	$\approx 10^{-5}$	Q , L
Forte (Colore)	8 Gluoni ( $g_i$ )	$10^{-13}$	1	Q

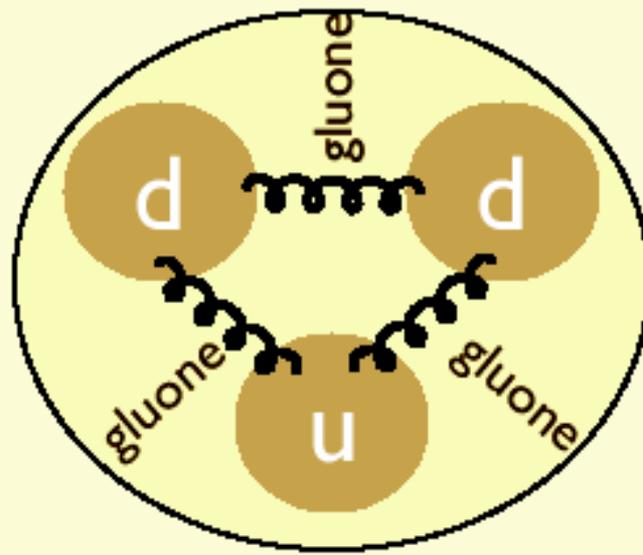
# COLLA NUCLEARE: QUARKS+GLUONI → ADRONI

Protone



$$Q = \frac{2}{3} e + \frac{2}{3} e - \frac{1}{3} e \\ = e$$

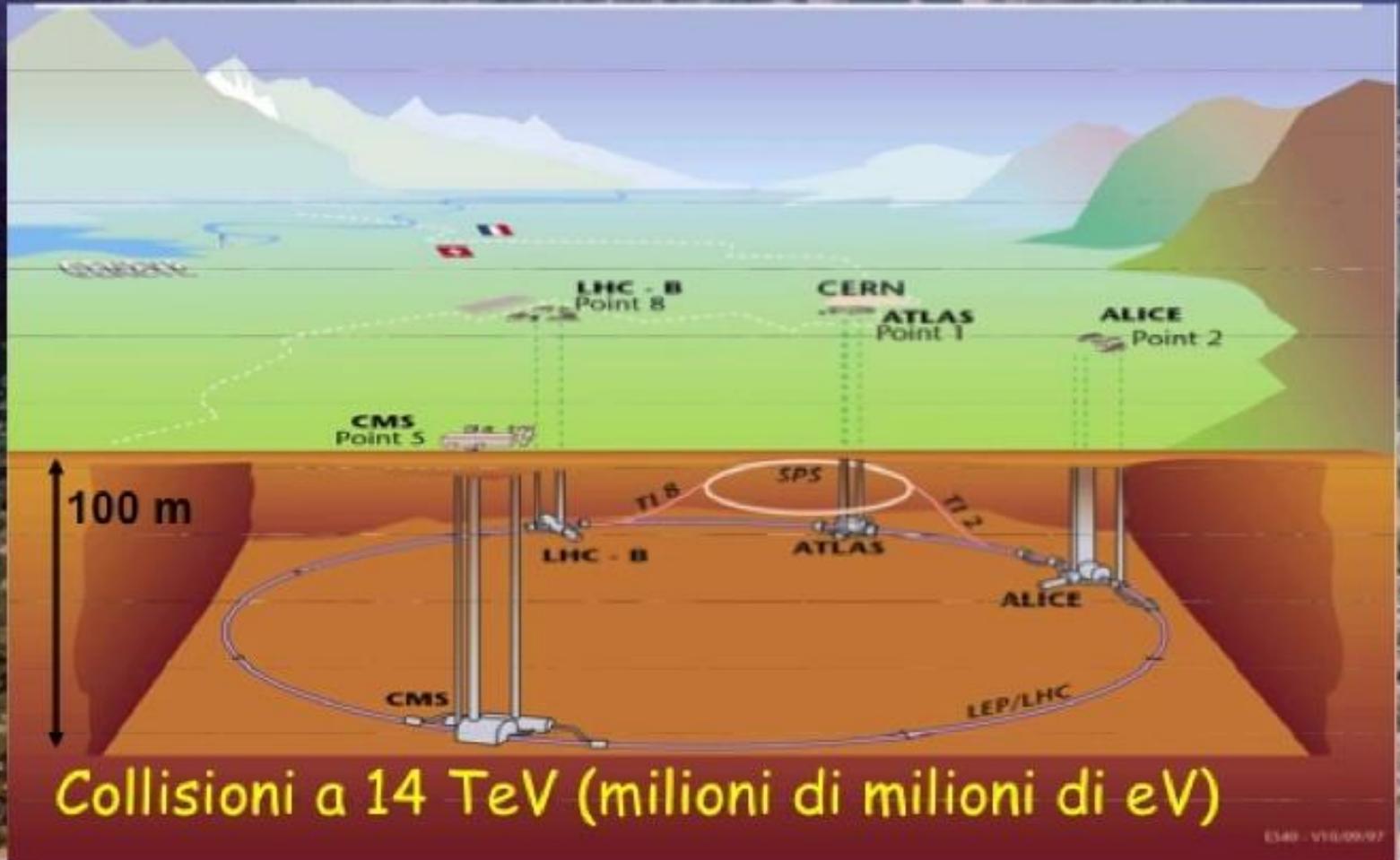
Neutrone



$$Q = \frac{2}{3} e - \frac{1}{3} e - \frac{1}{3} e \\ = 0$$

# Large Hadron Collider (LHC) [=Grande acceleratore di adroni (protoni) ] al CERN

## LHC at CERN

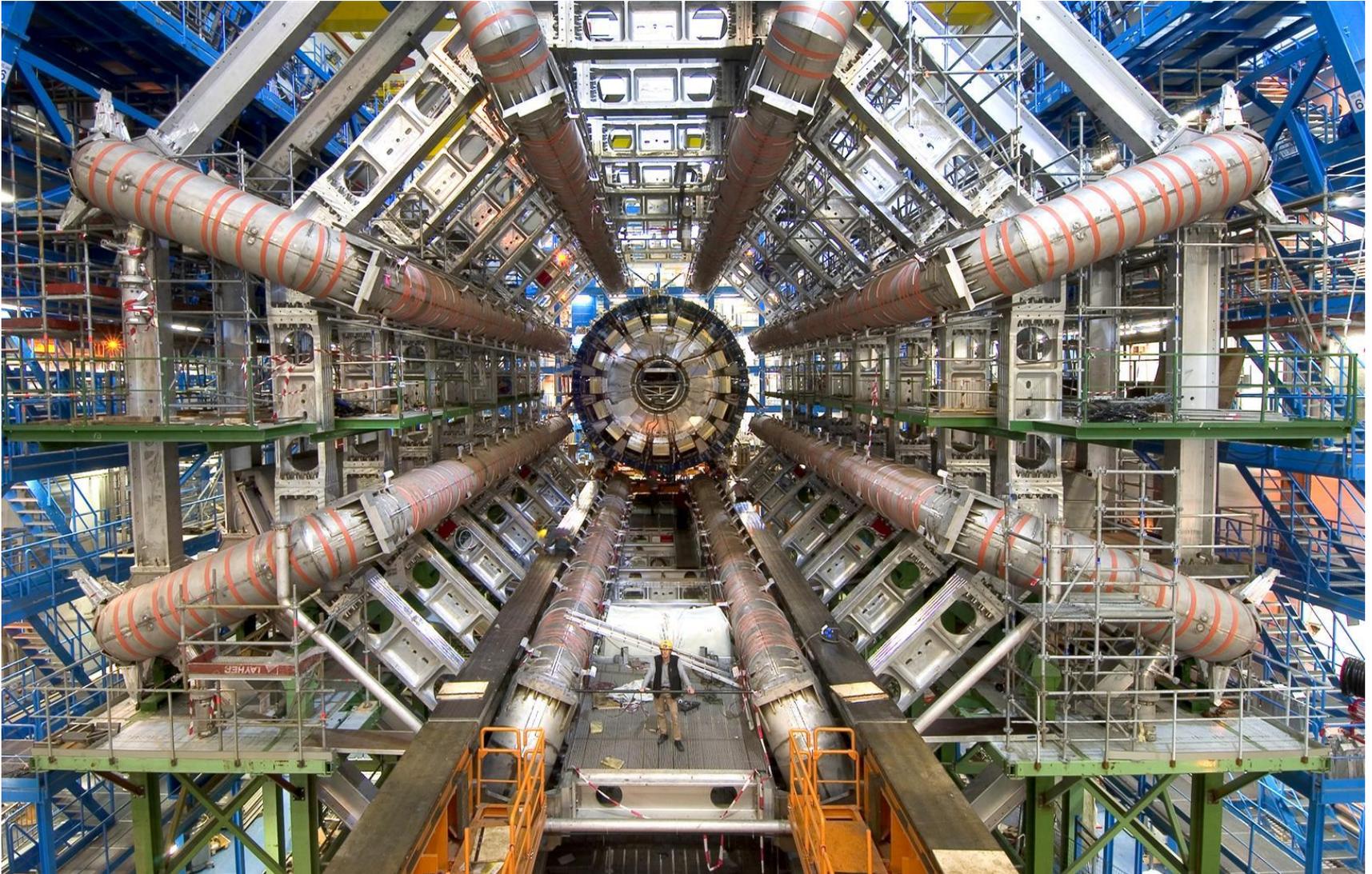


# The Large Hadron Collider (LHC)



**The LHC tunnel – with bending magnets as far as the eye can see**

# ATLAS – The Toroids



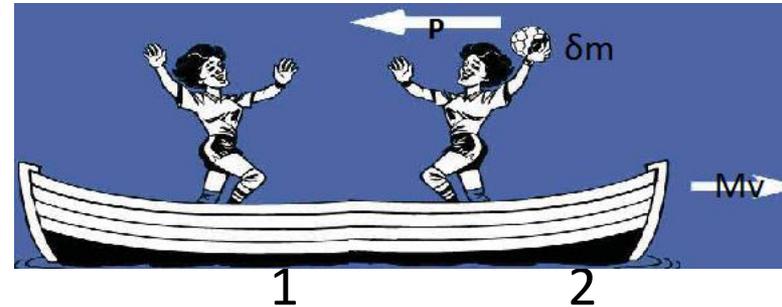
**ATLAS – the 8 huge Toroidal magnets in place**

# PERCHE' LHC?

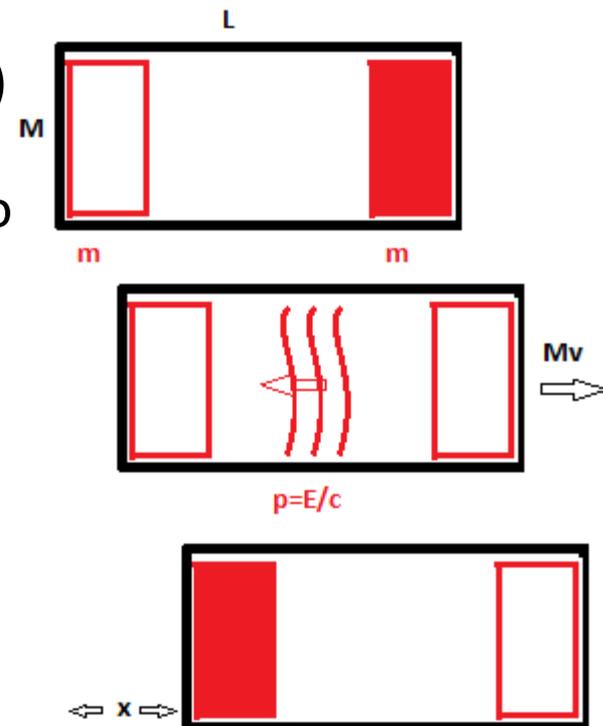
- Perche' acceleratori a energie sempre maggiori ?
- Cos'è il bosone di Higgs?
  
- La fisica delle particelle elementari e' governata dalle leggi della **Relativita'** e della **Meccanica Quantistica**.

# Massa = Energia

- Un effetto della Relatività è che **un corpo fermo ha energia per il solo fatto di avere massa**: la celebre  $E = m c^2$



Consideriamo due corpi (1 e 2) di ugual massa  $m$  (non-relativistica) in una scatola con massa totale  $M$ . Il corpo 2 ha energia che trasferisce a 1 tramite radiazione di energia  $E$  a cui è associato un impulso  $p = E/c$  (teoria elett-magn.) Sotto effetto di  $p$  la scatola si muove, ma quando l'energia della radiazione è stata assorbita da 2, avendo (non-relativ.) 2 la stessa massa il baricentro del sistema sembra si sia mosso senza l'azione di forze esterne. Il problema si risolve se l'assorbimento di  $E$  ha variato la massa di  $\delta m$ , corrispondente, poiché la radiazione si muove con velocità  $c$ , a un impulso  $\delta m c = p = E/c$ ,  
 $\rightarrow E = \delta m c^2$



# Relatività: Energia e velocità della luce

- La formula  $E=mc^2$  e' valida solo se la particella di massa  $m$  e' in quiete; se si muove con velocità  $v$  la formula diventa

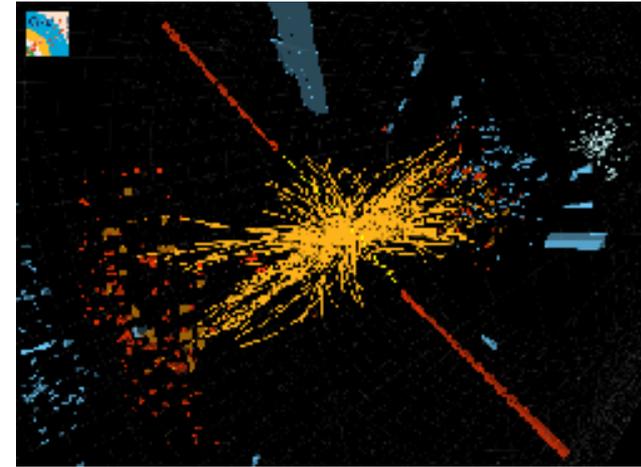
$$E = mc^2 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

che per  $v/c$  piccolo diventa  $E \approx mc^2 + (1/2)m v^2$  (energia di massa+cinetica)

- Da qui si vede che puo' essere ammessa , per  $E>0$ , massa  $m=0$  solo se  $v=c$  (lo 0 del numeratore e' compensato dallo 0 del denominatore) , e in effetti **particelle che hanno massa nulla** (come le particelle di luce, i fotoni) **si muovono sempre a velocità  $c$**
- **Inoltre poiche' nei sistemi (isolati) l'energia si conserva ma non la massa , compaiono fenomeni impossibili nella meccanica Newtoniana**

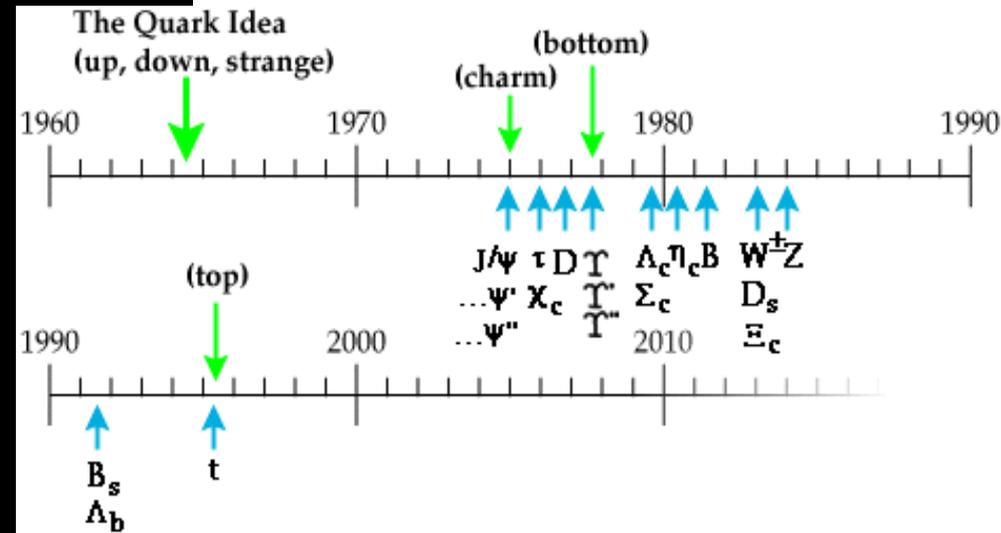
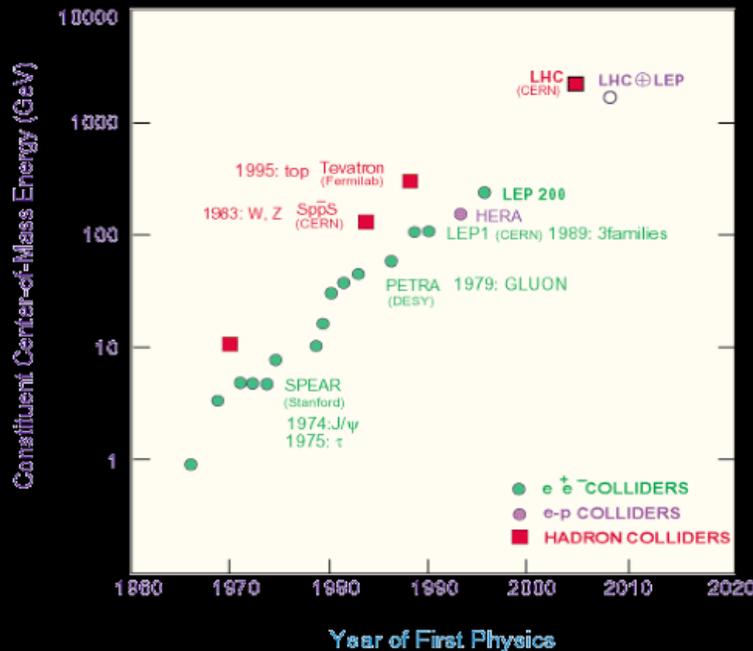
# Creazione e decadimenti di particelle

- Nuove **particelle possono crearsi in un urto di altre particelle**, ad esempio due protoni all'acceleratore LHC del CERN di Ginevra.
- **Decadimenti**: una particella di massa  $M$  può decadere ("trasformarsi") in altre particelle di massa  $m_1, m_2, \dots$  purché  $M > m_1 + m_2 + \dots$   
(ad esempio un neutrone isolato decade in media in 15 minuti in un protone un elettrone e un antineutrino)  
Ma per capire come sia possibile occorre anche la Meccanica Quantistica, particelle relativistiche classiche non possono "sparire" e "trasformarsi"...



# E ancora...

- Poiché in un urto l'energia totale si conserva, se vogliamo produrre particelle di massa più grande dobbiamo avere energie maggiori e accelerandole le particelle incidenti acquistano energia

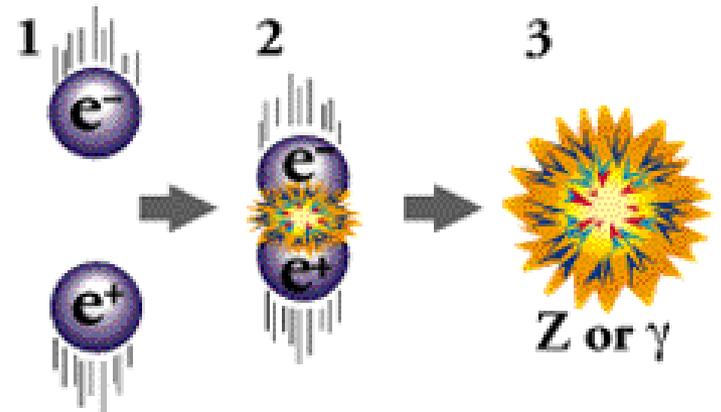


# Energie positive e negative

- L'energia di una particella relativistica è:
- $E = mc^2 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$  , quella analoga per l'impulso è
- $p = mv / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$
- Quindi mentre in fisica classica per una particella libera di massa  $m$ ,  $E = (1/2)mv^2 = p^2/2m$ , in fisica relativistica
- $E^2 - p^2c^2 = (m^2c^4 - m^2v^2c^2) / (1 - v^2/c^2) = m^2c^4$  e pertanto
- $E = \pm (m^2c^4 + p^2c^2)^{1/2}$  sono possibili  $E < 0!!$

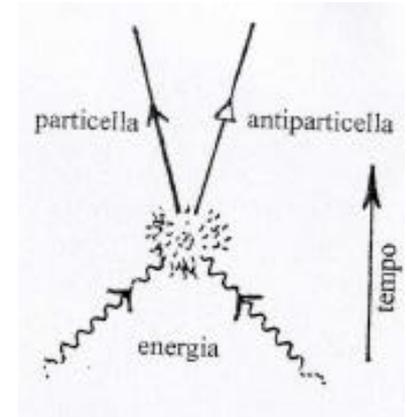
# Relativita' +Meccanica Quantistica

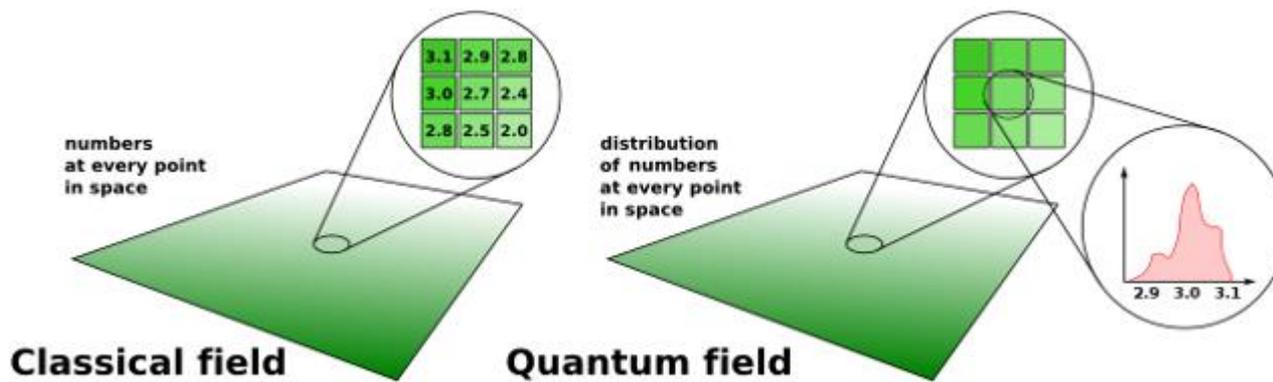
- Se combiniamo Relativita' (velocità della luce  $c$  assoluta)+Meccanica Quantistica
  - A ogni particella quantistica (" $E>0$ ") corrisponde la sua "antiparticella" (" $E<0$ " antimateria) con uguale massa, carica opposta [ad esempio anti-elettrone=positrone, antiprotone...] e opposto spin
  - Quando una particella collide con la sua antiparticella entrambe si distruggono producendo solo radiazione
- Compatibilmente con  $E=mc^2$



# Relativita' + Meccanica Quantistica = Teorie di Campo Quantistiche Relativistiche

- Una **radiazione o campo intenso**, elettromagnetico o gravitazionale, viceversa, **puo' produrre coppie particella-antiparticella**.
- Quindi **il numero delle particelle quantistiche ora non e' piu' costante**
- Come i fotoni (che si possono emettere e assorbire) erano descritti dal campo elettromagnetico cosi' ora a ogni particella quantistica e' associato un campo che la crea/distrugge assieme alla sua funzione d'onda

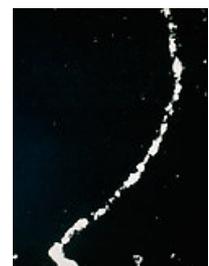
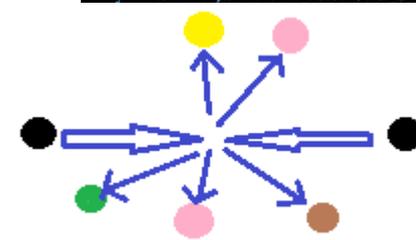
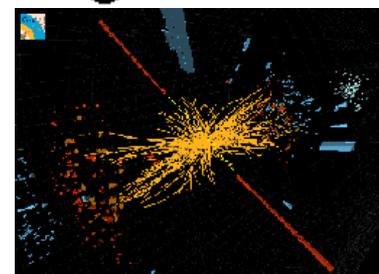
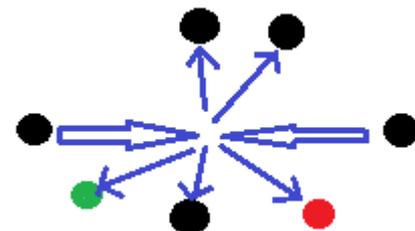




- Quello che indichiamo come "campo" è un'entità che esiste in ogni punto dello spazio-tempo, "che regola la creazione e l'annichilazione delle particelle" nei vari punti dello spazio-tempo.
- E' eliminata così la grande distinzione tra materia e radiazione che ancora esisteva in MQ in cui i fotoni potevano essere creati e distrutti mentre le particelle quantistiche di materia (elettroni, protoni,...) erano indistruttibili
- **Sono queste particelle elementari descritte dai campi quantistici che possono decadere, essere create,annichilate...**

# Incredibili proprietà delle particelle elementari

- Se pensiamo 'classicamente' , il comportamento delle particelle elementari è folle...
- Due palle nere (p) si scontrano ad alta v producono 3(!) palle nere uguali ad esse + una palla verde (anti-p) e una rossa ( $E=mc^2$ )
- Ma nelle stesse condizioni possono anche non produrre alcuna palla nera, ma invece due rosa una verde e una gialla e non sappiamo mai prima quale è il risultato , solo la probabilità (quantistica)
- Una palla nera (n) ferma , ma non sappiamo quando, sparisce e lascia al suo posto una gialla,rosa,rossa...(p,e,v)



# Interazione materia-radiazione

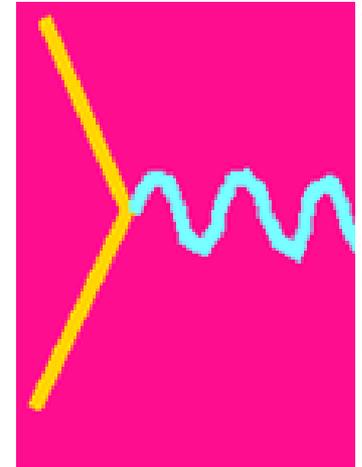
Incredibile semplicità: solo 3 processi base:



Propagazione di particelle di materia (fermioni)

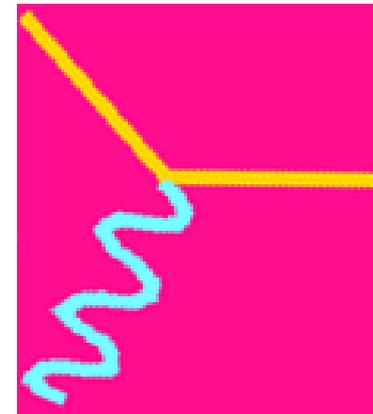
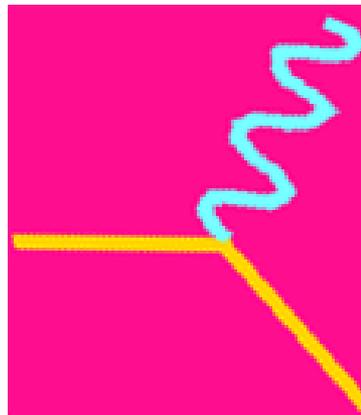
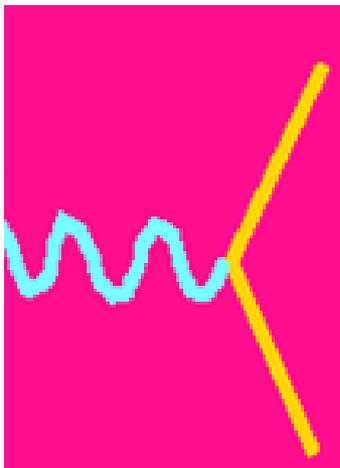


Propagazione di radiazione (bosoni)

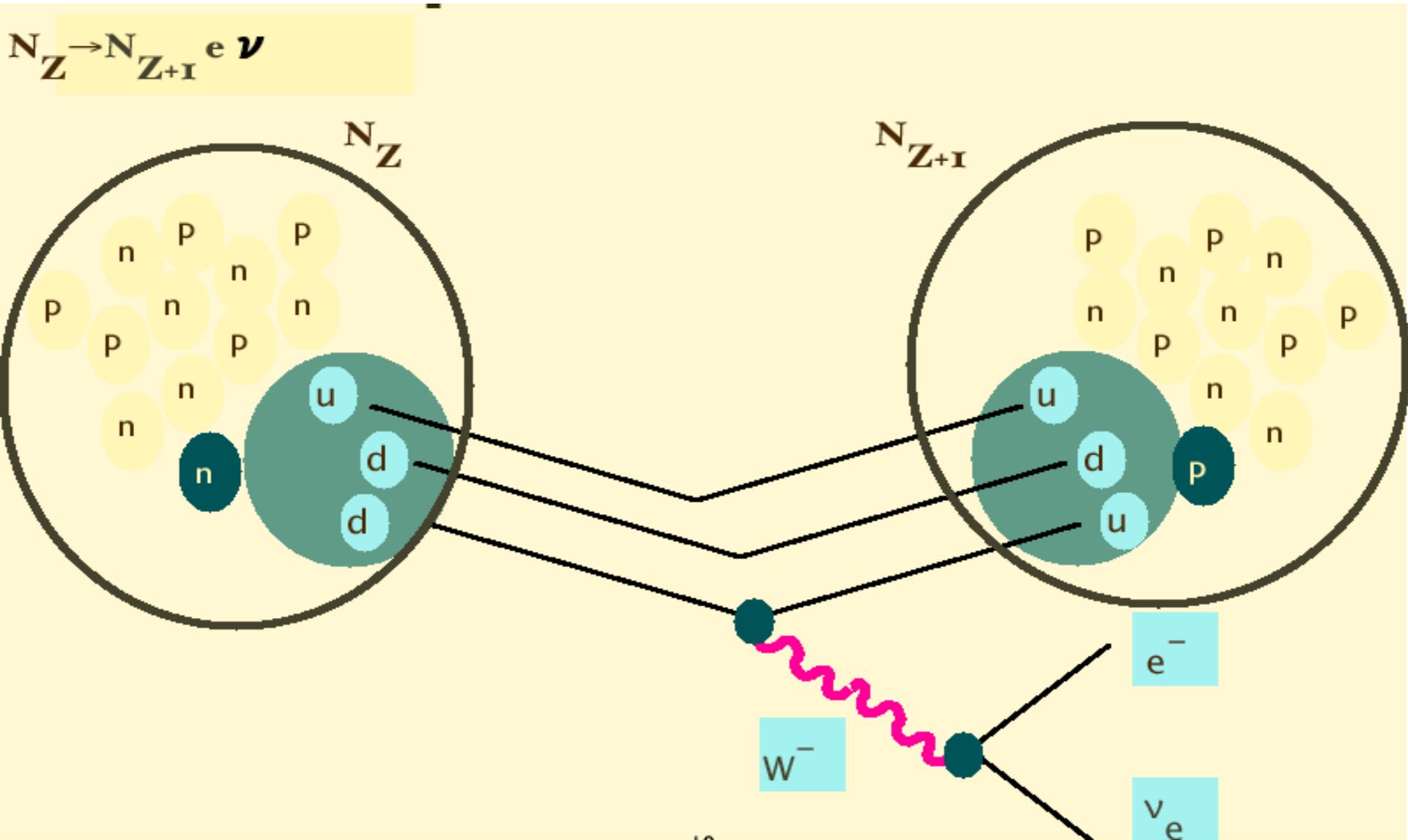


→ tempo

Interazione materia-radiazione



DECADIMENTO RADIOATTIVO  $\beta$  DI UN NUCLEO A LIVELLO  
DELL'INTERAZIONE DEBOLE TRAI SUOI QUARK COSTITUENTI

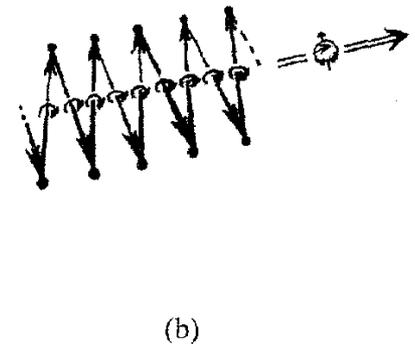
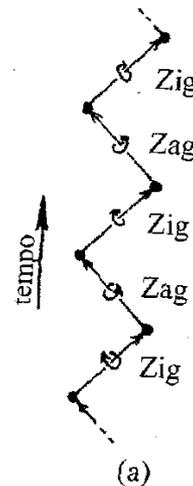


# L'ORIGINE DELLA MASSA DELLE PARTICELLE

- Sappiamo che una particella con  $m=0$  deve muoversi alla velocità della luce. Per tali particelle sarebbe impossibile formare la materia che conosciamo...eppure in teorie quantistiche relativistiche la velocità istantanea delle particelle di materia è  $c$  (!) come se fossero senza massa. Solo che se  $m \neq 0$  la particella oscilla rapidissimamente attorno a una traiettoria con velocità media  $v < c$ .

Forse la massa è generata?

In effetti si ritiene che ne sia responsabile una nuova particella: il bosone di Higgs



# IL BOSONE DI HIGGS

- Come si genera la massa ?

La particella trovata a LHC, il **bosone di Higgs**, essendo un bosone puo' "**condensare nel vuoto**" cioe' nel vuoto c'e' una densita' finita di bosoni di Higgs con impulso 0.

- **Tutte le particelle di materia sono in origine assunte con  $m=0$ , ma alcune interagiscono col condensato**

- Ogni volta che una di queste particelle

interagisce con un Higgs del condensato la direzione della

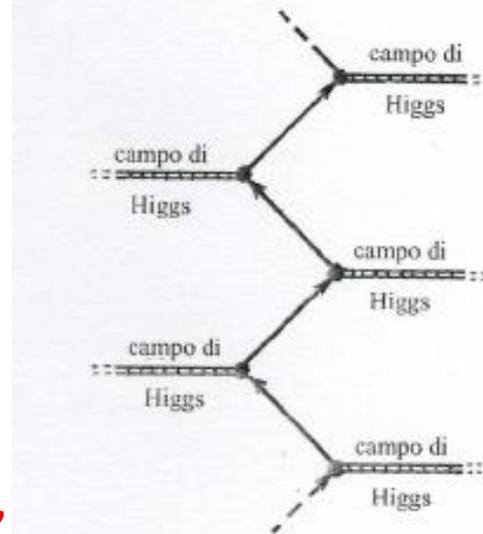
velocita' istantanea ( $c$ ) si inverte,

Cosi' si generano le oscillazioni

che descrivono la massa, e' come

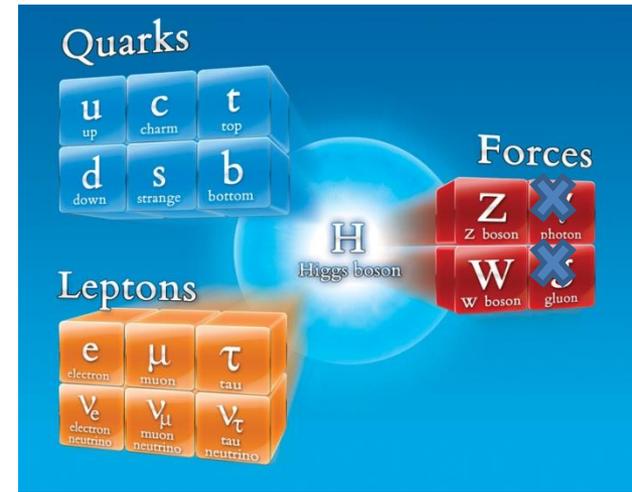
se queste oscillazioni "frenassero"

la particella originando la sua massa inerziale



# Verifica sperimentale

- Come possiamo provare questo?
- Provocando con urti onde nel condensato di Higgs con energia non nulla: per la meccanica quantistica relativistica sappiamo che un'onda (quantistica) è descritta da un campo che crea e distrugge particelle. La particella corrispondente all'onda nel condensato di Higgs è il famoso bosone di Higgs



Peter Higgs a LHC



Gravity  
?

