

# Introduzione alla fisica delle particelle ed al Modello Standard

Giorgio Chiarelli  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
Sezione di Pisa

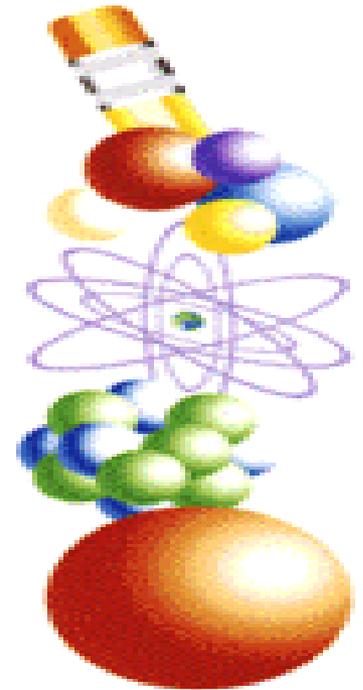
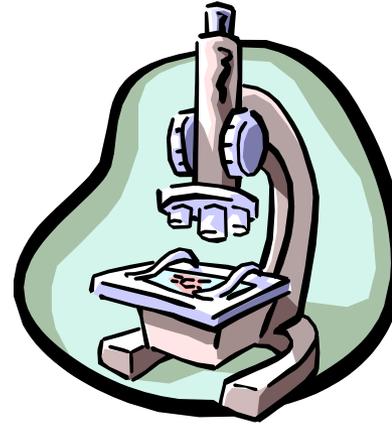
# Cosa studia?

La fisica delle particelle affronta domande sui componenti base della materia

- ☞ Chi sono?
- ☞ Cosa sono?
- ☞ Come interagiscono?

Si occupa dell'infinitamente piccolo, poichè guarda i componenti subatomici...

- ☞ Ma quello che si scopre si utilizza anche per capire meglio cosa è accaduto all'inizio del nostro Universo e cosa in esso accade tuttora...



# I primi passi...

Nel XIX secolo emerge il modello atomico (chimica)

☞ Ma da cosa è fatto l'atomo, e come è fatto ?

⇒ ?

Nello stesso secolo si studiano le proprietà delle correnti elettriche e del magnetismo

☞ Prima *unificazione* di due forze come diremmo in un linguaggio moderno

⇒ Eletticità e magnetismo, apparentemente fenomeni separati

- Unificati da James C. Maxwell intorno al 1860
- 150 anniversario

Una sola spiegazione per fenomeni differenti:

⇒ Nasce l'elettromagnetismo

→ Si apre la via alla relatività ed alla MQ

# Un lungo viaggio

Gli scienziati dell'ottocento avevano realizzato che c'erano due cose da capire:

☞ Come è fatta la materia?

⇒ Atomi (elettroni, scoperti alla fine dell'800, ruotano attorno ad un nucleo elettricamente positivo)

☞ Come interagisce la materia?

⇒ (Forze)

→ Gravitazione (nota dai tempi di Newton)

→ Elettromagnetismo

Le domande non sono cambiate a distanza di 150 anni...

☞ La fisica delle particelle, la fisica del mondo subnucleare è figlia diretta di quegli studi, con un grande obiettivo di fornire un quadro coerente, che con pochi parametri, descriva il mondo delle particelle elementari.

⇒ Gli strumenti fondamentali in questo viaggio sono state due teorie sviluppate nei primi anni del '900:  
la teoria della relatività e la meccanica quantistica

**Oggi capiamo di più ma il viaggio non è terminato**

# Quale è il quadro attuale?

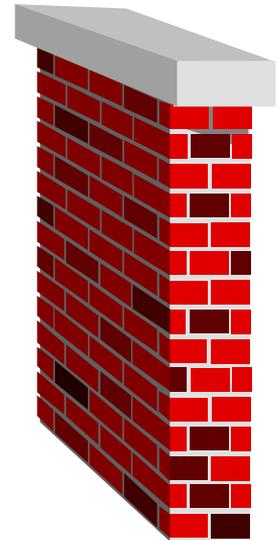
Dopo vari decenni è emersa una teoria (anni '70-'80 del '900) che gli scienziati chiamano:

☞ Il Modello Standard delle Particelle Elementari e delle Interazioni fondamentali

→ Corrisponde ad una classificazione dei *mattoni* fondamentali della materia che noi conosciamo e delle interazioni tra di essi

Attenzione: sapere come sono fatti i mattoni non vuol dire capire come è fatto un edificio.

☞ Ma se non si capisce come sono fatti i mattoni, non si capiscono davvero come sono fatti gli edifici!



# Il Modello Standard

Mattoni, sono tutti *fermioni*:

☞ Particelle con spin  $1/2$

⇒ Leptoni (6)

→ Elettrone, muone, tau (carichi) i parenti stretti senza carica elettrica: i neutrini

⇒ Quarks (6)

→ Il mondo quotidiano è composto da due soli (up, down), ma gli altri 4 fanno sentire i loro effetti

Forze:

⇒ elettromagnetica, debole, forte, gravitazione

⇒ Le forze sono *mediate* da particelle particolari

→ Le chiamiamo bosoni

- Forza elettrodebole (W, Z,  $\gamma$ )
- Forza forte: gluone (g)
- Gravitazione: gravitone (Spin 2) → non ancora osservato

# Dentro il nucleo...

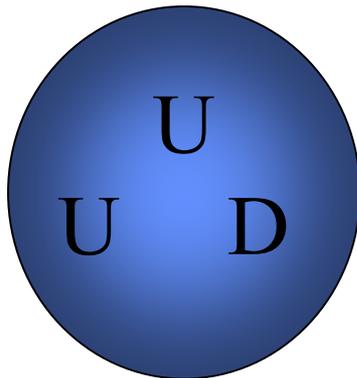
☞ Protoni e neutroni sono composti da particelle ancora più piccole (quarks)

⇒ Carica frazionaria ( $+2/3$ ,  $-1/3$ )

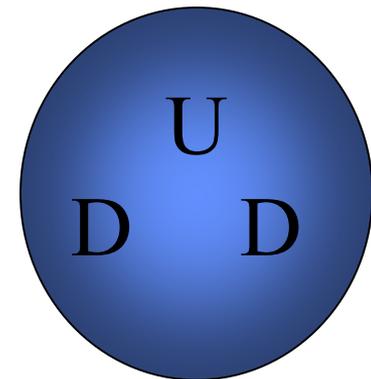
→ Up: carica  $+2/3$

→ Down: carica  $-1/3$

protone (+1)

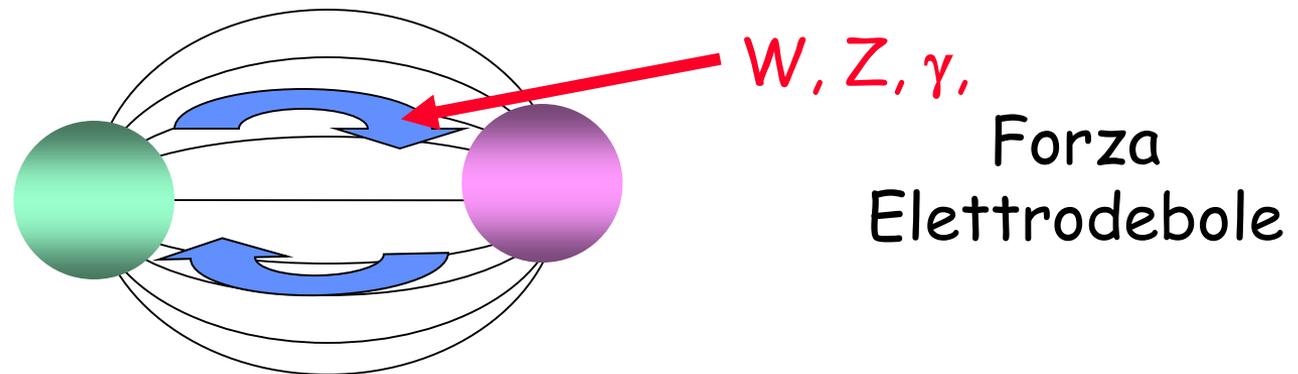


neutrone (0)



# Forze/Interazioni?

- ☞ I quarks interagiscono *scambiandosi* dei "mediatori di forze" (bosoni). I mediatori della forza debole:
  - ⇒ Vengono osservati nel 1983-1984 (W,Z)
  - Premio Nobel a Carlo Rubbia per la loro scoperta



- ⇒ Nella nostra vita un mediatore familiare è il fotone: "media" la forza EM
  - Non ha massa, ma è fratello dello Z!

# I mattoni ed (i) cementi

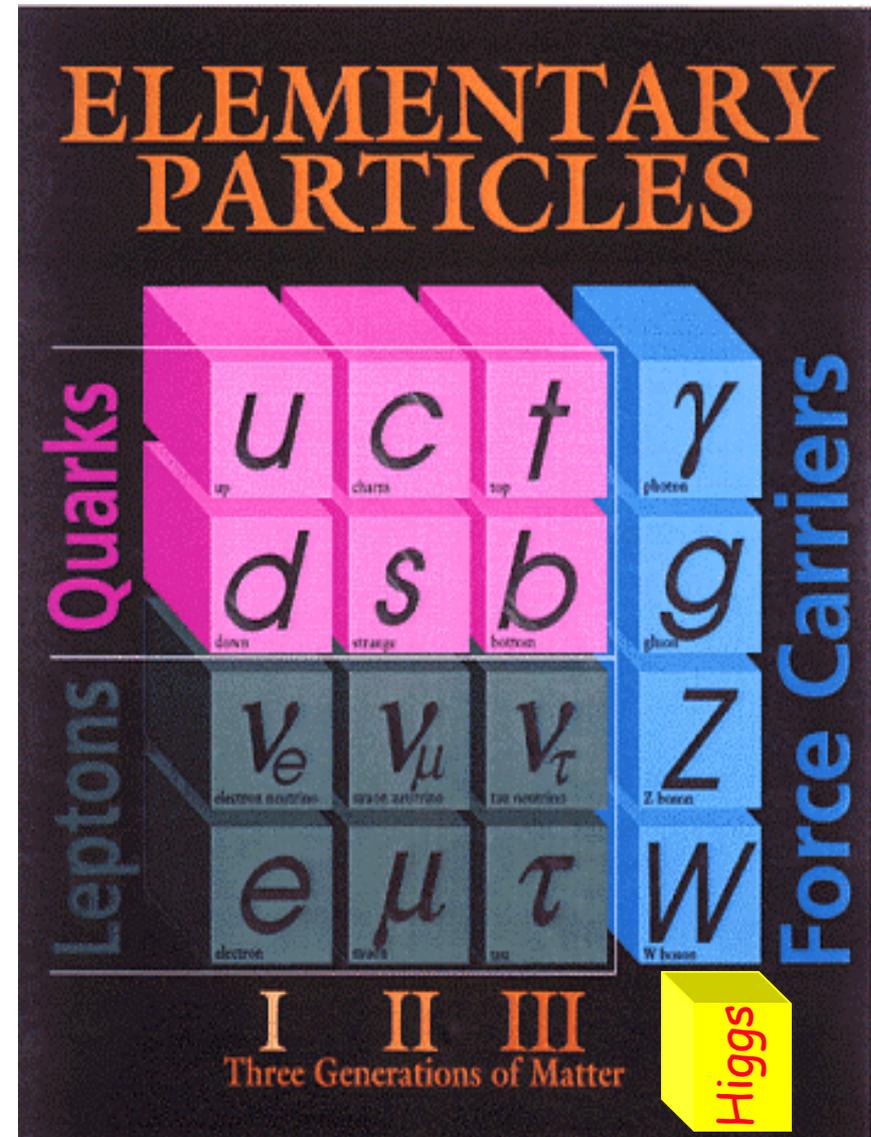
Abbiamo la materia ed abbiamo le particelle che *portano* le interazioni..

☞ Ma chi fornisce masse a tutte le altre particelle?

⇒ **Pensiamo** sia la particella di Higgs

☞ È una particella osservata da poco

⇒ LHC 4 luglio 2012



# Il concetto di decadimento

La nostra conoscenza delle particelle elementari è, molto spesso, indiretta

- ☞ Nei nostri rivelatori osserviamo solo particelle che vivono abbastanza a lungo da lasciare un segnale nell'attraversamento dei detectors

La conoscenza, ad esempio, delle proprietà di  $W$  e  $Z$  è determinata dalla misura delle proprietà delle particelle in cui queste decadono

# Cosa vuol dire "decadere"

Molte delle particelle subatomiche che studiamo sono *instabili*...che vuol dire?

☞ Vuol dire che decadono *spontaneamente* in altre particelle (a loro volta instabili o stabili) dette prodotti del decadimento

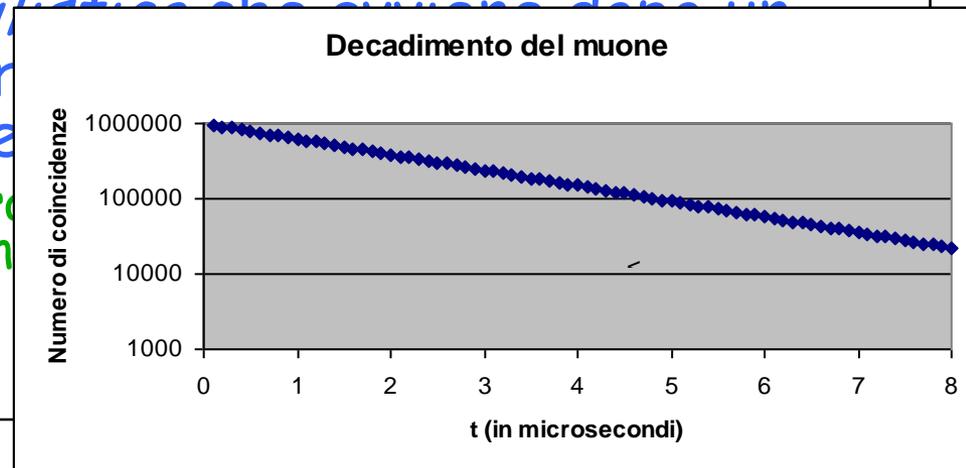
⇒ I prodotti del decadimento, se sono particelle stabili, possono essere misurati e ci raccontano qualcosa delle particelle *madri*

→ Esempio:

- La  $Z$  può decadere in varie particelle, tra queste in una coppia elettrone-positrone

⇒ È un evento *probabilistico* che avviene dopo un certo tempo. Il valore che si ottiene si chiama *vita media* della particella

→ L'andamento temporale che chiamiamo esponenziale



# W, Z, Higgs

W, Z, Higgs sono tutte particelle che decadono quasi istantaneamente

☞ Vuol dire che il loro tempo di decadimento non può essere osservato

☞ Decadimenti:

⇒  $Z \rightarrow (l, l)$  dove  $l = e, \mu, \tau, \nu$

→ Nel rivelatore due neutrini o due leptoni carichi

•  $Z \rightarrow ee; Z \rightarrow \mu\mu; Z \rightarrow \tau\tau$

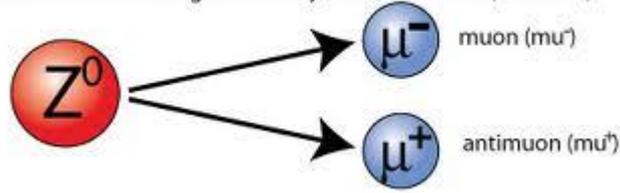
⇒  $Z \rightarrow (q_1, \text{anti-}q_1)$  dove  $q_1 = \text{up, down, charm, strange, beauty}$

→ Nel rivelatore due getti di particelle

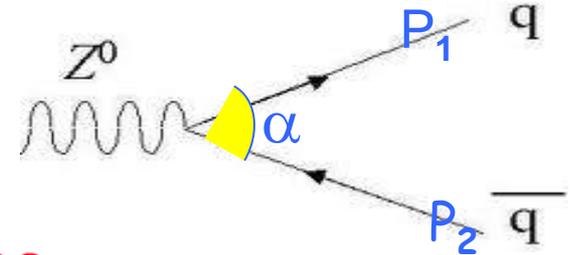
⇒ Higgs → dipende dalla massa, a grande massa decade in  $W^+W^-$ , a massa intorno a 115 GeV decadrebbe quasi solo in due quark b, alla massa osservata (circa 125 GeV) decade in varie maniere

# Dal decadimento alla massa (dello Z)

Z boson with zero charge can decay into two muons (dimuons).



$$E = mc^2$$



Definiamo il quadrimpulso  $P(E,p)$  tale che

$$P^2 = E^2 - p^2 = m^2$$

Dove  $E$  è l'energia e  $p$  è l'impulso ( $p_x, p_y, p_z$ )

In relatività ristretta si conserva il quadrimpulso  $P$

Un corpo di impulso  $P$  decade in altri due:  $P = (P_1 + P_2)$

$$P^2 = (P_1 + P_2)^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2 = E_1^2 - p_1^2 + E_2^2 - p_2^2 + 2(E_1 E_2 - p_1 p_2 \cos(\alpha))$$

$$P^2 = (P_1 + P_2)^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1 E_2 - 2\vec{p}_1 \vec{p}_2$$

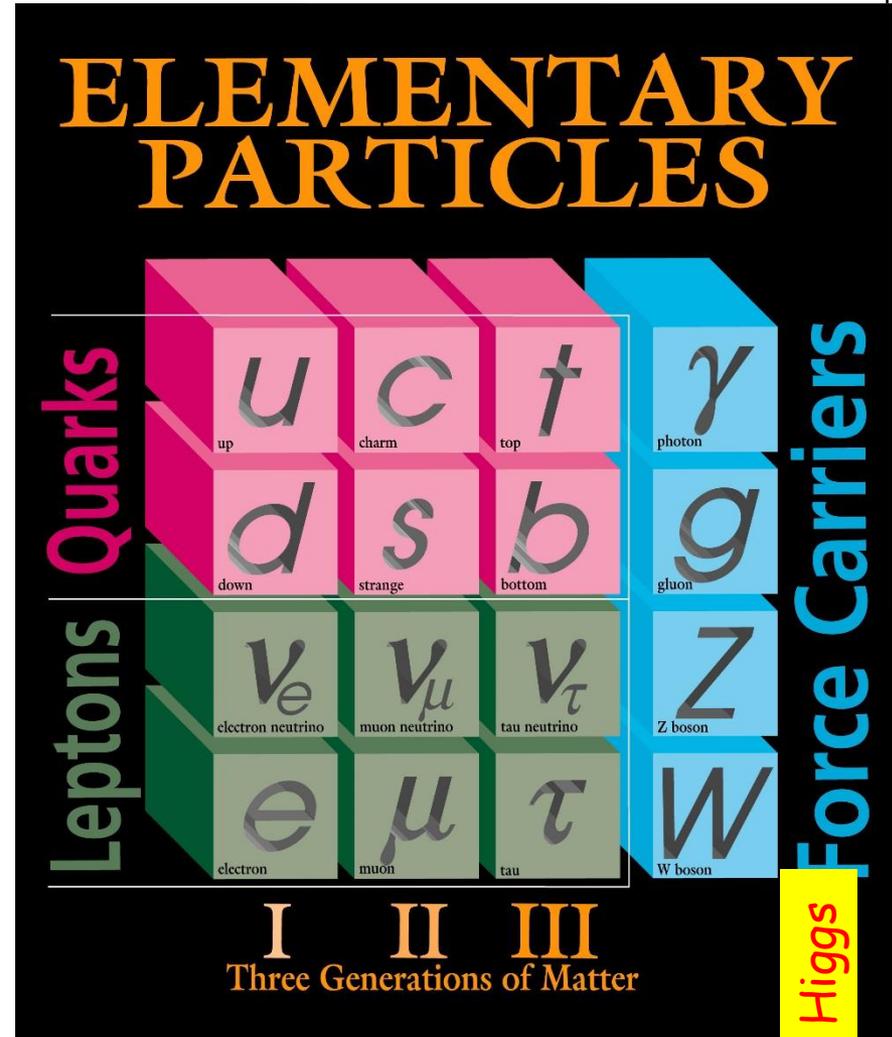
$$M_Z^2 = 2E_1 E_2 - 2p_1 p_2 \cos \alpha$$

# Il modello standard

## il mondo subatomico

- ☞ Tre generazioni di materia
- ☞ 4 portatori di forze
  1. Fotone
  2. Gluone
  3. Z
  4. W
- ☞ Sappiamo prevedere tutti i processi con esattezza

*problema: tutte le particelle hanno massa 0*



# I Fermioni : le masse (in GeV)

Q  
U  
A  
R  
K  
S  
  
L  
E  
P  
T  
O  
N  
I

0.003  **u**  
up

1.5  **c**  
charm



**t**  
top

1 GeV  $\approx$  protone

0.006  **d**  
down

0.12  **s**  
strange



**b**  
bottom

0.0005  **e**  
elettrone

0.105   **$\mu$**   
muone



**$\tau$**   
tau

$\approx 0$    **$\nu_e$**   
neutrino e

$\approx 0$    **$\nu_\mu$**   
neutrino  $\mu$

$\approx 0$

**$\nu_\tau$**   
neutrino  $\tau$

# I Bosoni: le masse



0



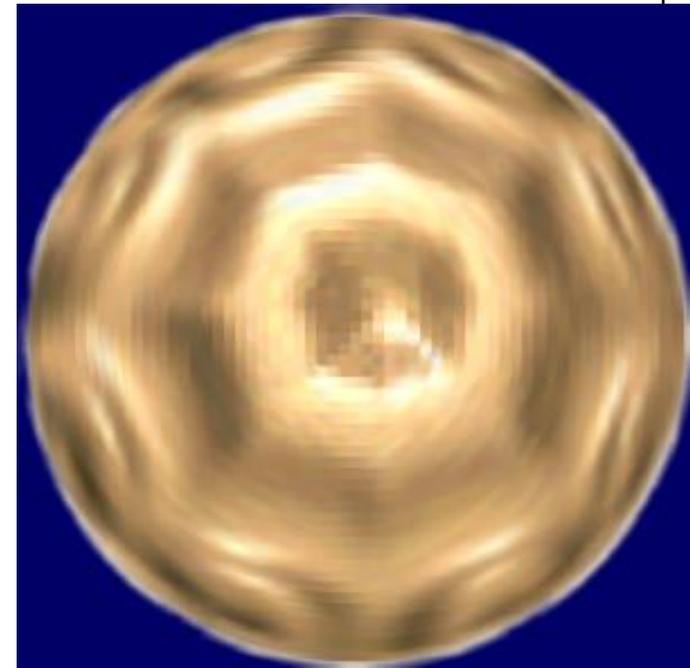
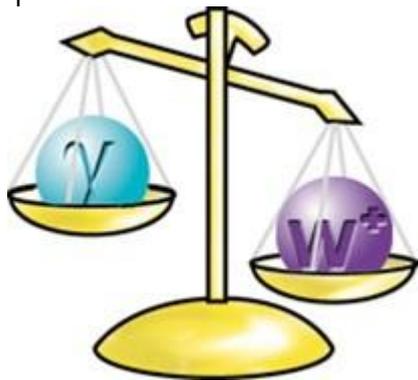
0



83 GeV



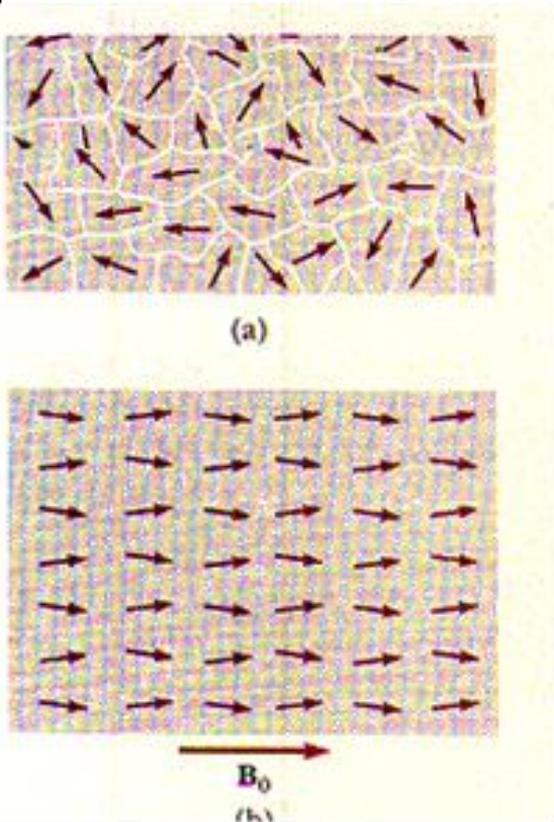
91 GeV



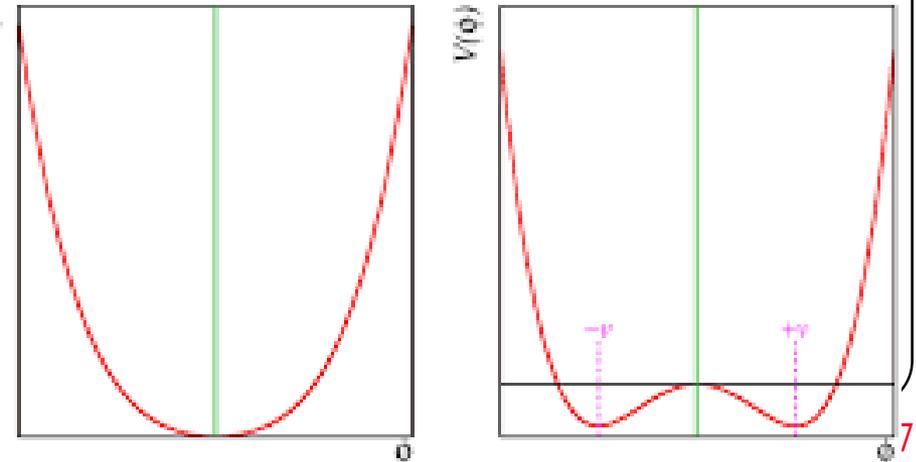
1 GeV  $\approx$  protone

# La risposta

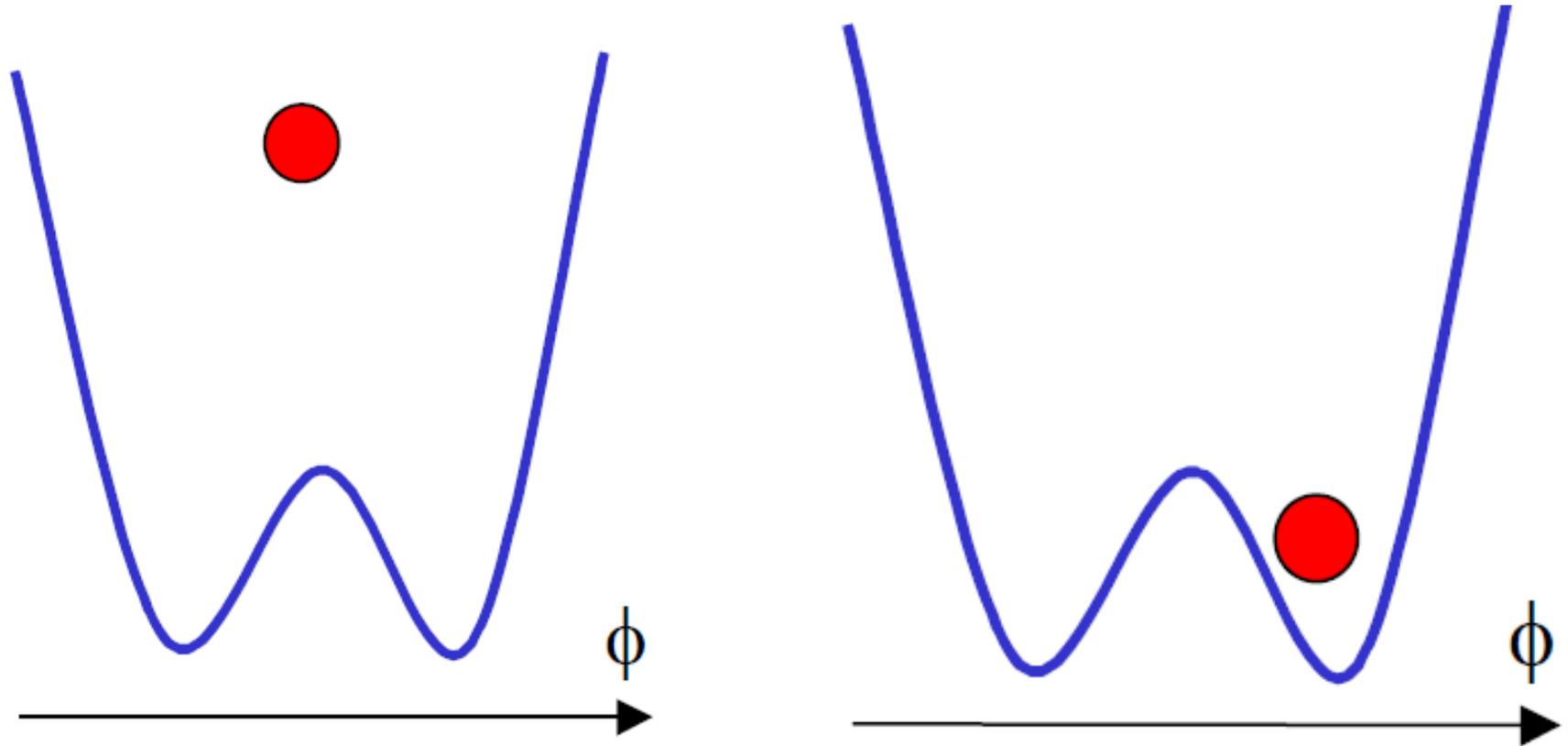
La risposta alla domanda era già stata data



- ☞ Nei primi anno '60 si studiavano le «rotture spontanee delle simmetrie»
  - ⇒ (a sx il ferromagnetismo)
- ☞ La domanda era: cosa succede se ho un «campo»
  - ⇒ Inizialmente simmetrico e poi del tipo a «cappello messicano»



# Il meccanismo di Higgs



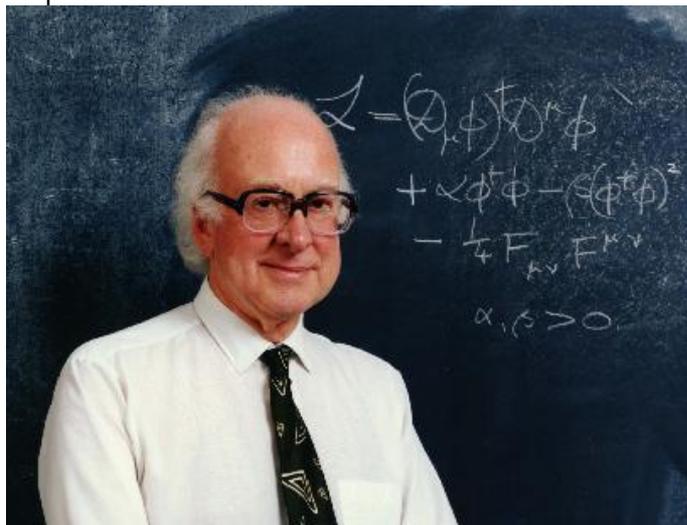
# Ma le masse...no...

Abbiamo una teoria (il Modello Standard) che ci «spiega» tutte le nostre misure

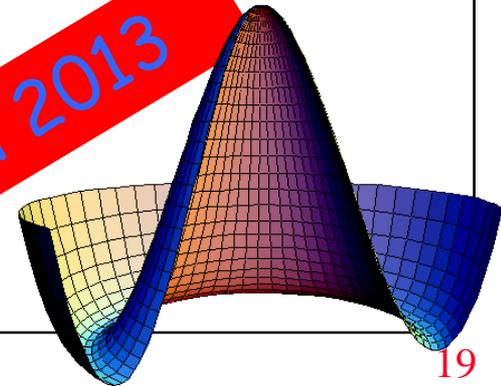
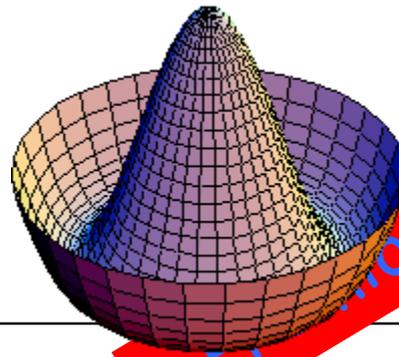
☞ Ed anzi che ci da delle previsioni

Non riesce a spiegare perché le particelle hanno massa

☞ La soluzione di questo problema (com particelle) è venuta prima della teoria del Modello Standard



Spontaneous symmetry breaking  
(Brout, Englert, Higgs, Kibble, 1964)

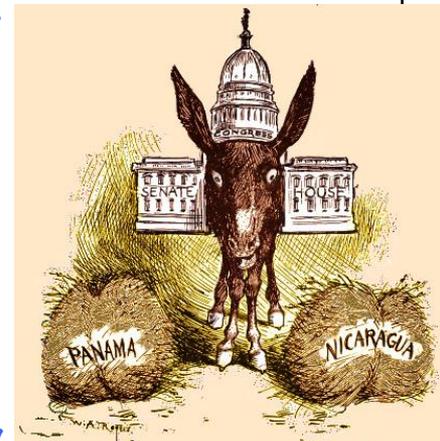


Nobel 2013

# L'asino di Buridano e la rottura spontanea della simmetria

La domanda è: se un asino è equidistante da due mucchi di avena, quale mangerà?

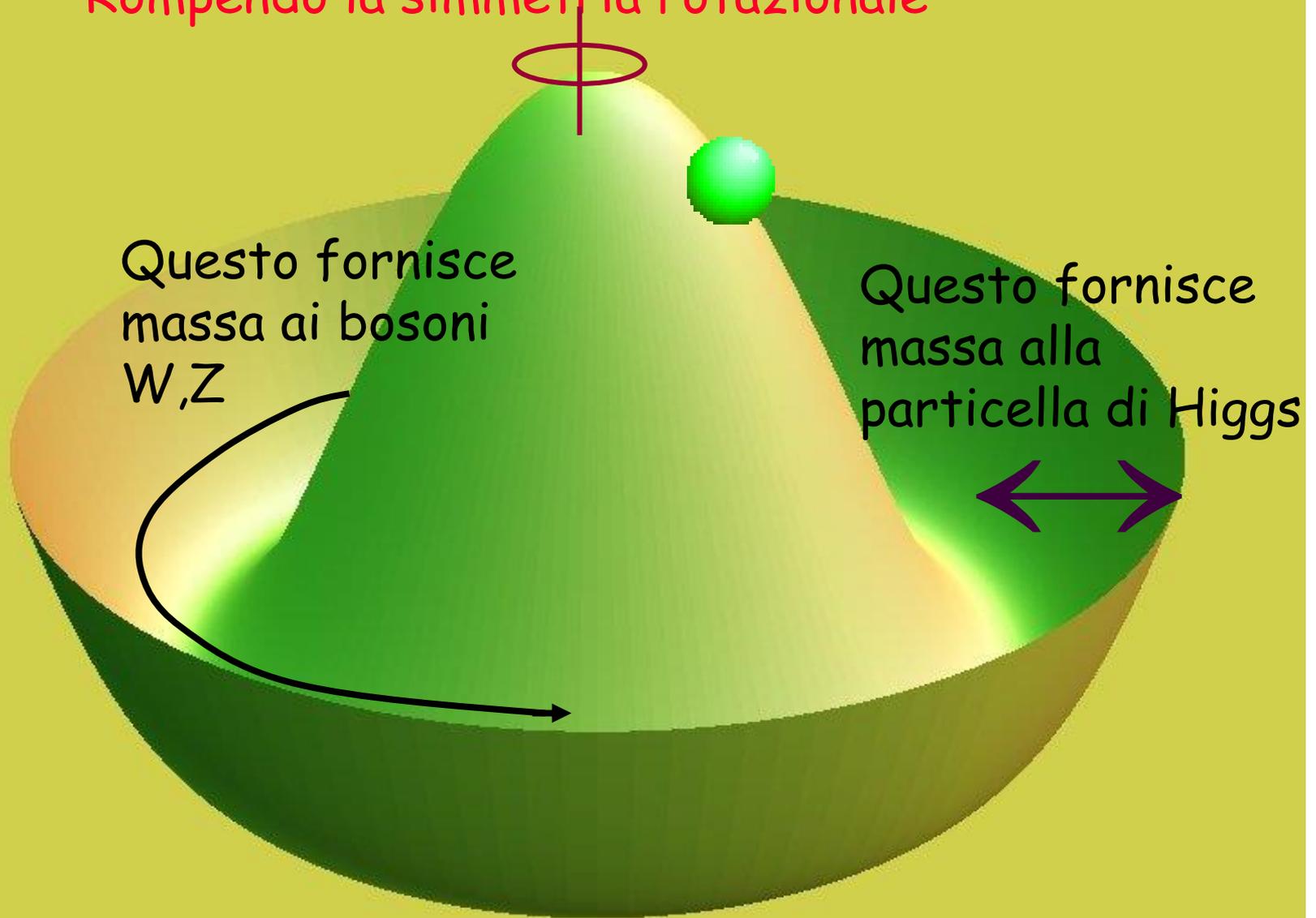
Secondo **Buridano** l'intelletto è sempre in grado di indicare all'uomo quale sia la scelta giusta tra le varie diverse alternative tanto che se, per assurdo, la scelta fosse costituita da due elementi identici la volontà si paralizzerebbe a meno che non si scegliesse di non scegliere.



**Leibniz** discusse di questo paradosso nei suoi *Saggi di teodicea* osservando che in natura non esistono, come avviene invece in matematica, due realtà perfettamente identiche e che quindi l'azione umana è sempre determinata da una precisa causa, magari a noi sconosciuta ma esistente.

☞ Sarebbe interessante che qualche filosofo ridiscutesse il problema alla luce della scoperta del bosone di Higgs

# Rompendo la simmetria rotazionale



Un solo campo che pervade tutto lo spazio

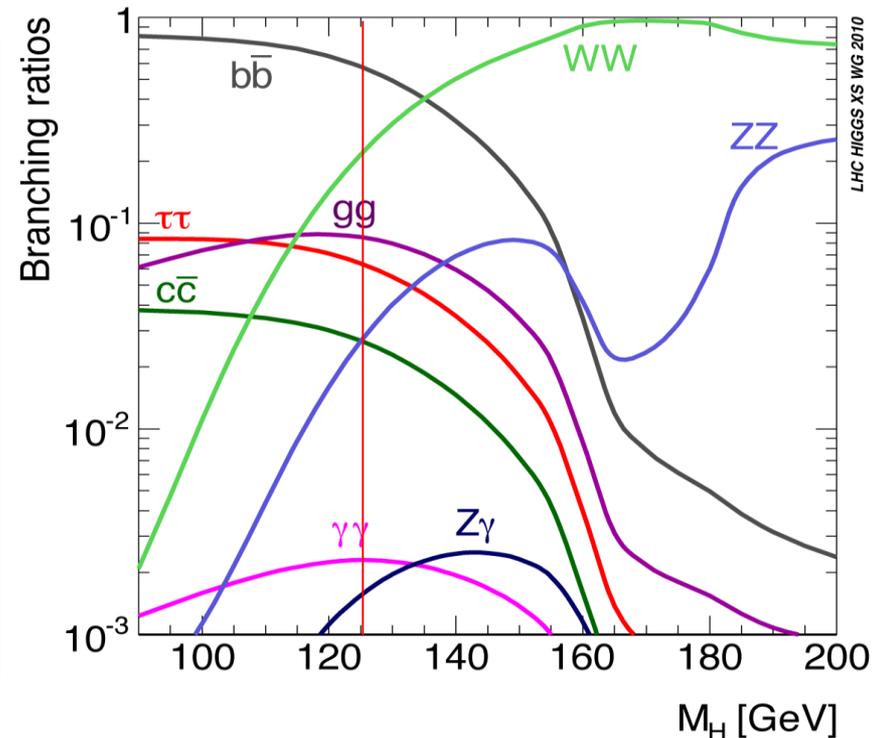
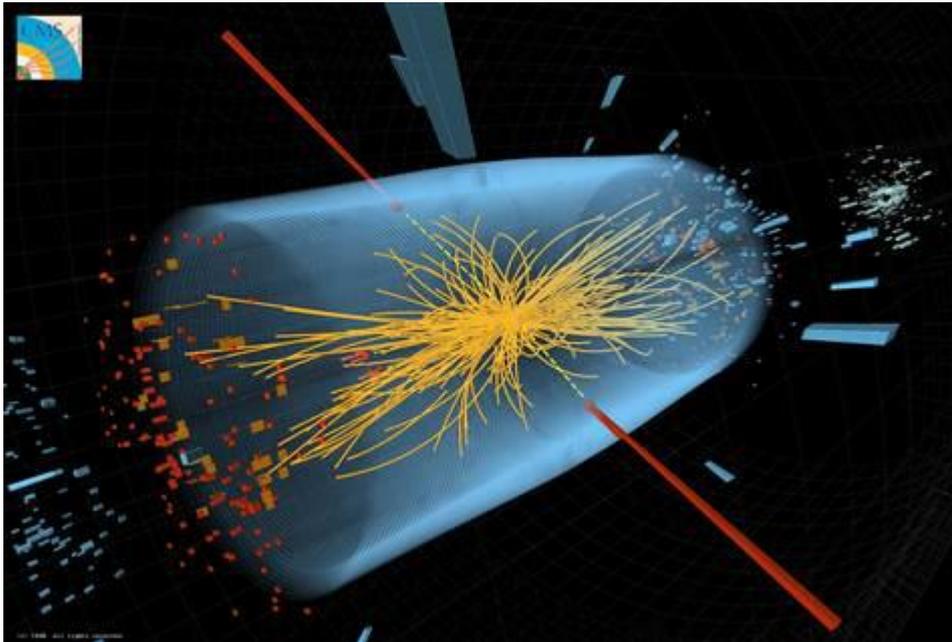
# Come facciamo a vederlo?



# Come vediamo la particella di Higgs?

In maniera non diversa da come vediamo altre particelle instabili

☞ Identifichiamo i prodotti del suo decadimento

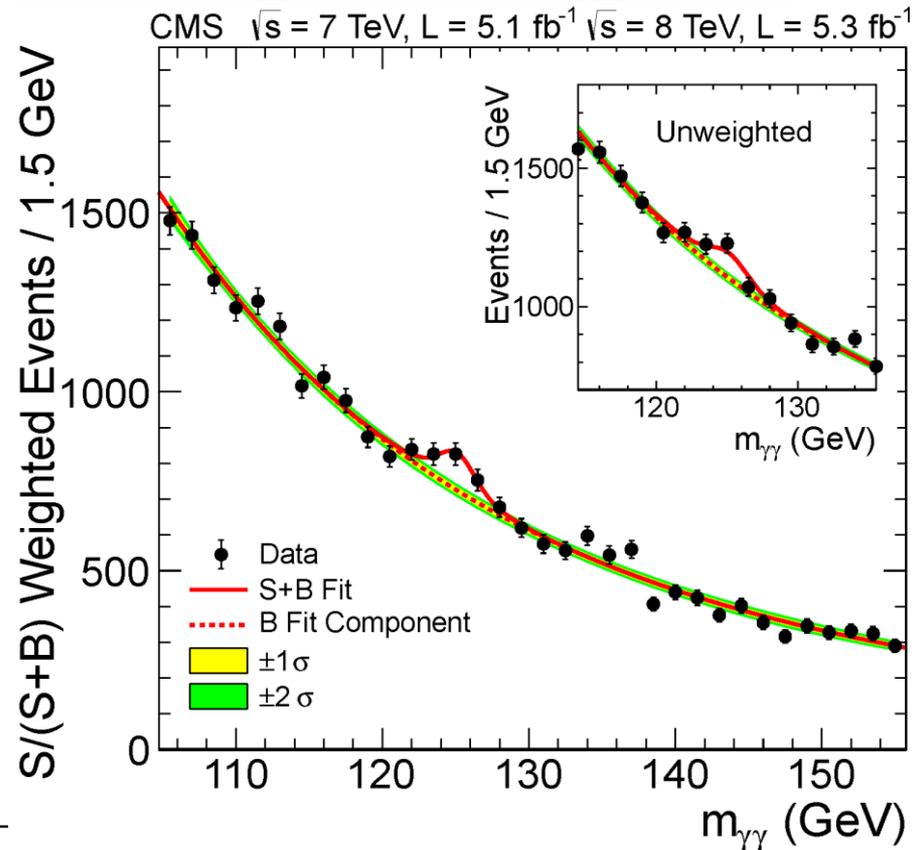
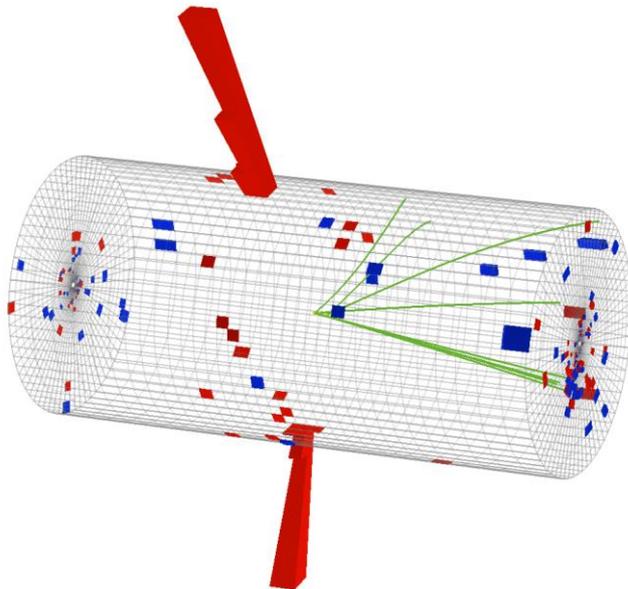


# $H \rightarrow \gamma\gamma$

Il decadimento principale utilizzato per individuare la particella di Higgs è

☞  $H \rightarrow \gamma\gamma$

☞ L'identificazione avviene ricostruendo la massa del sistema  $\gamma\gamma$

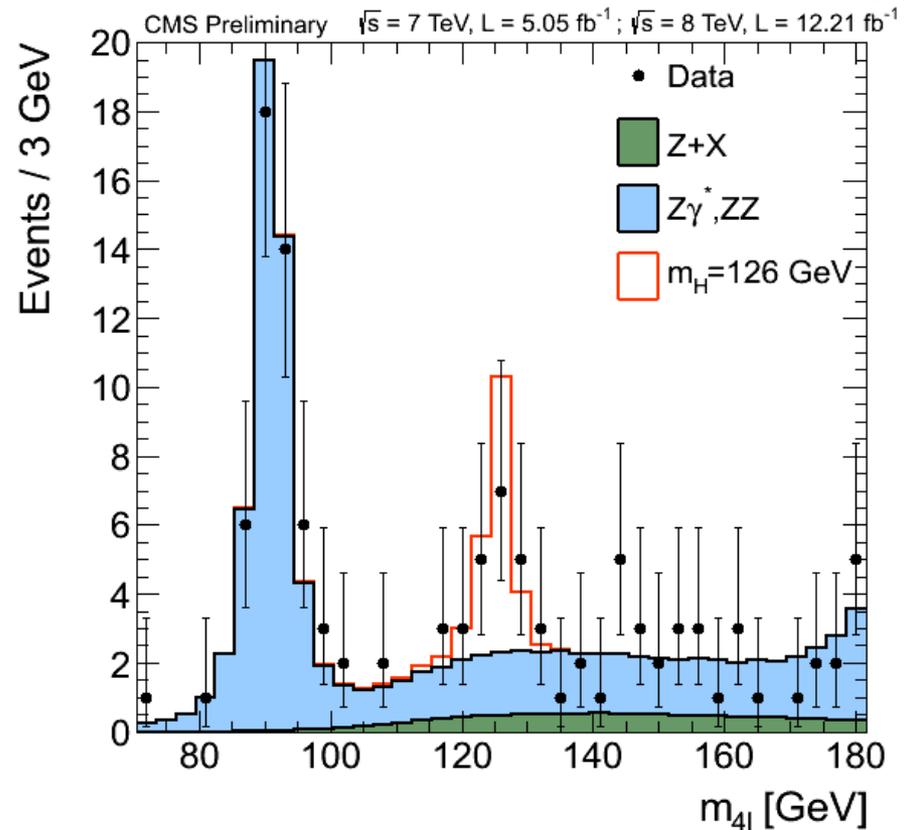
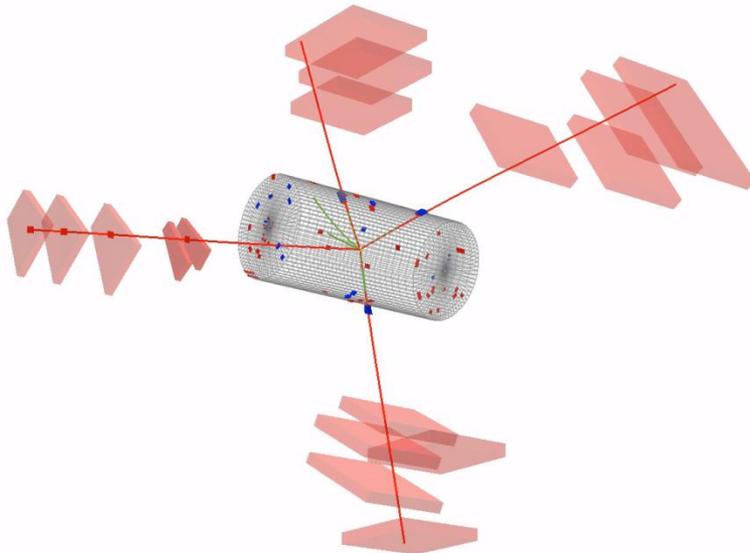


# $H \rightarrow ZZ$

Un canale diverso è quello in cui

☞  $H \rightarrow ZZ, Z \rightarrow ll$  dove  $l = e, \mu$

☞ Si ricostruisce la massa della coppia di Z



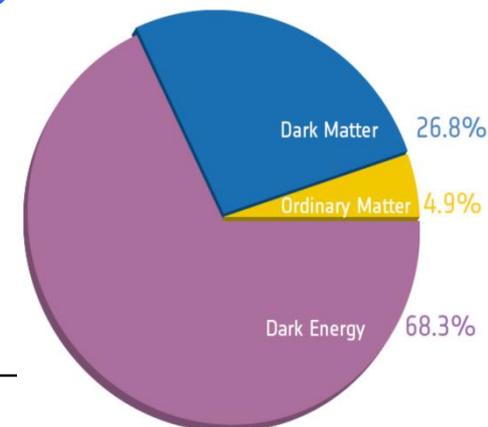
# Ed ora?

## Dobbiamo rispondere ad alcune domande

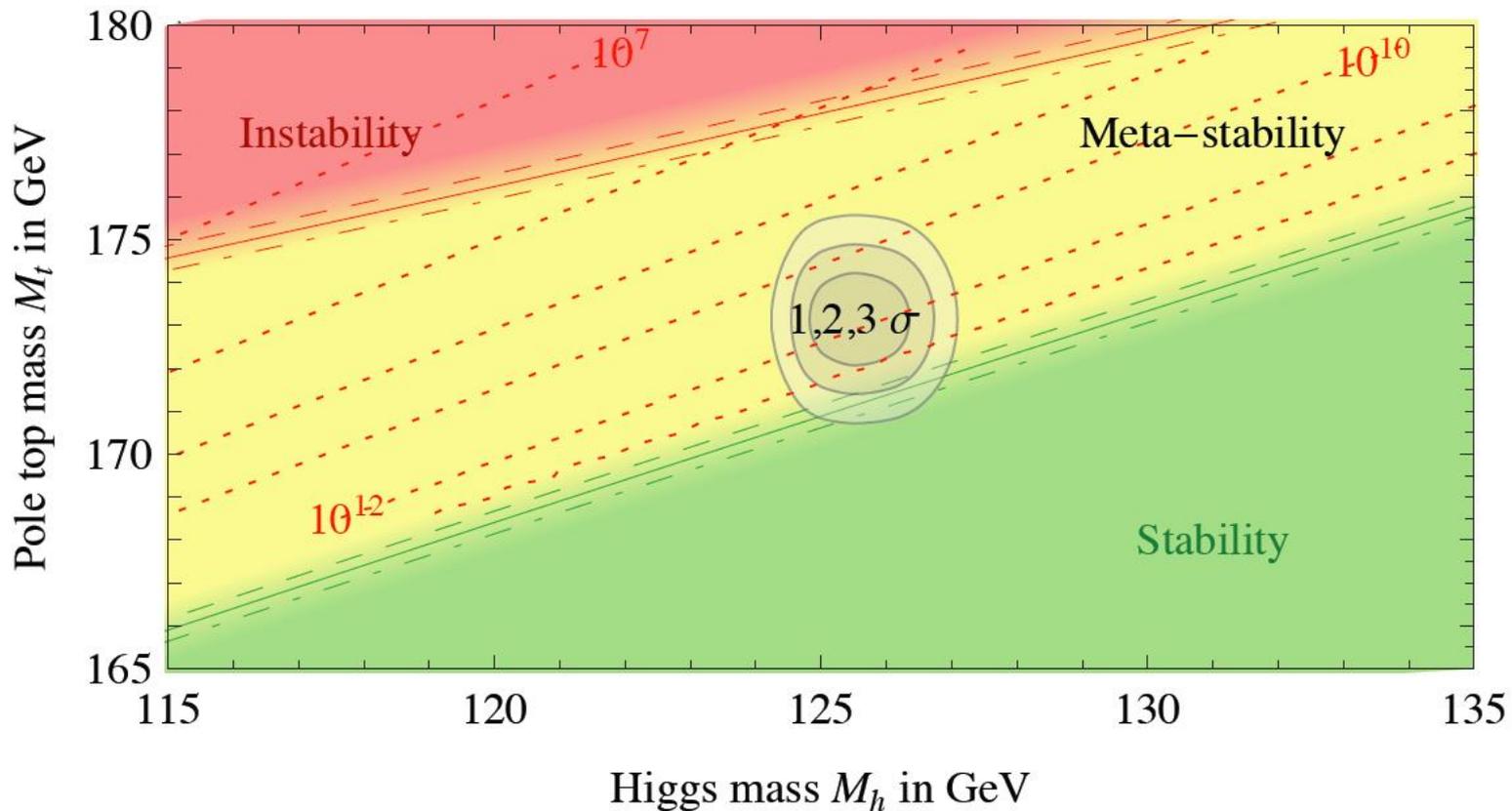
- ☞ La particella che abbiamo visto possiede tutte le proprietà attese nel modello standard?
  - ⇒ Misurazione precisa degli altri canali di decadimento
  - ⇒ Misurazione precisa dello spin (zero o due?)
- ☞ Ci sono delle anomalie (comportamenti inattesi)?
- ☞ È l'unica?
  - ⇒ Ci sono teorie che «includono» il modello standard che prevedono più «particelle di Higgs»

## Un grande mistero:

- ☞ la «dark matter»



# Che implicazioni per questa massa?



backup

# Un lungo percorso

Dagli anni '20 del secolo scorso in poi è un crescendo di scoperte e di comprensione di cosa c'è dentro l'atomo:

☞ Nuclei: protoni, neutroni (anni '30)

E come è tenuto insieme?

☞ Forza nucleare forte

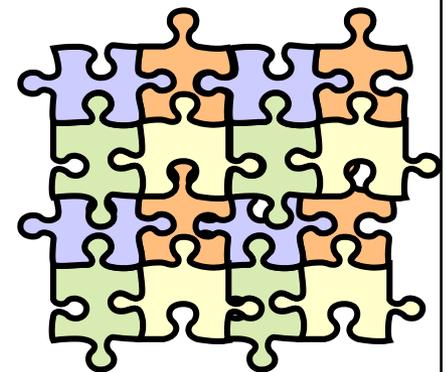
⇒ Si affianca alla forza elettromagnetica ed alla forza responsabile di molti decadimenti radioattivi:

→ La forza debole (prima teoria: Fermi nel 1931)

Abbiamo imparato a guardare dentro con strumenti sempre più raffinati

☞ Acceleratori e rivelatori

⇒ Dopo una lunga fase in cui il quadro si complicava ogni giorno, i pezzi del puzzle hanno cominciato ad andare al proprio posto



# I primordi degli acceleratori

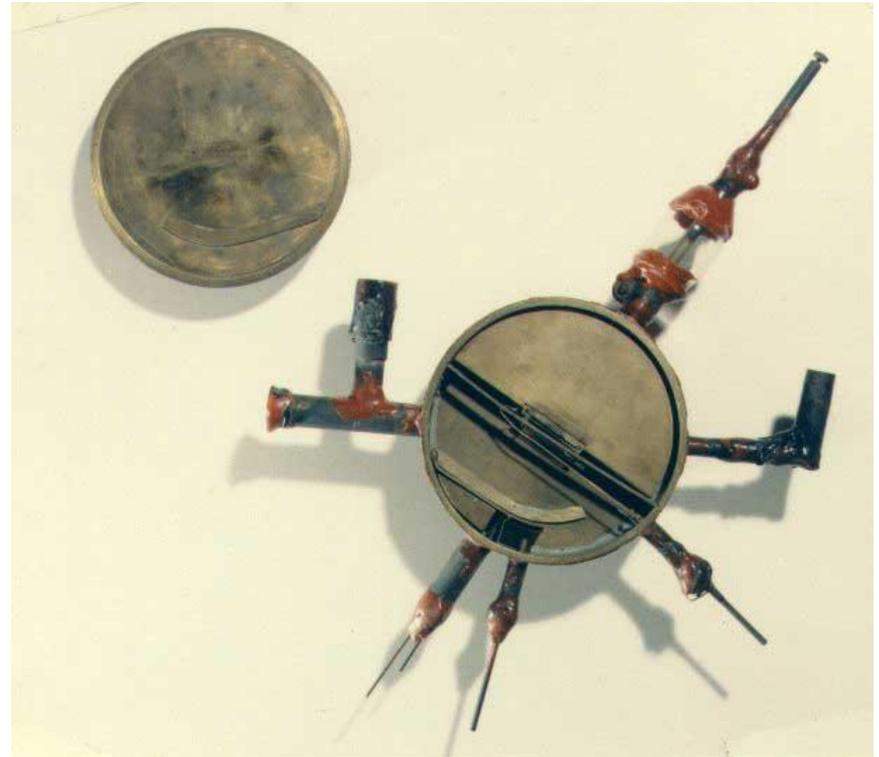
I primi proiettili erano particelle naturali ( $\alpha$ )

- ☞ La loro interazione con gli atomi (e poi con i nuclei) ci ha permesso di fare i primi passi nella comprensione della struttura della materia

Al momento di aver bisogno di energie maggiori cominciano i primi studi (anni '20)

- ☞ I primi acceleratori degli anni '30

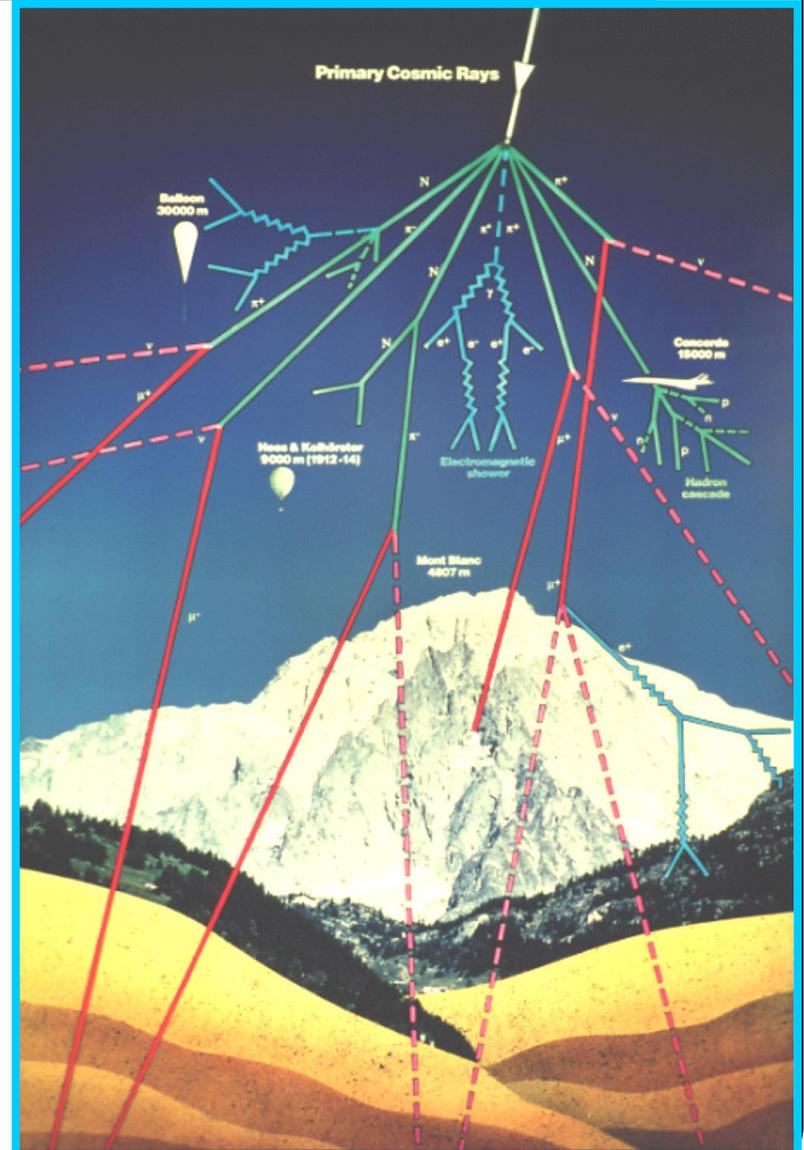
Ma oltre agli acceleratori fatti dall'uomo ne esistono di naturali



# Dalle stelle..

Sin dagli inizi del '900 si scopre che esiste una radiazione cosmica

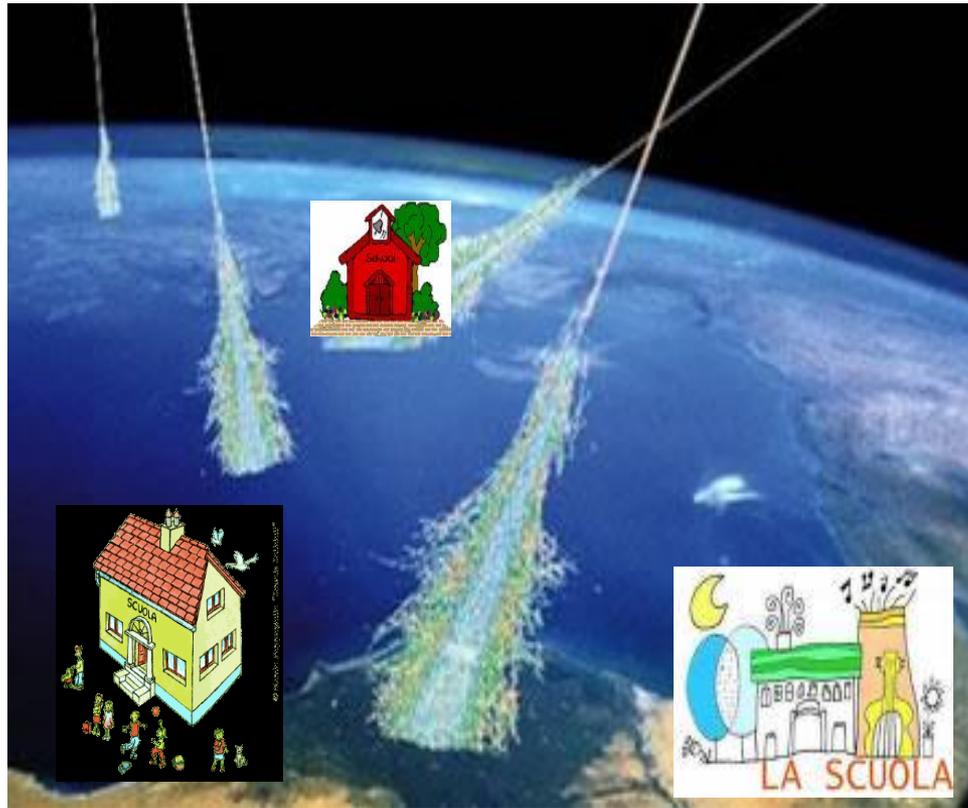
- ☞ I raggi cosmici sono per lo più protoni (ma anche  $\gamma$ ) di altissima energia (facilmente oltre i  $10^{12} \div 10^{14}$  eV)
- ☞ Entrando nell'atmosfera urtano contro le molecole d'aria e questo genera degli sciami di particelle
  - ⇒ A terra giungono quelle con vita media sufficientemente lunga (per lo più muoni ed elettroni)
- ☞ Negli anni abbiamo imparato ad utilizzare i raggi cosmici come messaggeri che ci raccontano quello che avviene nei corpi celesti ove si generano



# Obiettivo del Progetto EEE

Extremely Energetic Events

S.Miozzi-LNF



Rivelazione sciame  
estesi di raggi cosmici  
ad alta energia tramite  
il campionamento della  
componente muonica  
utilizzando una rete di  
rivelatori sparsi sul  
territorio italiano

# Perchè servono tanti rivelatori?

S.Miozzi-LNF

Esempio: voglio rivelare 100 sciame con un'energia di  $\sim 10^{19}$  eV

So che di questi eventi ne arriva 1 ogni anno su un  $\text{km}^2$  di superficie. Come faccio a vederne 100 ?

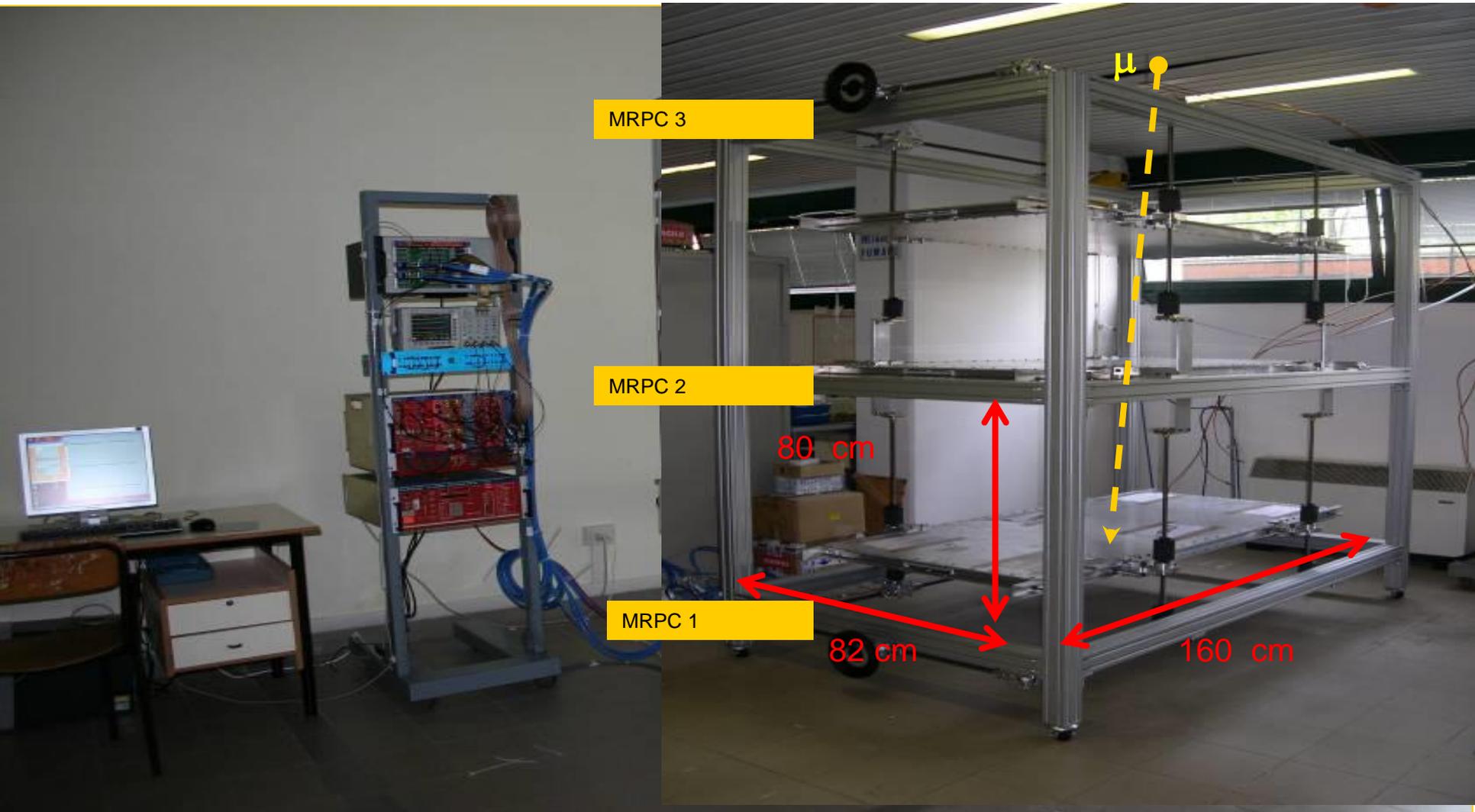
Se costruisco un rivelatore grande  $1 \text{ km}^2$  devo aspettare 100 anni...

Con un rivelatore grande  $100 \text{ km}^2$  aspetto solo 1 anno

Tanti rivelatori vicini sono come un grande rivelatore

# Il telescopio di EEE

S.Miozzi-LNF



# E ora?

Abbiamo capito tutto?

Cosa vuol dire?

- ☞ Vuol dire avere una teoria che
  - ⇒ Risponde alle nostre domande
  - ⇒ Fa previsioni in grado di essere verificate
  - ⇒ Tutti i suoi aspetti sono stati confermati

# Calcoliamo la Massa dello Z

La Z può decadere in una qualsiasi coppia fermione-antifermione con massa inferiore a  $M_{Z/2}$ . Di fatto:

☞ Elettroni, neutrini, quarks (u,d,c,s,b)

⇒ La relazione relativistica che lega energia e massa è:

$$\rightarrow E = \text{SQRT}(P^2 + (mc^2)^2)$$

- Nel caso degli elettroni provenienti dallo Z la massa è molto piccola rispetto all'impulso:
- $E = \text{SQRT}(P^2)$

☞ Nel decadimento dello Z (particelle 1 e 2):

$$\Rightarrow MZ = \text{SQRT}((E_1 + E_2)^2 - (P_1 + P_2)^2)$$

$$\rightarrow MZ = \text{sqr}(2 * E_1 E_2 * (1 - \text{cosangolo}))$$

- Ecco che misurando le energie e le direzioni degli elettroni che emergono possiamo misurare la massa dello Z!

# Un esempio...

La  $Z$  è una particella di massa a riposo di circa  $91 \text{ GeV}/c^2$  che decade in coppie di leptoni:

☞  $e^+e^-$

☞  $\mu^+\mu^-$

☞  $\tau^+ \tau^-$

☞ Neutrino-antineutrino

⇒ Tutti e tre i tipi

☞ Quark-antiquark

⇒ u-anti u

⇒ d-anti d

⇒ s-anti s

⇒ c-anti c

⇒ b-anti b

