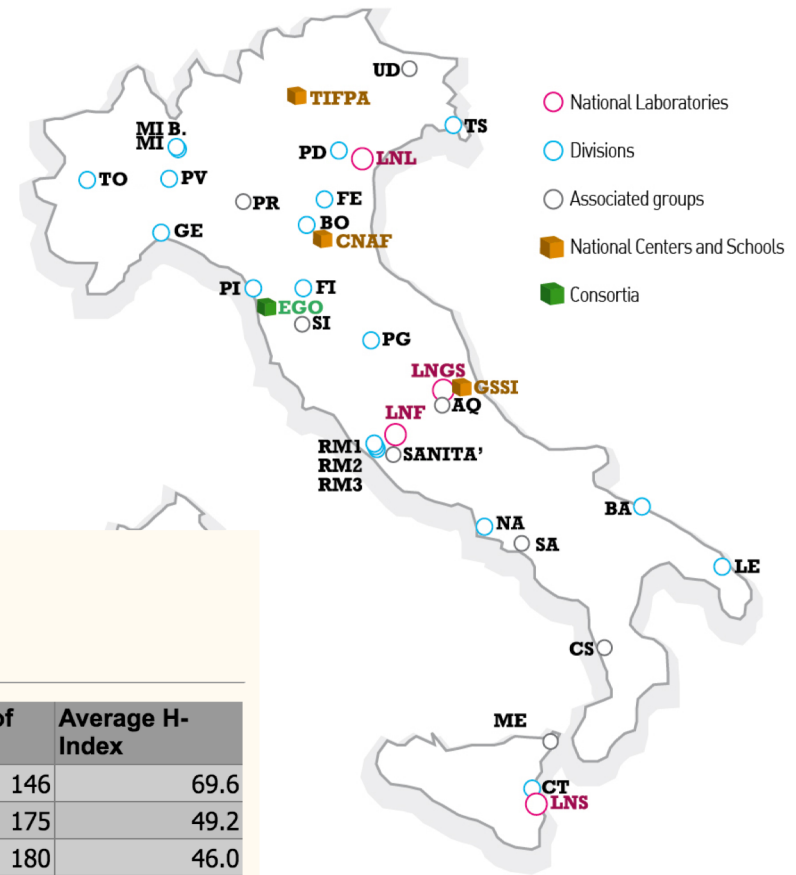


# I bosoni di Higgs non vengono mai soli

1. La complessità del mondo:  
→ le meringhe, la musica e l'universo
2. Simmetrie
3. Le particelle elementari
4. Simmetrie nascoste
5. Il bosone di Higgs
6. Gli amici immaginari (?) del bosone di Higgs

# INFN: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



**Table 1 - The Top 50 research Institutes in Italy.**  
 The Institutes are ranked according to the Sum of H-index of their affiliated TIS.  
 Those fundamentally private or independent are highlighted in yellow.  
 Please note, this table is updated in real-time, based on the TIS database.

Rank	Italian Institution	Sum of H-Index	N. of TIS	Average H-Index
1	INFN	10161	146	69.6
2	Bologna	8608	175	49.2
3	Roma	8289	180	46.0
4	Padova	7541	157	48.0
5	Milano	7347	158	46.5
6	CNR	5921	134	44.2
7	Firenze	5644	121	46.6
8	Torino	5410	116	46.6
9	INAF	4700	91	51.6
10	Napoli	4659	104	44.8

# Problema: la complessità del mondo

Quello che ci circonda è estremamente complesso, spesso la sovrapposizione di moltissime cose diverse.

Pensate a questa aula: ci sono moltissime cose che capitano in questo momento e scrivere le leggi fisiche per descriverle è praticamente impossibile.

## Soluzione: riduzionismo

Il **riduzionismo** è il processo fondamentale usato in fisica per la comprensione della realtà:

*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*

# Riduzionismo in cucina

---



Immaginate di mangiare questi cibi, e di dover scoprire gli elementi di base

**Uova** ed un po' di farina, zucchero, sale...

→ cibi complessi sono fatti da ingredienti semplici

# Riduzionismo in musica

**Yesterday**  
Words and Music by John Lennon and Paul McCartney

www.guitartricks.com | Tutorial | 18 Dec 2014 | 13:04

HALO

Moderately ♩ = 92

Words and Music by  
EVAN TEGGER, SEYMOUR ANKOWSKI  
and EVAN ROBERT

The image shows a digital sheet music for the song 'Yesterday'. It features a guitar chord progression in the key of D major, consisting of seven notes: D, E, F#, G, A, B, C. The score includes a guitar part and a piano accompaniment. The tempo is marked 'Moderately' with a quarter note equal to 92 beats per minute. The music is attributed to John Lennon and Paul McCartney.

**LA TRAVIATA.**  
OPERA

Tempo giusto.

Allegro

Allegro

The image shows a page of musical notation for the opera 'La Traviata' by Giuseppe Verdi. It features a complex melodic line with various ornaments and dynamics. The tempo is marked 'Tempo giusto'. The score includes a vocal line and a piano accompaniment.

**DON GIOVANNI**  
W. A. MOZART  
SINFONIA

Allegro

Allegro

The image shows a page of musical notation for the opera 'Don Giovanni' by Wolfgang Amadeus Mozart. It features a complex symphonic texture with multiple staves. The tempo is marked 'Allegro'. The score includes a vocal line and a piano accompaniment.

Immaginate di sentire queste musiche, e di dover scoprire come sono composte..

**7 note** ed ottave, diesis, bemolle

# Riduzionismo in natura



INFORMAZIONI NUTRIZIONALI		
	Per 100g	Per porzione da 30g
VALORE ENERGETICO	1604 kJ 378 kcal	481 kJ 113 kcal
GRASSI	0,9 g	0,3 g
di cui saturi	0,2 g	0,1 g
CARBOIDRATI	84 g	25 g
di cui zuccheri	8 g	2,4 g
FIBRE	3 g	0,9 g
PROTEINE	7 g	2,1 g
SALE	1,13 g	0,34 g
VITAMINE:	(%NRV)	(%NRV)
D	4,2 µg (83)	1,3 µg (25)
B1	0,91 mg (83)	0,28 mg (25)
B2	1,2 mg (83)	0,35 mg (25)
NIACINA	13 mg (83)	4,0 mg (25)
B6	1,2 mg (83)	0,35 mg (25)
ACIDO FOLICO	166 µg (83)	50,0 µg (25)
B12	2,1 µg (83)	0,63 µg (25)
FERRO	8,0 mg (57)	2,4 mg (17)

Intermezzo: il ferro che mangiamo a colazione, da dove viene?

Immaginate tutto quello che ci circonda, e di domandarvi:

Di cosa è fatto?

Perché?

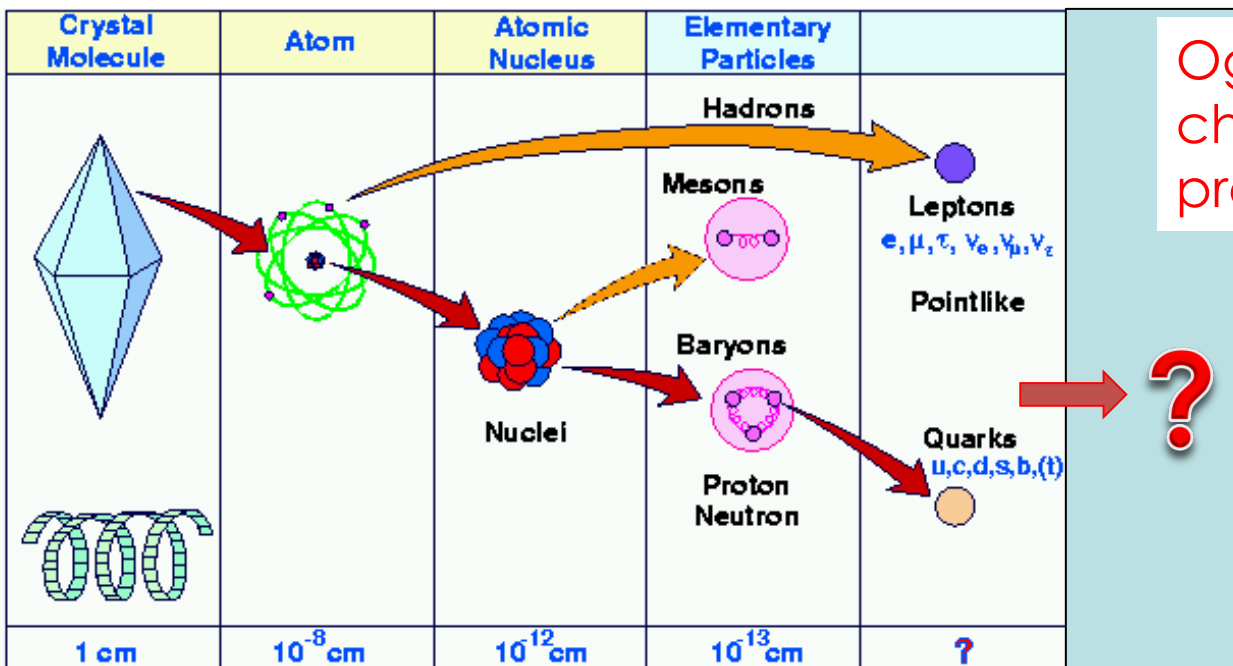
Qual è il minor numero di componenti affinché funzioni?

**Particelle elementari, forze e ....**

# La fisica delle particelle

L'approccio riduzionista in fisica delle particelle ha portato a moltissimi progressi.

Ogni ulteriore livello di "riduzione" porta con se` una grande quantità di informazioni, il passaggio da un livello a quello successivo avviene attraverso lo studio di **simmetrie** che indicano la presenza di una sotto-struttura



Oggi parliamo di quello che non sappiamo... del prossimo livello

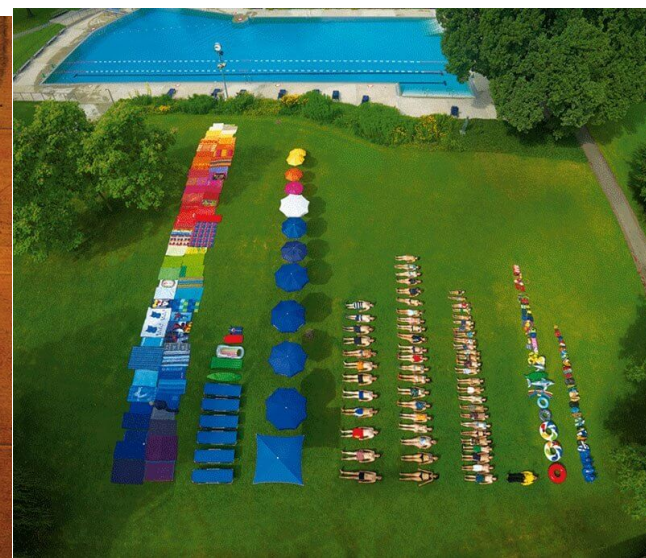
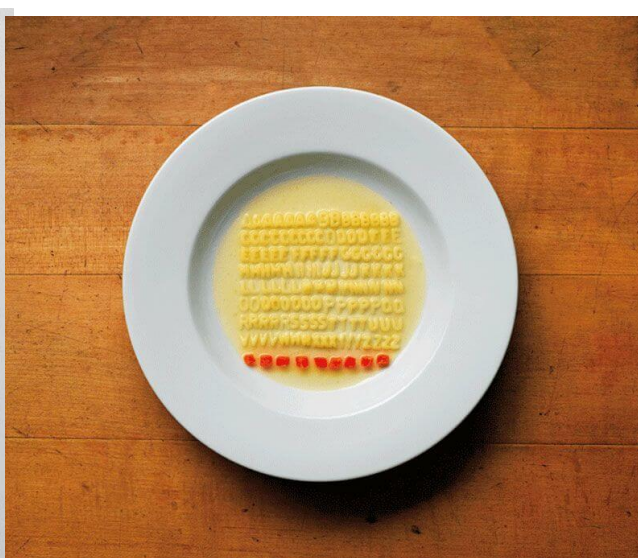
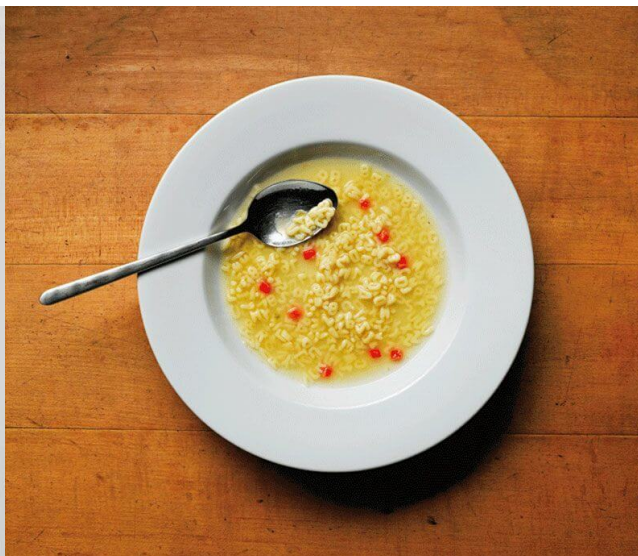
Chi lo scoprirà?



Your picture here



# Le simmetrie aiutano a trovare le parti costituenti delle cose





# Cos'è una particella elementare?

---

Possiamo definire una particella come “elementare” se assumiamo che non abbia sottostruttura.

Questo vuol dire che non si può rompere in pezzi più piccoli.

Quali sono le caratteristiche di una particella?

Le più comuni sono:

- 1) La carica elettrica
- 2) La massa
- 3) La velocità con cui ruota su se stessa (spin)



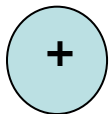
Una particella può sembrare puntiforme ma non esserlo quando la si guarda meglio:  
=> particelle che oggi riteniamo puntiformi possono in realtà essere composte.

# Materia e messaggeri

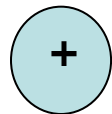
---

Le particelle elementari **misurate** sono di 2 tipi:

- 1) Particelle che **formano la materia** (12)
- 1) Particelle che **trasmettono le forze** (4)  
tra cui la particella di **Higgs** (1)



**Spostati, mi  
manda uno della  
tua stessa carica**

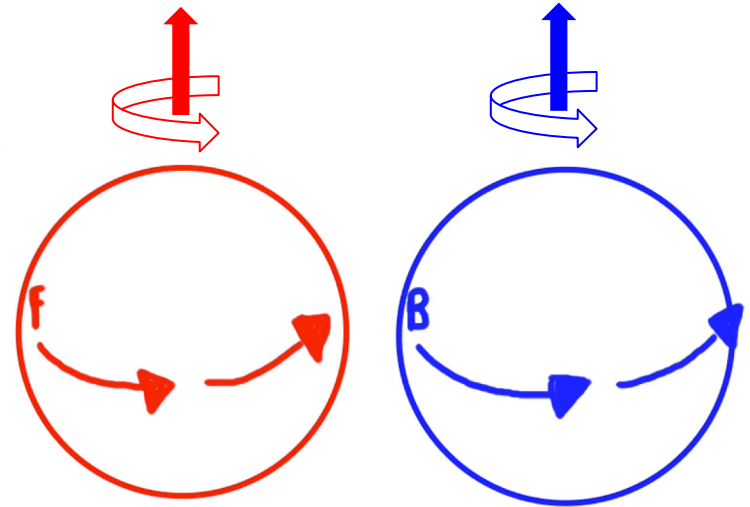


# lo spin delle particelle

Le particelle elementari ruotano su se stesse.  
Questa proprietà si chiama spin.

Se lo spin è

- $\frac{1}{2}$  si chiamano fermioni
- 1 si chiamano bosoni



→ Tra le particelle elementari, i bosoni girano più in fretta dei fermioni

Questo fatto, apparentemente secondario, ha delle conseguenze importantissime sul comportamento delle particelle

# Lo spin: i bosoni ed i fermioni

Le particelle elementari di materia hanno tutte spin  $\frac{1}{2}$  : **FERMIONI**  
I messaggeri elementari delle forze (tranne 1, forse..) hanno tutti spin intero (1): **BOSONI**

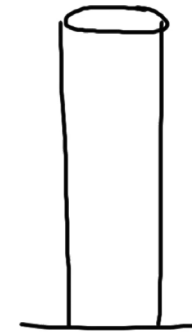
I fermioni interagiscono tra di loro scambiandosi bosoni



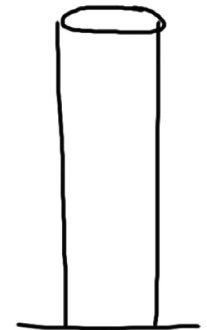
Le particelle bosoniche possono stare tutte nelle stesso posto:

- In una classe di studenti bosonici, serve una sola sedia
- Un posteggio infinito di macchine bosoniche ha un solo posto
- Gli innamorati sono bosonici..

Effetti di coerenza come la superconduttività ed il laser sono dovuti a questo fatto



BOSONI



FERMIONI

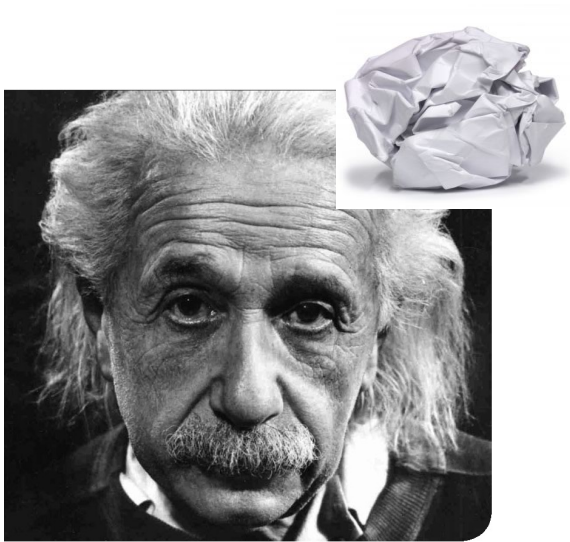
Le macchine non sono bosoniche



# Esempio pratico: compito in classe di fisica

---

Foglietto con la soluzione  
Mediatore  
Bosone, spin = 1



Studente bravo  
(particella di materia)  
Fermione, spin = 1/2



Studente meno bravo  
(particella di materia)  
Fermione, spin = 1/2

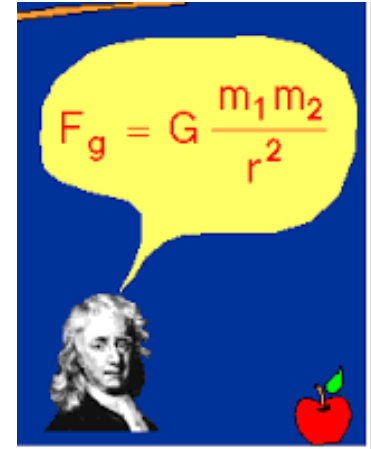


# Digressione: che cosa è la gravità

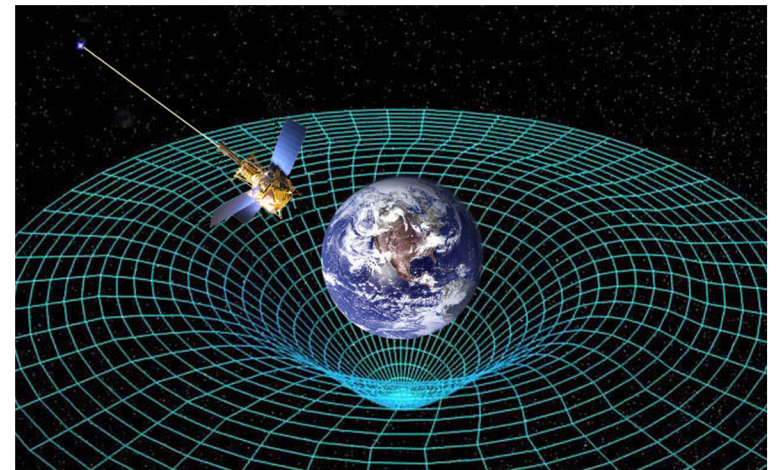
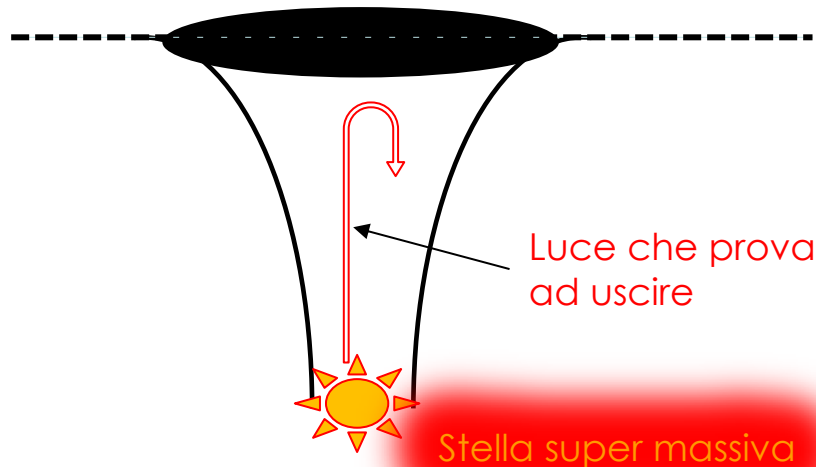
Come fanno i pianeti ad attrarsi?

Per facilità, ci viene detto che la gravità è una forza, ma in realtà non è vero: gli oggetti distorcono lo spazio, e quelli più piccoli girano attorno al cono seguendo linee geodesiche.

Da un buco nero non esce la luce:  
Quale messaggero va più veloce della luce da raggiungere un raggio di luce e piegarlo indietro?



Niente esce, per questo si chiama Buco nero



# Come si creano le particelle in laboratorio?

Attraverso urti tra particelle si possono creare altre particelle:  
l'energia delle particelle viene trasformata in materia!



Einstein:  $E=mc^2$

la massa si può  
trasformare  
in energia e viceversa.

Si crea sempre materia ed antimateria  
in quantità uguali



ANNI CERN 



# Lo zoo delle particelle: adroni

Negli urti si creano centinaia di particelle che sono in realtà stati legati:

Barioni (qqq): p,n

Mesoni (q-anti q):  $\pi, K, \rho, \eta, \dots$

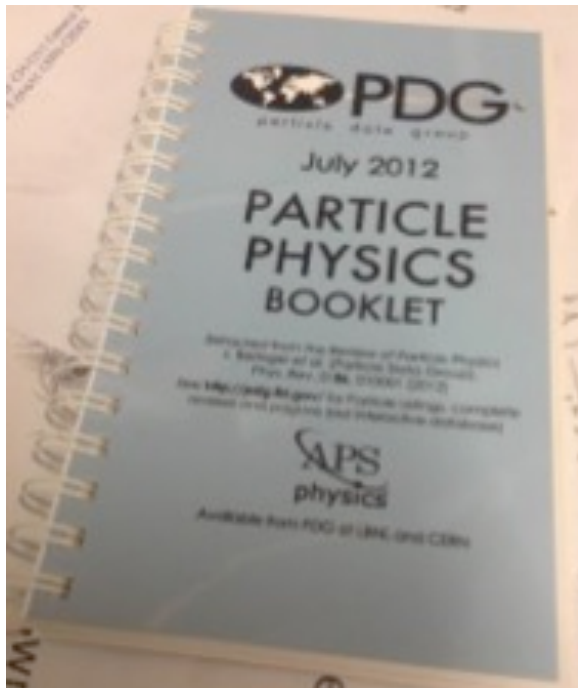
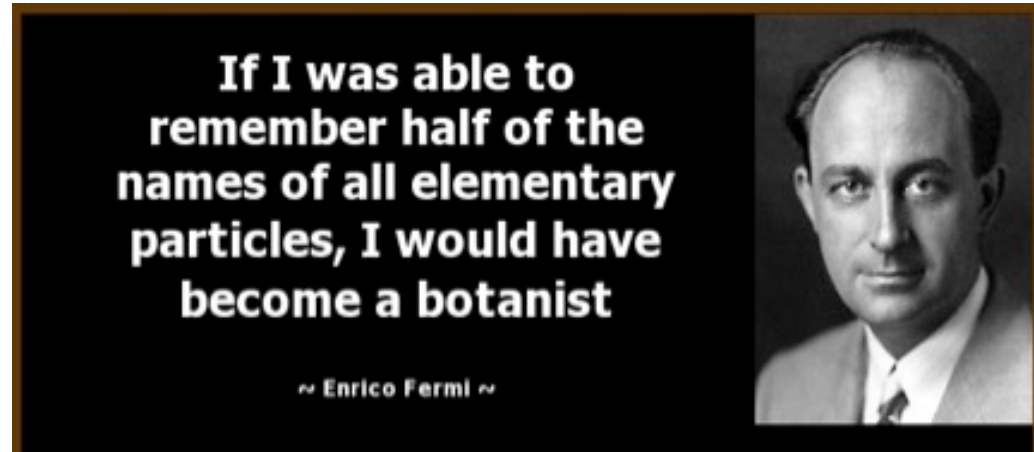
Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
<b>p</b>	proton	<b>uud</b>	1	0.938	1/2
<b><math>\bar{p}</math></b>	anti-proton	<b><math>\bar{u}\bar{u}\bar{d}</math></b>	-1	0.938	1/2
<b>n</b>	neutron	<b>udd</b>	0	0.940	1/2
<b><math>\Lambda</math></b>	lambda	<b>uds</b>	0	1.116	1/2
<b><math>\Omega^-</math></b>	omega	<b>sss</b>	-1	1.672	3/2

Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
<b><math>\pi^+</math></b>	pion	<b><math>u\bar{d}</math></b>	+1	0.140	0
<b><math>K^-</math></b>	kaon	<b><math>s\bar{u}</math></b>	-1	0.494	0
<b><math>\rho^+</math></b>	rho	<b><math>u\bar{d}</math></b>	+1	0.770	1
<b><math>B^0</math></b>	B-zero	<b><math>d\bar{b}</math></b>	0	5.279	0
<b><math>\eta_c</math></b>	eta-c	<b><math>c\bar{c}</math></b>	0	2.980	0

# Un libro pieno di particelle

Come si fa a ricordare il nome di tutte le particelle?

Non lo si fa!!



Ma si può comprare un libro con tutti i nomi

# Un libro pieno di particelle

Citation: K.A. Olive et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C38, 090001 (2014) (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

$\omega(782)$ DECAY MODES	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Scale factor/ Confidence level	$\rho$ (MeV/c)
$\pi^+\pi^-\pi^0$	(89.2 ± 0.7) %		327
$\pi^0\gamma$	( 8.28 ± 0.28) %	S=2.1	380
$\pi^+\pi^-$	( 1.53 <sup>+0.11</sup> <sub>-0.13</sub> ) %	S=1.2	366
neutrals (excluding $\pi^0\gamma$ )	( 8 <sup>+8</sup> <sub>-5</sub> ) × 10 <sup>-3</sup>	S=1.1	-
$\eta\gamma$	( 4.6 ± 0.4) × 10 <sup>-4</sup>	S=1.1	200
$\pi^0e^+e^-$	( 7.7 ± 0.6) × 10 <sup>-4</sup>		380
$\pi^0\mu^+\mu^-$	( 1.3 ± 0.4) × 10 <sup>-4</sup>	S=2.1	349
$e^+e^-$	( 7.28 ± 0.14) × 10 <sup>-5</sup>	S=1.3	391
$\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$	< 2 × 10 <sup>-4</sup>	CL=90%	262
$\pi^+\pi^-\gamma$	< 3.6 × 10 <sup>-3</sup>	CL=95%	366
$\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$	< 1 × 10 <sup>-3</sup>	CL=90%	256
$\pi^0\pi^0\gamma$	( 6.6 ± 1.1) × 10 <sup>-5</sup>		367
$\eta\pi^0\gamma$	< 3.3 × 10 <sup>-5</sup>	CL=90%	162
$\mu^+\mu^-$	( 9.0 ± 3.1) × 10 <sup>-5</sup>		377
$3\gamma$	< 1.9 × 10 <sup>-4</sup>	CL=95%	391

### Charge conjugation (C) violating modes

	C	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Confidence level	$\rho$ (MeV/c)
$\eta\pi^0$	< 2.1	× 10 <sup>-4</sup>	CL=90%	162
$2\pi^0$	< 2.1	× 10 <sup>-4</sup>	CL=90%	367
$3\pi^0$	< 2.3	× 10 <sup>-4</sup>	CL=90%	330

### $\eta'(958)$

$$I^G(J^{PC}) = 0^+(0^{-+})$$

Mass  $m = 957.78 \pm 0.06$  MeV  
Full width  $\Gamma = 0.198 \pm 0.009$  MeV

$\eta'(958)$ DECAY MODES	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Confidence level	$\rho$ (MeV/c)
$\pi^+\pi^-\eta$	(42.9 ± 0.7) %		232
$\rho^0\gamma$ (including non-resonant $\pi^+\pi^-\gamma$ )	(29.1 ± 0.5) %		165
$\pi^0\pi^0\eta$	(22.2 ± 0.8) %		239
$\omega\gamma$	( 2.75 ± 0.23) %		159
$\gamma\gamma$	( 2.20 ± 0.08) %		479
$3\pi^0$	( 2.14 ± 0.20) × 10 <sup>-3</sup>		430
$\mu^+\mu^-\gamma$	( 1.08 ± 0.27) × 10 <sup>-4</sup>		467
$\pi^+\pi^-\mu^+\mu^-$	< 2.9 × 10 <sup>-5</sup>	90%	401
$\pi^+\pi^-\pi^0$	( 3.8 ± 0.4) × 10 <sup>-3</sup>		428
$\pi^0\rho^0$	< 4 %	90%	111
$2(\pi^+\pi^-)$	< 2.4 × 10 <sup>-4</sup>	90%	372

### $f_0(500)$ or $\sigma$ [ $\bar{s}$ ] was $f_0(600)$

$$I^G(J^{PC}) = 0^+(0^{++})$$

Mass  $m = (400-550)$  MeV  
Full width  $\Gamma = (400-700)$  MeV

$f_0(500)$ DECAY MODES	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	$\rho$ (MeV/c)
$\pi\pi$	dominant	-
$\gamma\gamma$	seen	-

### $\rho(770)$ [h]

$$I^G(J^{PC}) = 1^+(1^{--})$$

Mass  $m = 775.26 \pm 0.25$  MeV  
Full width  $\Gamma = 149.1 \pm 0.8$  MeV  
 $\Gamma_{ee} = 7.04 \pm 0.06$  keV

$\rho(770)$ DECAY MODES	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Scale factor/ Confidence level	$\rho$ (MeV/c)
$\pi\pi$	~ 100 %		363

### $\rho(770)^\pm$ decays

$\pi^\pm\gamma$	( 4.5 ± 0.5) × 10 <sup>-4</sup>	S=2.2	375
$\pi^\pm\eta$	< 6 × 10 <sup>-3</sup>	CL=84%	152
$\pi^\pm\pi^+\pi^-\pi^0$	< 2.0 × 10 <sup>-3</sup>	CL=84%	254

### $\rho(770)^0$ decays

$\pi^+\pi^-\gamma$	( 9.9 ± 1.6) × 10 <sup>-3</sup>		362
$\pi^0\gamma$	( 6.0 ± 0.8) × 10 <sup>-4</sup>		376
$\eta\gamma$	( 3.00 ± 0.20) × 10 <sup>-4</sup>		194
$\pi^0\pi^0\gamma$	( 4.5 ± 0.8) × 10 <sup>-5</sup>		363
$\mu^+\mu^-$	[i] ( 4.55 ± 0.28) × 10 <sup>-5</sup>		373
$e^+e^-$	[i] ( 4.72 ± 0.05) × 10 <sup>-5</sup>		388
$\pi^+\pi^-\pi^0$	( 1.01 <sup>+0.54</sup> <sub>-0.36</sub> ± 0.34) × 10 <sup>-4</sup>		323
$\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$	( 1.8 ± 0.9) × 10 <sup>-5</sup>		251
$\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$	( 1.6 ± 0.8) × 10 <sup>-5</sup>		257
$\pi^0e^+e^-$	< 1.2 × 10 <sup>-5</sup>	CL=90%	376

### $\omega(782)$

$$I^G(J^{PC}) = 0^-(1^{--})$$

Mass  $m = 782.65 \pm 0.12$  MeV (S = 1.9)  
Full width  $\Gamma = 8.49 \pm 0.08$  MeV  
 $\Gamma_{ee} = 0.60 \pm 0.02$  keV

[HTTP://PDG.LBL.GOV](http://pdg.lbl.gov)

Page 4

Created: 8/25/2014 17:06

[HTTP://PDG.LBL.GOV](http://pdg.lbl.gov)

Page 5

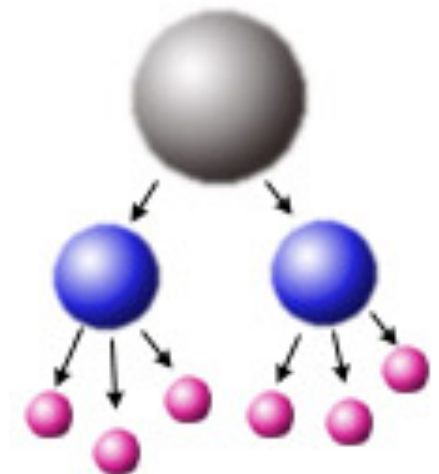
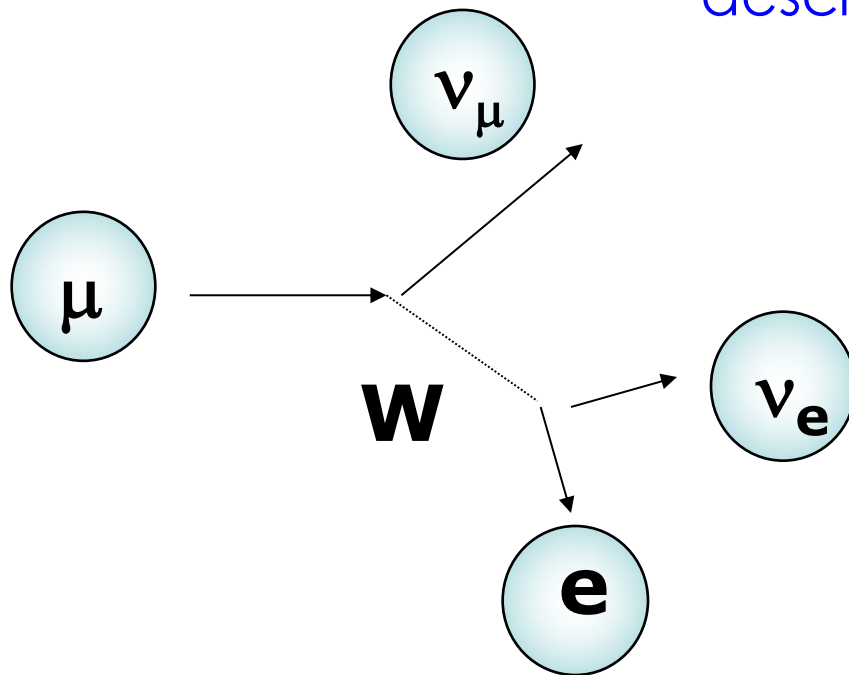
Created: 8/25/2014 17:06

500 pagine, si legge come un romanzo...

# I decadimenti

Le particelle più pesanti (sia elementari che composte) decadono in particelle più leggere

I decadimenti avvengono seguendo le regole (per esempio le conservazione della carica) descritte dal Modello Standard



No further decay is possible!

# Materia ed anti-materia

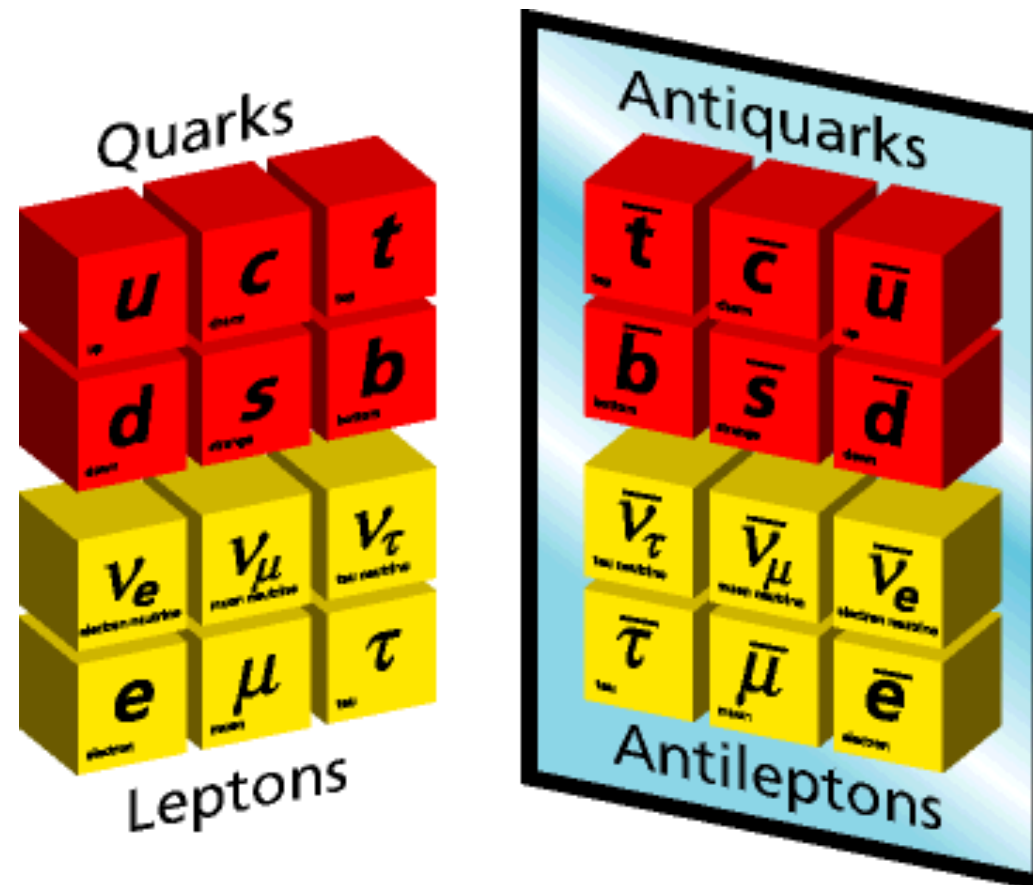
Ogni particella di materia ha la sua anti-particella.

- I mediatori non hanno le antiparticelle: non esistono gli anti-gluoni o gli anti-fotoni!

- Le anti-particelle hanno cariche opposte a quelle delle particelle

**Regola:** se si creano delle particelle in laboratorio si ottiene

**Tanta materia quanto anti-materia,  
Tante cariche positive quante negative.**



# Come si fa l'anti-materia?

---

## **Le banane fanno antimateria....:**

Rilasciano un positrone, l'equivalente di un elettrone per l'antimateria, ogni 75 minuti...

Questo capita perché la banana contiene un isotopo del potassio, il potassio-40

Quando il potassio-40 decade può emettere un positrone....



Ci sono anche altri modi di produrre antimateria....

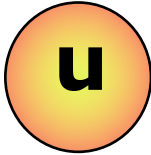
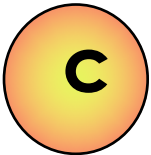
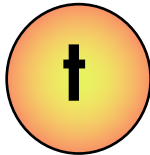

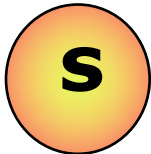
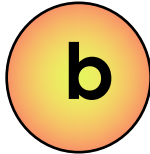
# Simmetrie in fisica delle particelle

Le simmetrie sono

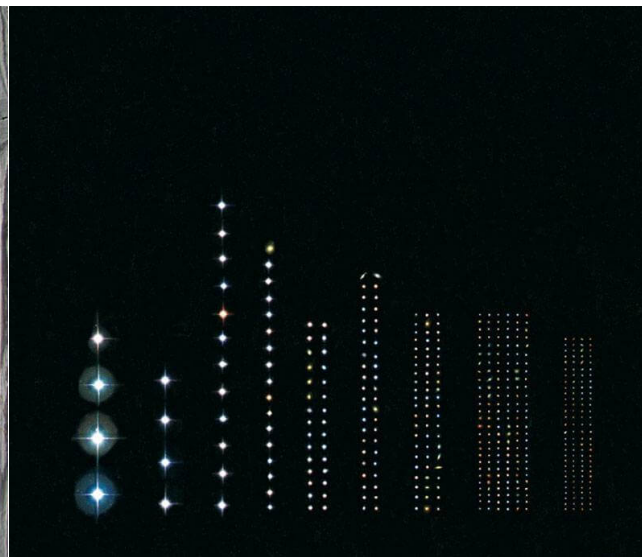
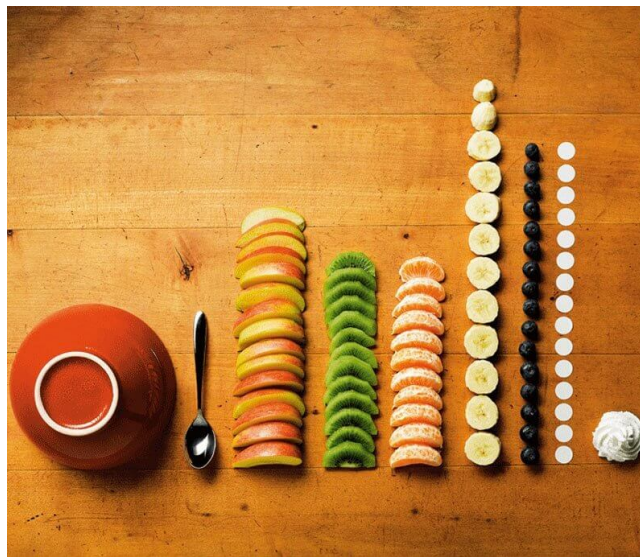
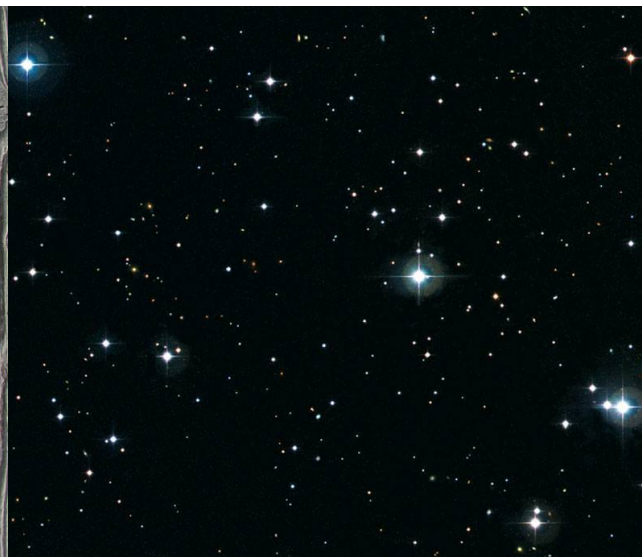
## Una guida nella ricerca di nuove scoperte

La scoperta dei quark è un esempio:

Condizioni iniziali:

		1974		
Carica				1995 !
$2/3$				
$-1/3$				1977

# Altro intermezzo sulle simmetrie





# Simmetrie Nascoste

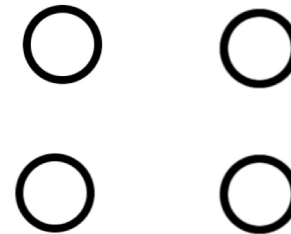
---

Le simmetrie della natura sono spesso “nascoste”, “rotte” da effetti che si sovrappongono.

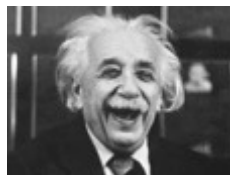
Esempio: le leggi della fisica sono simmetriche per rotazione. Sulla terra invece, a causa della gravità, questo non è vero.

Si dice allora che la simmetria è nascosta (o rotta) dalla gravità.

La simmetria esiste, ma non si vede più

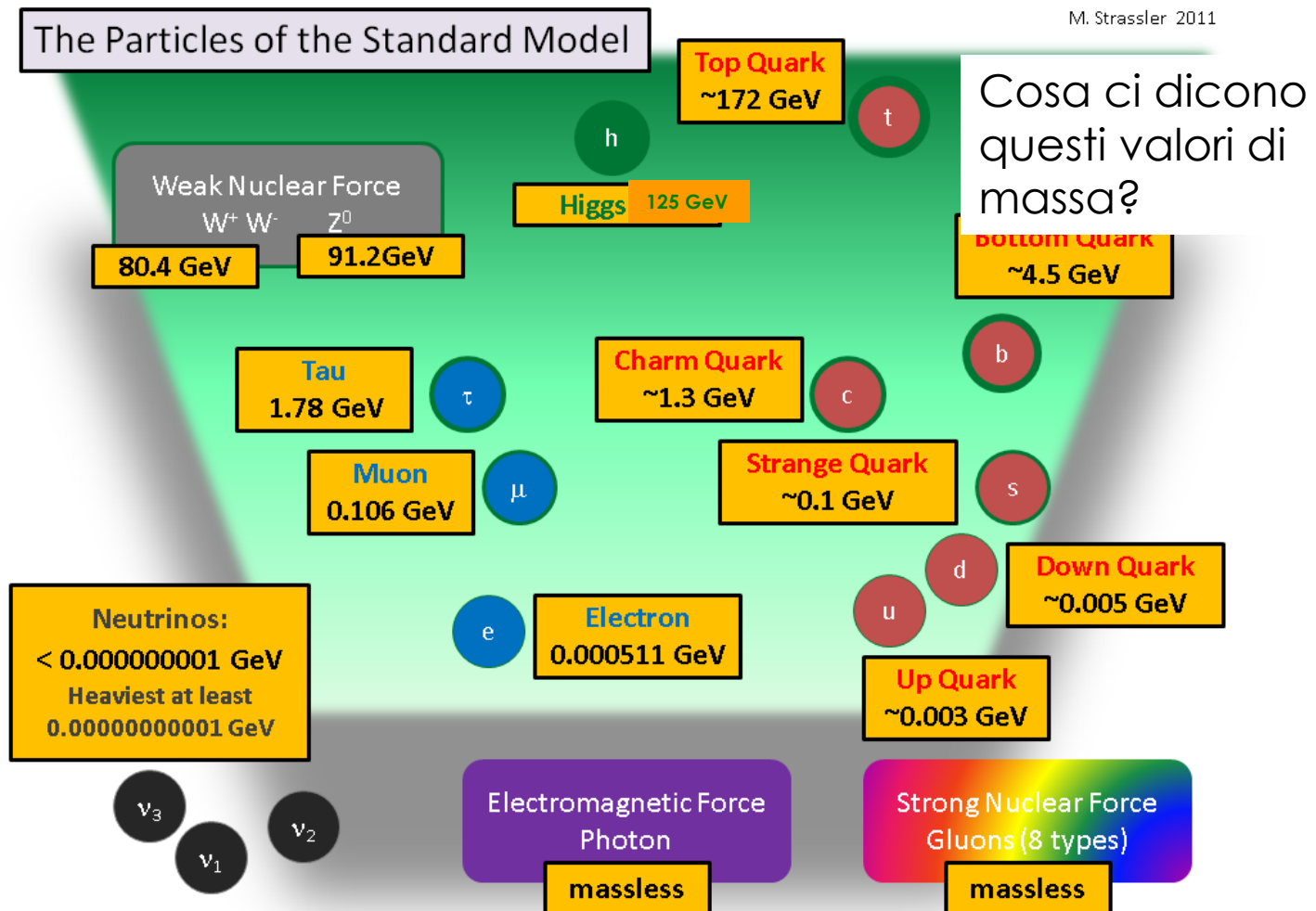


La ricerca di simmetria nascoste è il mestiere dei fisici teorici...



# La massa delle particelle elementari

Qual è la simmetria tra le masse particelle elementari?



# L'idea di Mr. Higgs

Le particelle non hanno massa, e sono simmetriche tra loro

Questa simmetria è "nascosta" (broken) dal fatto che il bosone di Higgs, interagendo con le particelle, le rende massive

## BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

*Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland*

Received 27 July 1964

!!!!!!

Recently a number of people have discussed the Goldstone theorem <sup>1,2</sup>): that any solution of a Lorentz-invariant theory which violates an internal symmetry operation of that theory must contain a massless scalar particle. Klein and Lee <sup>3</sup>) showed that this theorem does not necessarily apply in non-relativistic theories and implied that their considerations would apply equally well to Lorentz-invariant field theories. Gilbert <sup>4</sup>), how-

ever, gave a proof that the failure of the Goldstone theorem in the nonrelativistic case is of a type which cannot exist when Lorentz invariance is imposed on a theory. The purpose of this note is to show that Gilbert's argument fails for an important class of field theories, that in which the conserved currents are coupled to gauge fields.

Following the procedure used by Gilbert <sup>4</sup>), let us consider a theory of two hermitian scalar fields

# L'idea di Mr. Higgs

---

Questa idea apre la porta alla descrizione matematica delle interazioni tra particelle, chiamata il MODELLO STANDARD, che è possibile **SOLO SE**:

Tutte le particelle hanno massa nulla

C'è una particella **assolutamente speciale** che spiega perché le particelle sono massive:

## Il bosone di Higgs

# Il bosone di Higgs ed il campo di Higgs

Le forze agiscono tra due particelle (fermioni) e si scambiano un mediatore (bosone)

La particella di Higgs invece è scambiata tra il campo di Higgs e la particella.




# La massa dei leptoni e quark

Idea chiave:


Il campo di Higgs interagisce con le particelle, le rallenta e crea una proprietà apparente: la massa


La massa è una proprietà che viene acquisita attraverso l'interazione con il bosone di Higgs: sembrano avere massa perché interagiscono con il bosone di Higgs e diventano più difficili da spostare.

 Higgs Field

 neutrino  $\approx 0$  MeV

 electron  $\approx 0.5$  MeV

 MUON  $\approx 140$  MeV

 top quark  $\approx 170.000$  MeV

# Caccia al bosone di Higgs

---



Dal 1964, anno di pubblicazione dell'articolo di Mr. Higgs che lo proponeva, la particella di Higgs è stato il sacro Gral della fisica, su cui si sono riversati fiumi di articoli, soldi, notti insonni, matrimoni falliti, adrenalina, speranze e delusioni.

# Tutto è cambiato il 4 luglio 2012....



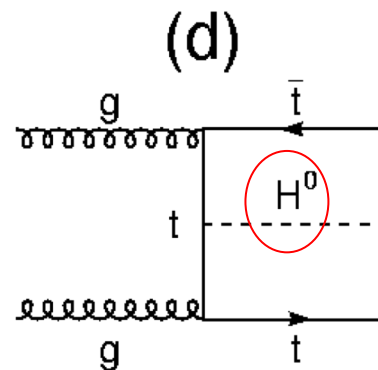
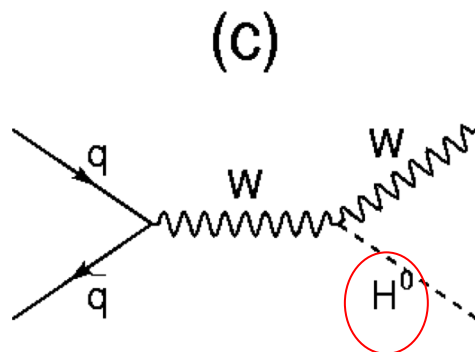
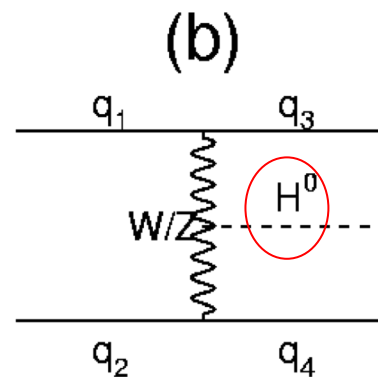
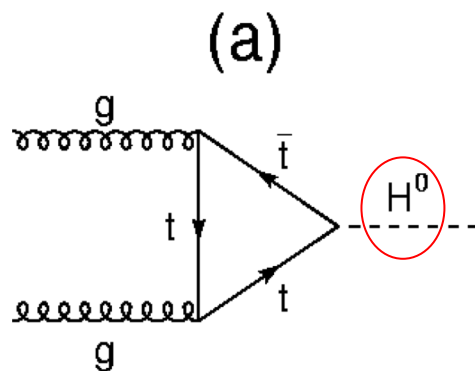
Mr Higgs



# Come si fa un bosone di Higgs?

La teoria ci dice quali sono i meccanismi di produzione:

- Si parte da due protoni
- due “costituenti” si fondono, e si forma l'Higgs



# Per i curiosi

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{H}}^1(\text{pp} \rightarrow \text{H}) &= \sum_{ab} \int_{\tau}^1 dx_a \int_{\tau/x_a}^1 dx_b \int \frac{d\omega_1}{2\pi} \int \frac{d\omega_2}{2\pi} \int dz \delta\left(x_a x_b - \frac{M_{\text{BH}}^2}{s}\right) 2\pi\delta(zM_{\text{BH}} - \omega_1 - \omega_2) 2\pi\delta(M_{\text{H}} - \omega_1 - \omega_2) \\
 &\quad \times f_{a/A}(x_a, \mu^2) f_{b/B}(x_b, \mu^2) L^{ab \rightarrow \text{BH} \rightarrow \text{gg}}(\omega_1, \omega_2) p_{\text{g}}(\omega_1) p_{\text{g}}(\omega_2) L^{\text{gg} \rightarrow \text{H}}(\omega_1, \omega_2) \\
 &= \sum_{ab} \int_{\tau}^1 dx_a \int_{\tau/x_a}^1 dx_b \int \frac{d\omega_1}{2\pi} \int \frac{d\omega_2}{2\pi} \int dz \delta\left(x_a x_b - \frac{M_{\text{BH}}^2}{s}\right) 2\pi\delta(zM_{\text{BH}} - \omega_1 - \omega_2) 2\pi\delta(M_{\text{H}} - \omega_1 - \omega_2) \\
 &\quad \times f_{a/A}(x_a, \mu^2) f_{b/B}(x_b, \mu^2) \frac{e^{-8\pi M_{\text{BH}} \omega_1}}{1 - e^{-8\pi M_{\text{BH}} \omega_1}} \frac{e^{-8\pi M_{\text{BH}} \omega_2}}{1 - e^{-8\pi M_{\text{BH}} \omega_2}} \frac{1}{M_{\text{P}}^2} \left\{ \frac{\omega_1 + \omega_2}{zM_{\text{P}}} \left[ \frac{4\Gamma(7/2)}{3} \right] \right\}^{2/5} \frac{1}{\omega_1^2} \frac{1}{\omega_2^2} \\
 &\quad \times \sum_{C=1}^8 (T^C T^C)_{mn} \left(\frac{\alpha_S}{\pi}\right)^2 \frac{\pi}{288\sqrt{2}} \left( \frac{6M_{\text{t}}^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2} \left\{ 1 + \left[ 1 - \frac{4M_{\text{t}}^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2} \right] \arcsin^2 \left[ \sqrt{\frac{(\omega_1 + \omega_2)^2}{4M_{\text{t}}^2}} \right] \right\} \right)^2 \\
 &\approx C_{\text{F}} \delta_{mn} \left(\frac{s}{M_{\text{BH}}^2}\right)^{1.2} \left[ 1 + 3 \frac{M_{\text{BH}}^2}{s} \ln \left(\frac{s}{M_{\text{BH}}^2}\right) \right] \left(\frac{\alpha_S}{\pi}\right)^2 \frac{\pi}{288\sqrt{2}} \left\{ \frac{6M_{\text{t}}^2}{M_{\text{H}}^2} \left[ 1 + \left( 1 - \frac{4M_{\text{t}}^2}{M_{\text{H}}^2} \right) \arcsin^2 \left( \sqrt{\frac{M_{\text{H}}^2}{4M_{\text{t}}^2}} \right) \right] \right\}^2 \\
 &\quad \times \frac{1}{M_{\text{P}}^2} \left\{ \frac{M_{\text{BH}}}{M_{\text{P}}} \left[ \frac{4\Gamma(7/2)}{3} \right] \right\}^{2/5} \frac{e^{-8\pi M_{\text{BH}}^2}}{1 - e^{-8\pi M_{\text{BH}}^2}} \left[ \frac{1}{M_{\text{t}}^2} - \frac{1}{M_{\text{H}}^2} + \ln \left(\frac{M_{\text{t}}}{M_{\text{H}}}\right) \right]
 \end{aligned}$$

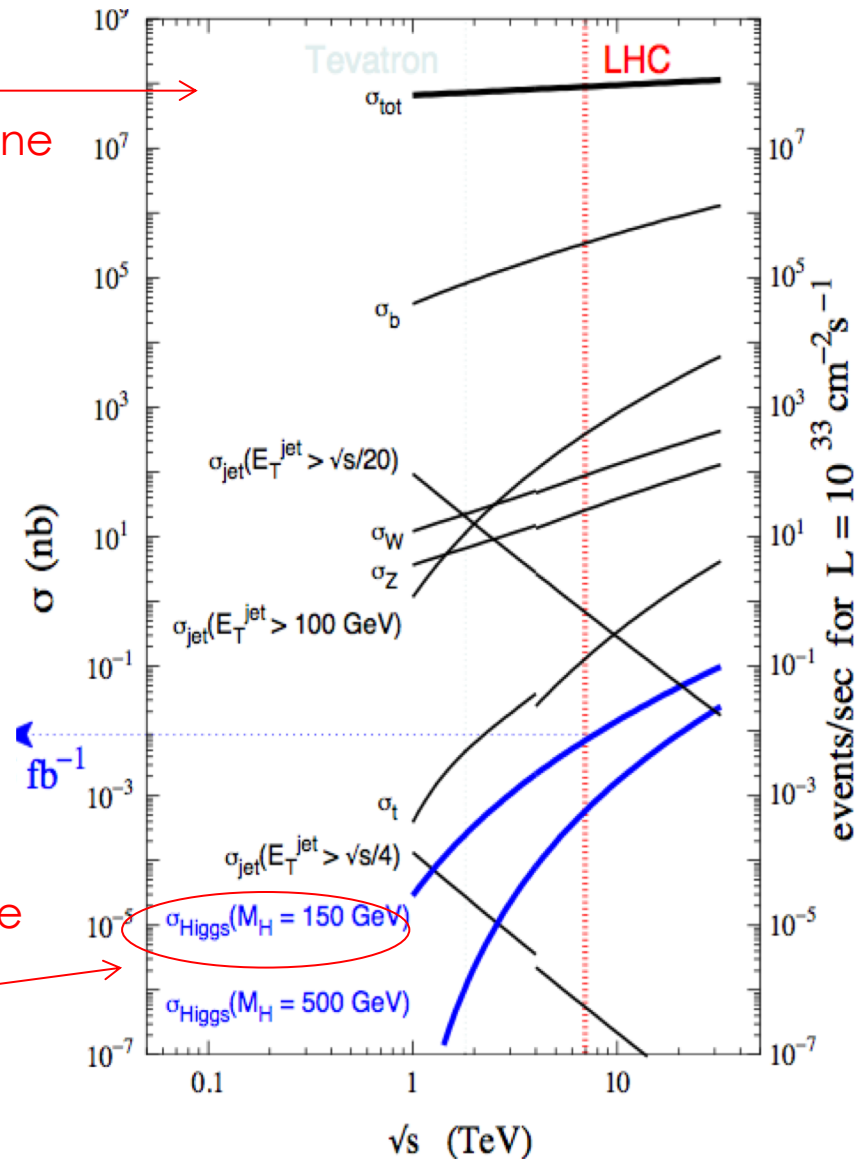
# Con che probabilità si crea un bosone di Higgs?

Si riesce a fare un bosone di Higgs una volta ogni mille miliardi di urti  
 1000.000.000.000 urti...

Urto protone-protone

10<sup>-12</sup>

Urto protone-protone che fa un Higgs

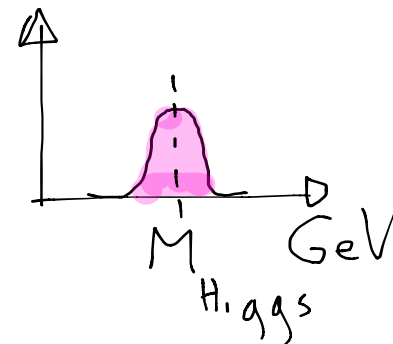
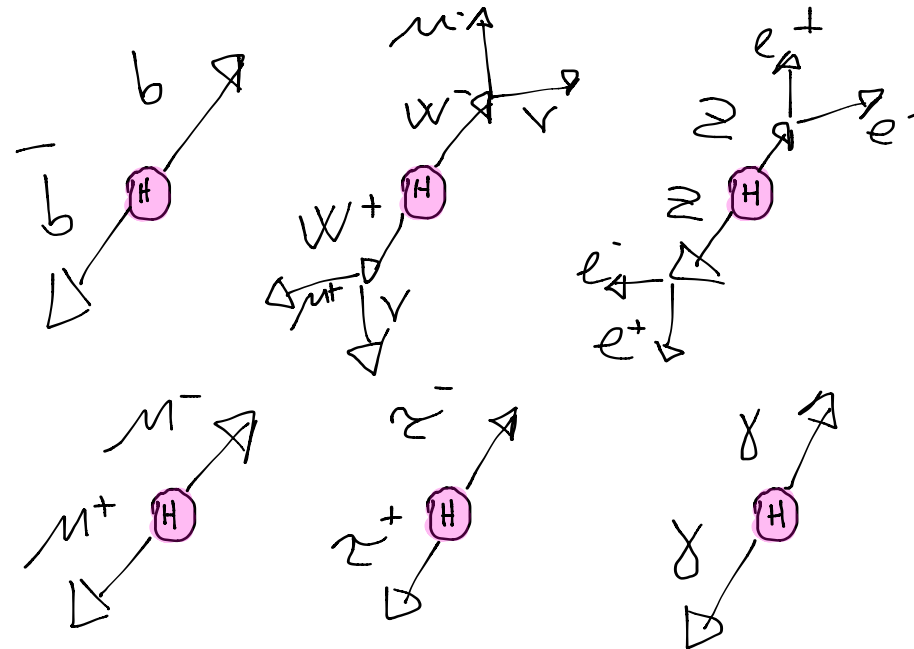


# Come facciamo a vederlo?

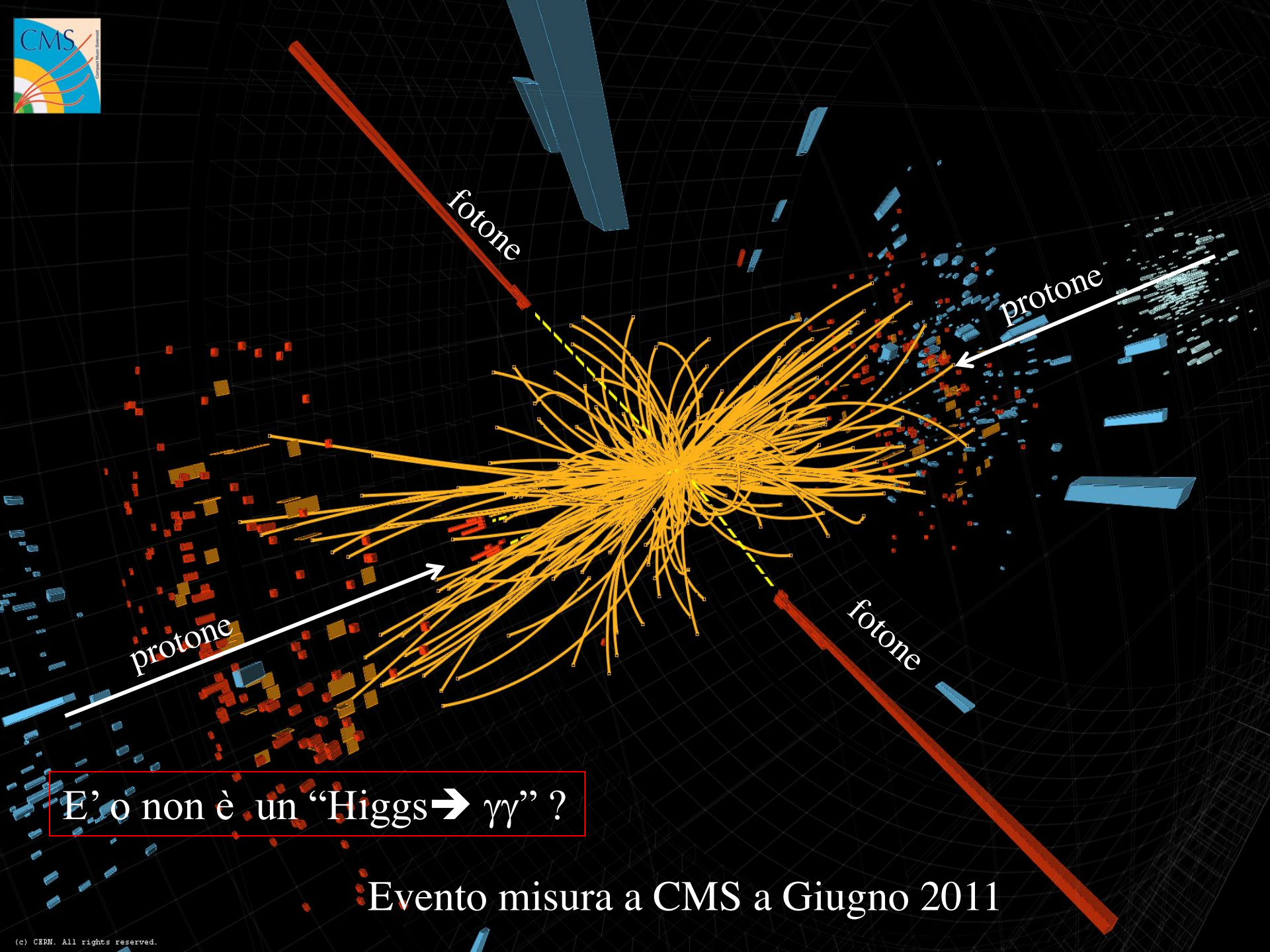
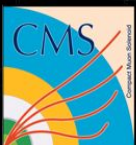
Non è sufficiente fare un bosone di Higgs, bisogna anche vederlo.  
Come si fa?

Il bosone di Higgs non vive abbastanza a lungo per essere misurato, ma decade subito in altre particelle.

Dobbiamo misurare la massa di coppie  $bb$ , oppure  $WW$ ,  $ZZ$ , ...,  $gg$ , e vedere se è la stessa.



Tutte le combinazioni hanno la stessa massa!

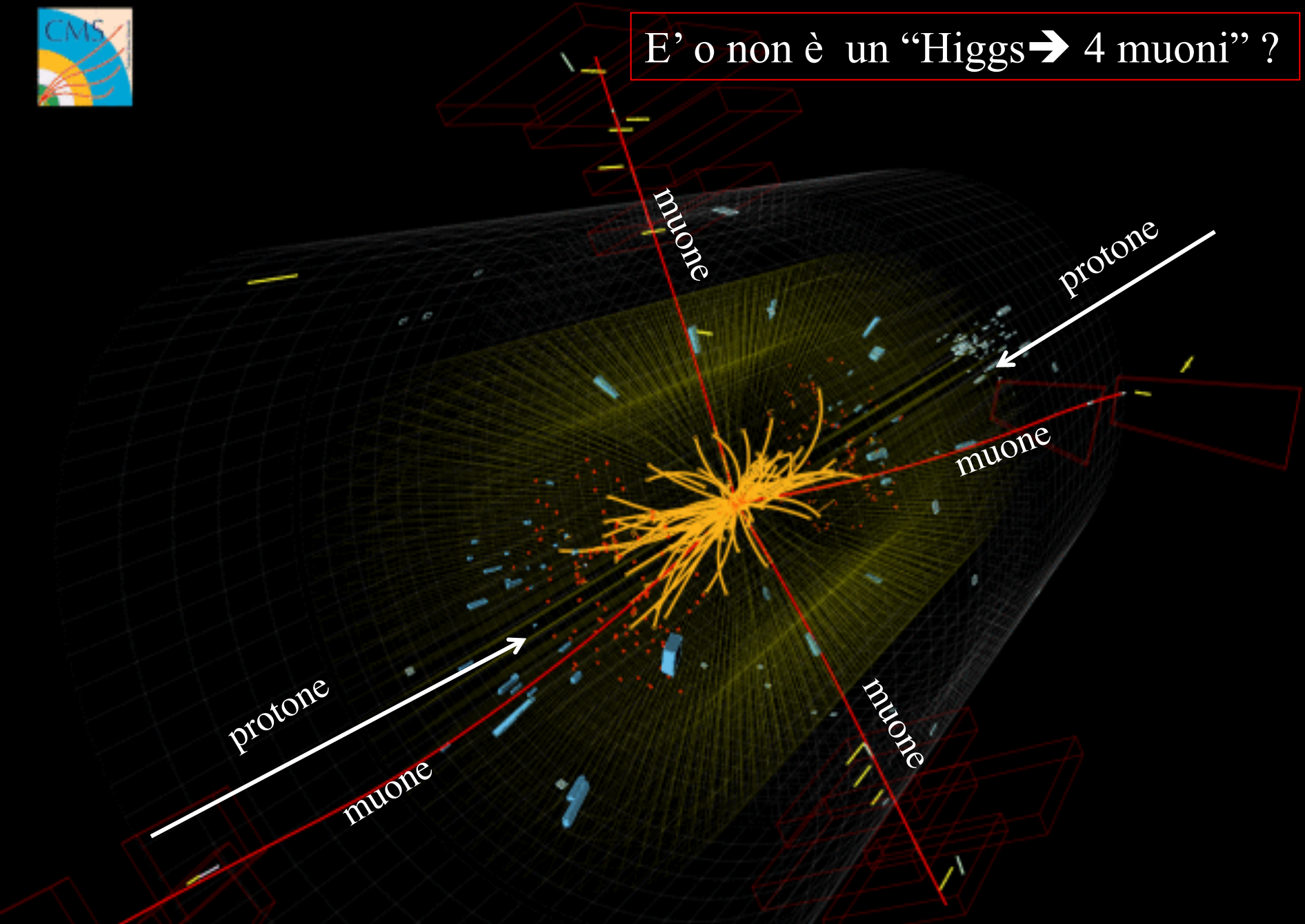


E' o non è un "Higgs  $\rightarrow \gamma\gamma$ " ?

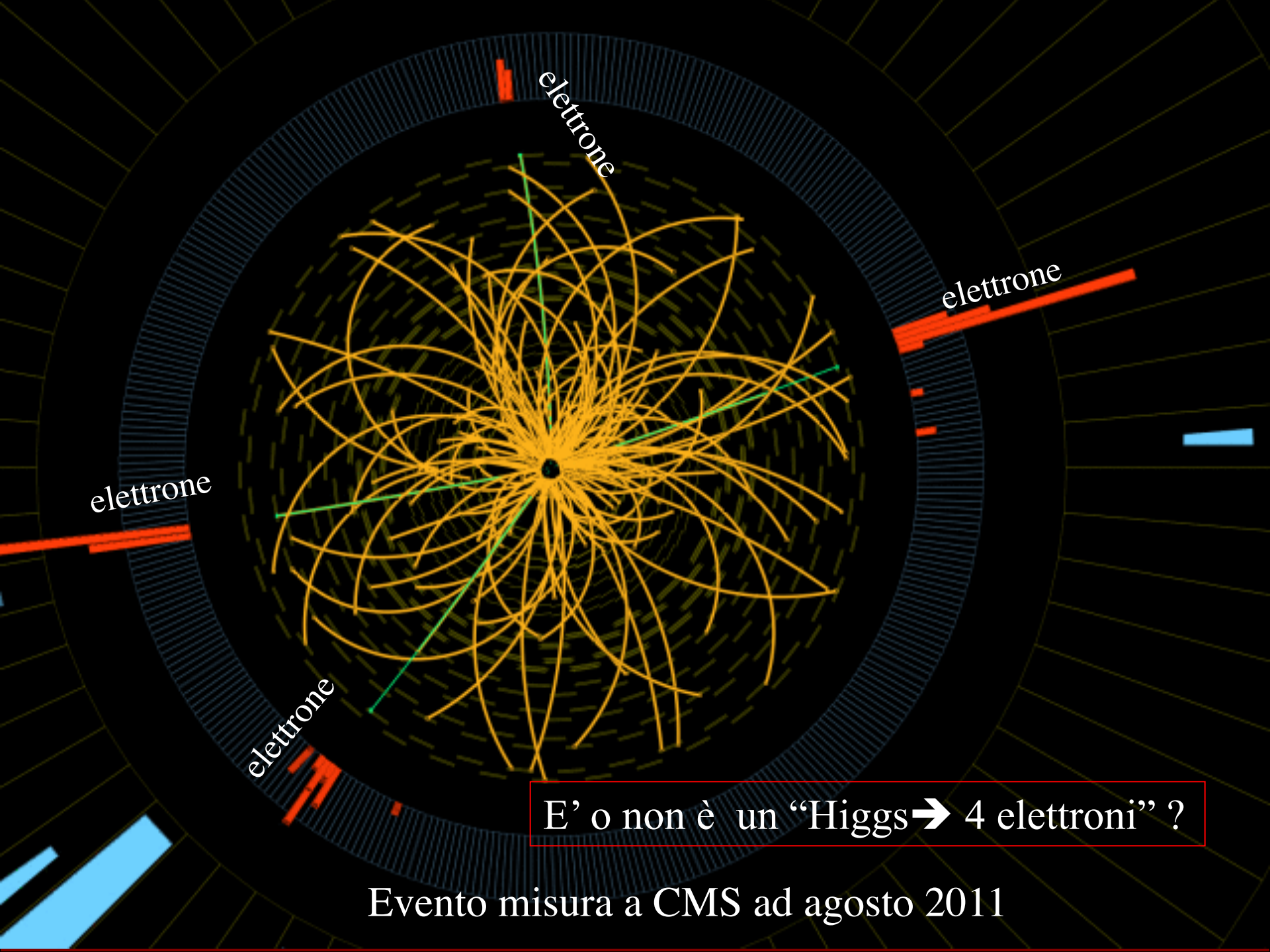
Evento misura a CMS a Giugno 2011



E' o non è un "Higgs  $\rightarrow$  4 muoni" ?



Evento misura a CMS ad Agosto 2011

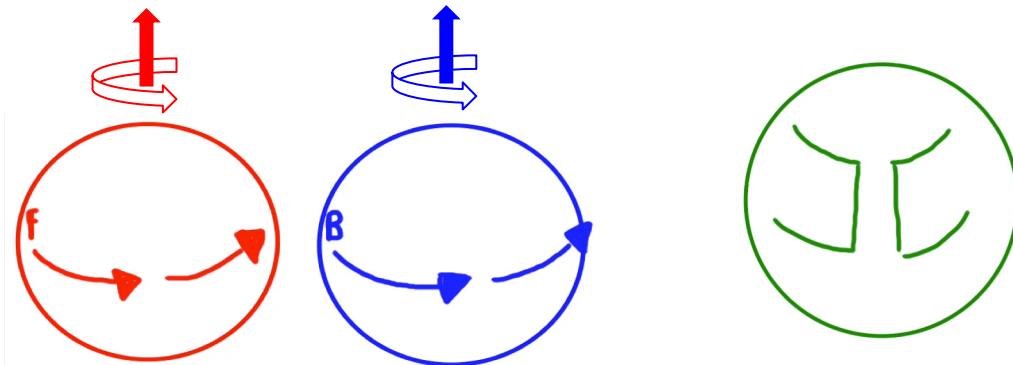


E' o non è un "Higgs → 4 elettroni" ?

Evento misura a CMS ad agosto 2011

# Perché l'Higgs è così speciale?

1. Non sappiamo scrivere una teoria in cui le particelle siano massive. La particella di Higgs risolve questo problema.
2. Permea tutto lo spazio. Non si era mai visto prima un effetto così
3. È un nuovo tipo di forza: il campo di Higgs è la quarta forza della natura
4. È la prima particella elementare con spin 0 mai trovata.
  - È veramente elementare?



Higgs composto?



# La massa del bosone di Higgs

---

Siamo così bravi che possiamo anche calcolare la massa del bosone di Higgs:

1) Risultato del calcolo:

**Teoria:** Higgs Mass =  $10^{16}$  GeV ~ infinito

2) Misura:

**Misura:** Higgs Mass = 125 GeV (~125 protons)

C'e' qualche cosa di sbagliato... ☹

Magari l'Higgs non è una particella elementare, oppure la teoria è incompleta..

# Ci sono altre cose che non capiamo?

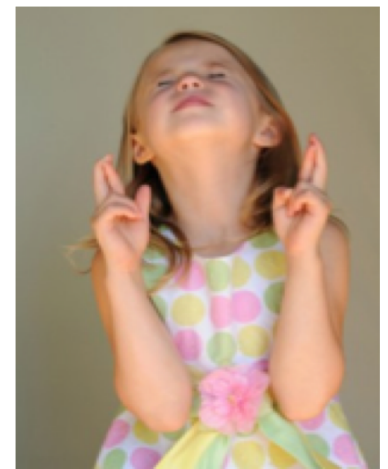
Al CERN di Ginevra si studiano le particelle elementari, ed è un posto molto grande.

Tuttavia c'è un altro esperimento, molto più potente, che non abbiamo fatto noi, ma di cui sappiamo il risultato:

**l'universo è il risultato di un immenso esperimento di fisica.**

Se noi conoscessimo tutte le leggi della fisica, sapremmo dire con esattezza come mai l'universo è fatto nel modo in cui lo vediamo

Adesso, per capire le leggi della fisica, guardiamo il cielo...



# Dark Energy

---

L'universo si espande dal momento della sua nascita: per effetto della gravità l'espansione dovrebbe rallentare nel tempo

**Invece:** è stato misurato che la velocità di espansione nel passato era più lenta di quella di adesso

→ l'universo sta accelerando.  
(premio Nobel per la fisica 2011).

Scaldando un oggetto, questo si dilata → Per l'universo è lo stesso

Cosa sta scaldando l'universo? Non abbiamo assolutamente idea cosa sia. La chiamiamo: **Dark Energy**



# Dark matter

---

Ci sono indicazioni da molti fenomeni cosmologici che nell'universo c'è più materia di quella visibile.

Questo vuol dire che oltre alle stelle ed ai pianeti, ci sono nuvole di particelle invisibili distribuite in tutto l'universo

Queste particelle invisibili interagiscono molto poco con quelle che conosciamo noi, per cui non riusciamo a farle in laboratorio.

Modelli matematici che usano la gravità ed il moto delle stelle/galassie per determinare quanta materia ci sia nell'universo predicono che:

Materia oscura = 500% materia visibile !!!

# Cosa capita adesso...

---

Abbiamo scoperto l'Higgs...tuttavia:

I modelli teorici prevedono che assieme alla particella Higgs si debbano trovare altre particelle per spiegare la massa del bosone di Higgs, la materia oscura e la energia oscura

**Regola: i bosoni di Higgs non vengono mai soli...**

I nostri colleghi teorici, in discussioni pre-LHC erano molto sicuri di se:  
“Abbiamo capito tutto: ad LHC troverete sia l'Higgs che altre cose”.

Abbiamo trovato l'Higgs, ma niente d'altro!!

# Rapporto teorici-sperimentali prima e dopo LHC

pre - LHC

post - LHC



Fisico teorico

Fisico sperimentale



Fisico  
teorico

Fisico sperimentale

# Sommario

---

Abbiamo trovato l'Higgs, grande successo, ci abbiamo messo solo 48 anni.

Non abbiamo trovato altre particelle, quindi la nostra teoria principale, lo "Standard Model", non sa come spiegare alcuni aspetti della fisica che vediamo ad LHC.

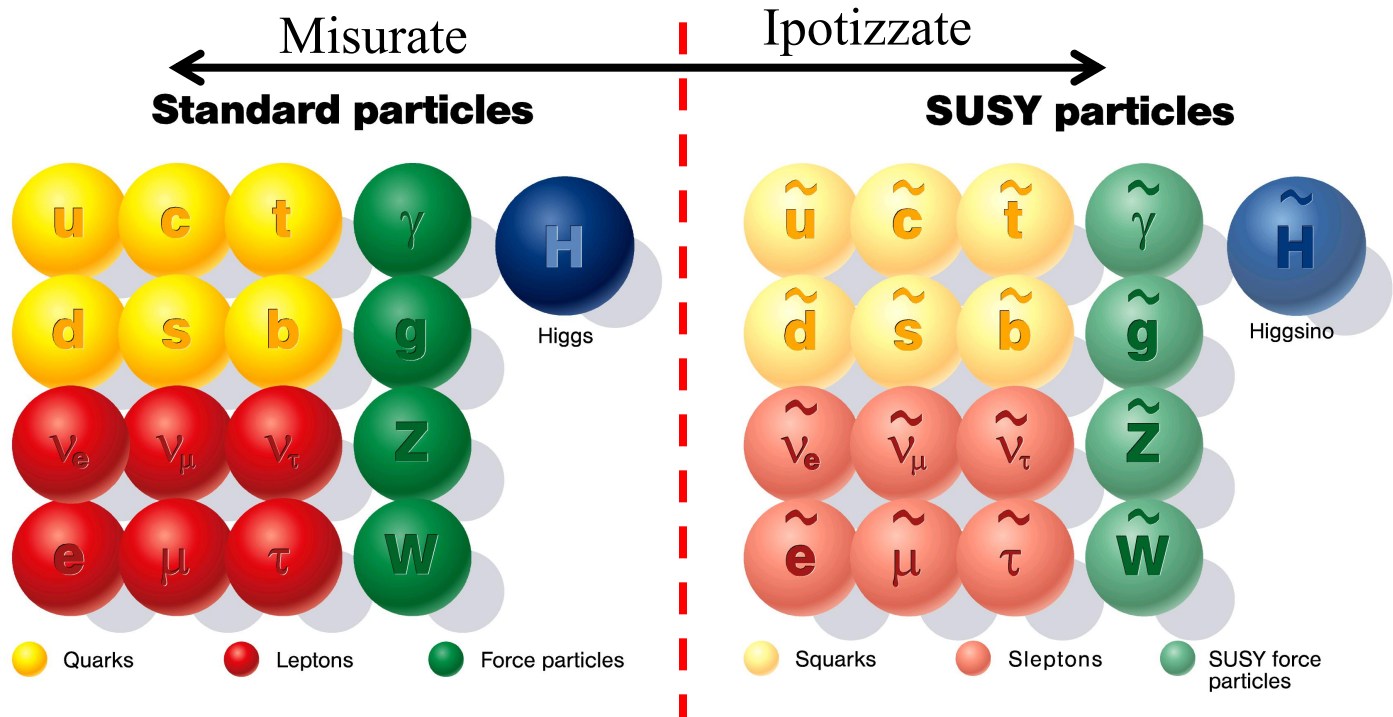
Non sappiamo tra le altre cose:

1. perché l'anti-materia sia sparita
2. cosa sia la materia oscura che fa girare le galassie
3. cosa sia l'energia oscura che fa accelerare l'universo
4. come calcolare la massa dell'Higgs

Abbiamo un'arma segreta: voi! Venite ad aiutarci

# SuperSYmmetry

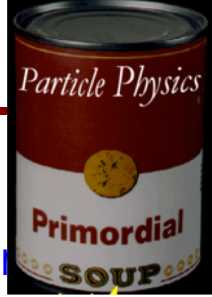
La supersimmetria è una teoria che prevede l'esistenza di un altro gruppo di particelle. Visto che non le abbiamo trovate, vuol dire che però sono troppo pesanti per essere scoperte



SUSY e' una teoria bellissima, che risolve molti problemi. Purtroppo forse non è la teoria giusta...



# Fisica astro-particellare



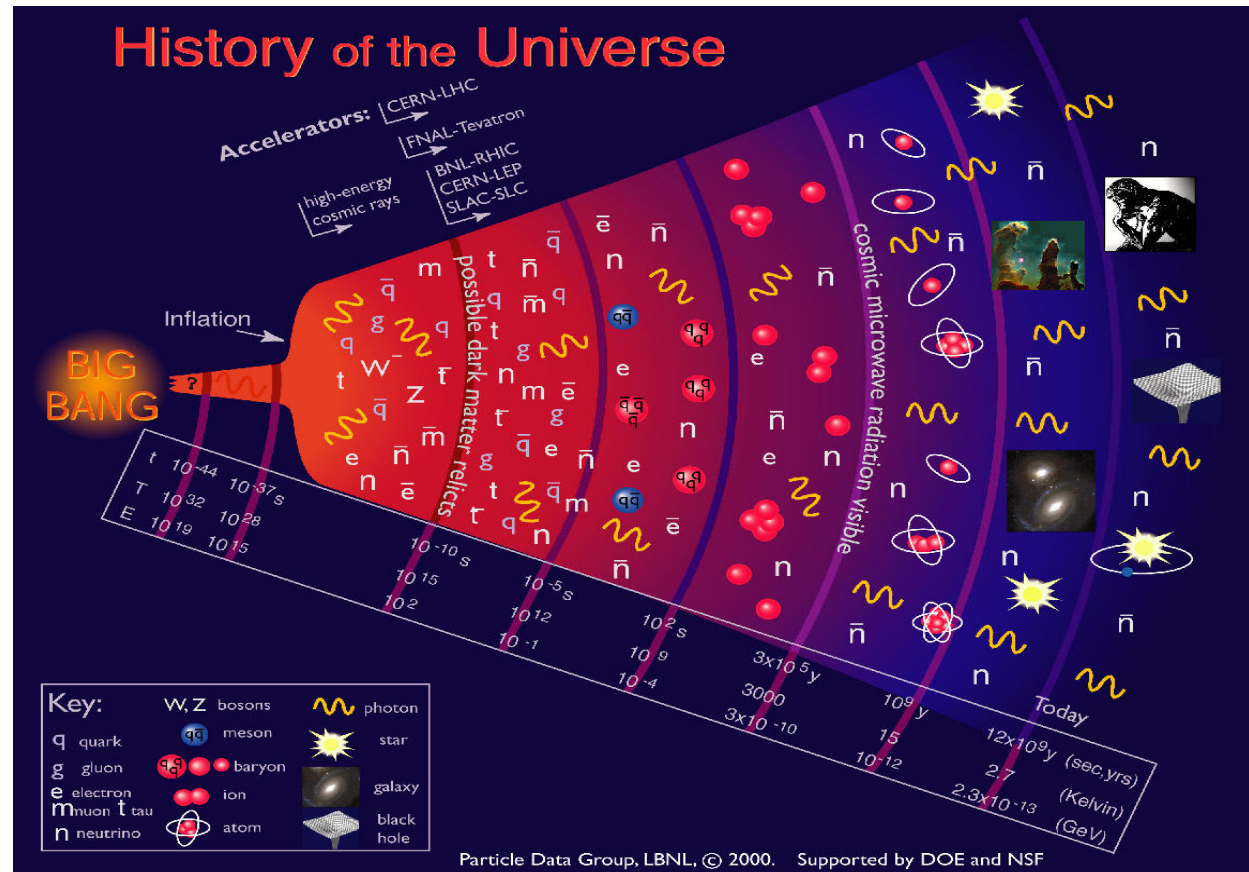
Gli istanti iniziali del nostro universo sono stati governati dalle stesse forze che studiamo negli acceleratori, per cui è naturale guardare le stelle per capire cosa sia capitato..

Studiare le leggi che hanno regolato l'evoluzione dell'universo è equivalente a fare un enorme esperimento.

È provato che:

1. Ci sia stato un big bang
2. Che ci sia stato un momento di rapidissima espansione (inflazione)

La fisica di LHC è quella di  $10^{-11}$  sec dopo il big-bang



# Lonatano = indietro nel tempo

---

Ci serve un concetto fondamentale, usato sempre in astrofisica:

Guardare lontano vuole dire guardare indietro nel tempo.

La luce di una galassia lontanissima ci ha messo tantissimo tempo ad arrivare, e quindi ci racconta come era la galassia quando è partita.

1. Noi vediamo la luna com'era 1.3 secondi fa
2. Noi vediamo il sole com'era 500 secondi fa
3. Le stelle al limite della nostra galassia com'erano 100,000 anni fa

# Velocità di espansione dell'universo

Consideriamo una macchina dei pompieri con la sirena accesa. Guardando ed ascoltando possiamo imparare due cose:

- Sapendo la sua dimensione reale, dalla sua dimensione apparente possiamo capire la **posizione**
- Sapendo la sua frequenza reale, dalla frequenza apparente possiamo calcolarne **la velocità** (effetto doppler)

Nell'universo le macchine dei pompieri sono le **supernova 1 a**: se ne conosce la luminosità e frequenza molto bene (perché esplodono sempre con la stessa massa)

Dalla luminosità e frequenza apparente, possiamo ricavare la **posizione e velocità delle supernovae**.

**supernovae lontane hanno velocità minore di quelle vicine**

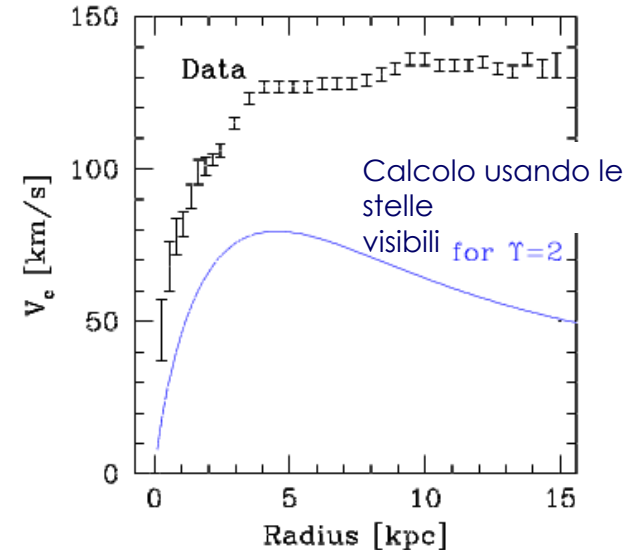


# Velocità di rotazione delle galassie

Consideriamo una galassia qualunque. Le stelle ruotano intorno al centro della galassia, come i pianeti intorno al sole.

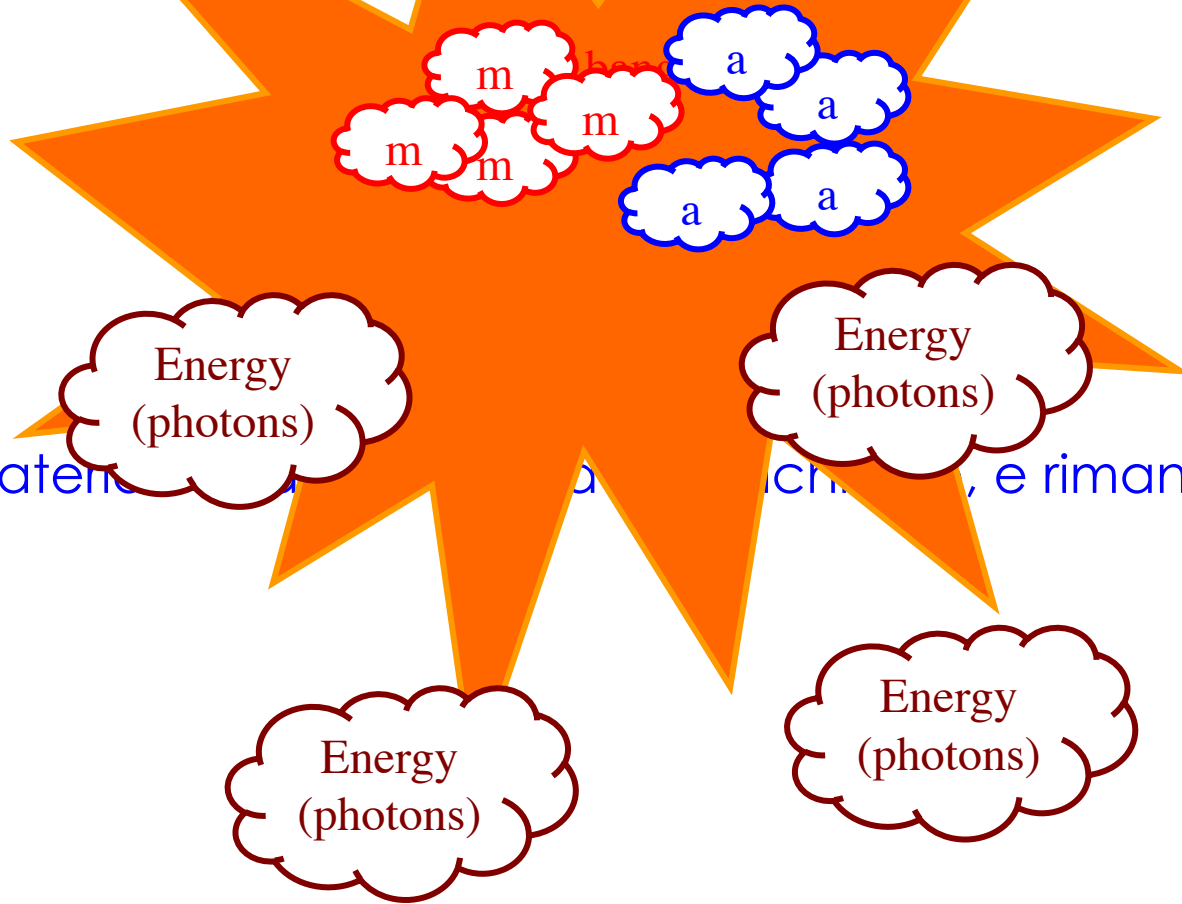
Usando le leggi di Newton e Keplero, si può dimostrare che le stelle alla periferia devono girare più piano, cioè che **dove c'è meno materia le stelle girano più lentamente.**

In realtà la velocità di rotazione è costante all'augmentare del raggio



# Un problema ovvio: perché esiste l'universo?

Il Big-Bang creò materia e anti materia.

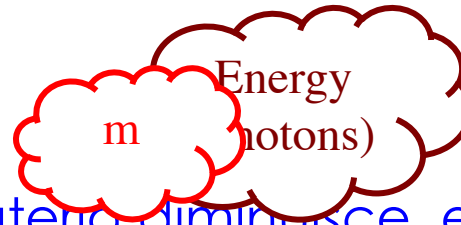
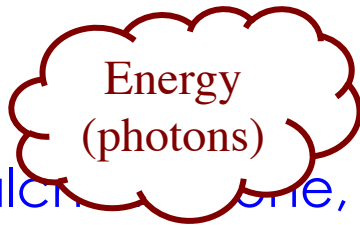
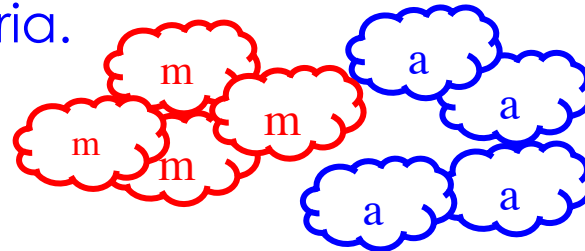


Poi materia e anti materia si annichiscono, e rimane solo energia

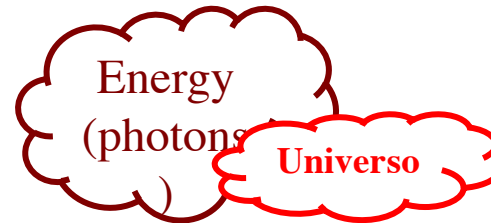
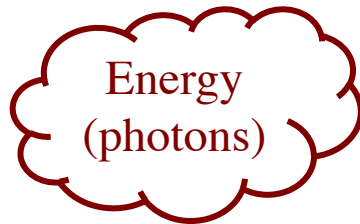
Ma sappiamo che non è vero: l'universo esiste!

# Un problema ovvio: perché esiste l'universo?

Supponiamo di nuovo che Big-Bang abbia creato tanta materia quanta antimateria.

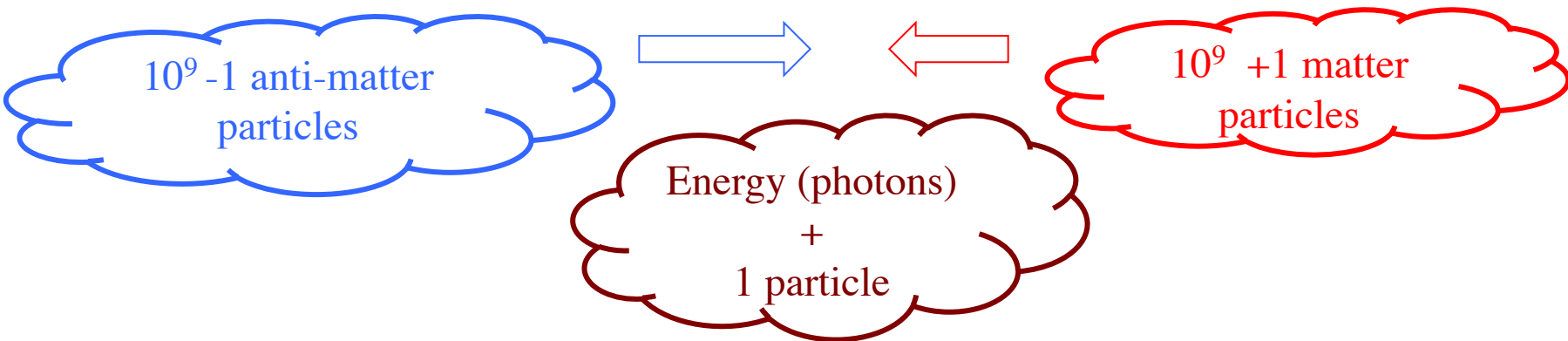


Per qualche ragione, l'antimateria diminuisce, e la materia aumenta, c'è una **violazione della simmetria materia - antimateria**



**l'universo esiste!**

# L'universo è quindi quello che non si annichilato



Ci sono un miliardo di fotoni per ogni particella di materia!!

Questo oceano di fotoni si chiama “radiazione di fondo”  
(Nobel prize 1978 (scoperta), 2006 (misura))

Molto probabilmente questo è vero anche per la materia oscura: :  
la maggior parte di materia oscura è scomparsa, e solo una  
minima parte è ancora in giro...

# Di cosa è fatto l'universo?

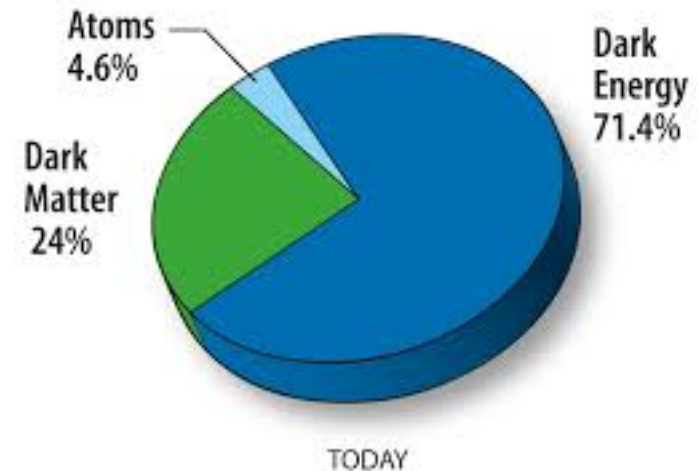
Il 4-5 % è costituito dalla materia che conosciamo

Il 22-25% è costituito da 'Dark Matter':

- I. Non emette nessun tipo di radiazione elettromagnetica.
- II. Fa ruotare le galassie più velocemente
- III. Una possibilità è che contenga 'particelle super-simmetriche'

Il 70 - 73% è composto da 'Dark Energy'

1. Riempie uniformemente tutto lo spazio
2. Aumenta la velocità di espansione dell'universo





# Una soluzione a tutti i problemi?

---

Sappiamo che abbiamo bisogno di altre particelle affinché i calcoli del “settore di Higgs” diano risposte sensate

Sappiamo che ci sono altre particelle che popolano il “dark sector”



**È possibile che ci sia un'unica soluzione ai due problemi?**

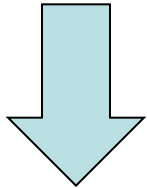


Ci sono teorie come la “SUPERSYMMETRY” che propongono esattamente questa soluzione

# Un'ipotesi: la natura ha due simmetrie nascoste

Per gioco ci racconto come forse è fatta la natura: la teoria giusta è SUSY.  
All'inizio le particelle vengono sempre a coppie, per ogni fermione c'è un bosone, tutte le particelle hanno massa = 0

??

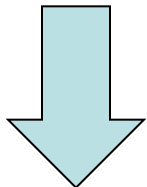


Questa simmetria non è più valida, non sappiamo perché.  
Le particelle supersimmetriche diventano pesantissime  
Le particelle che conosciamo noi rimangono invece con massa = 0

Ipotesi



Higgs



Il bosone di Higgs interagisce con le nostre particelle e le rende massive

Measured



Quindi abbiamo due gruppi di particelle:

Quelle che conosciamo, con masse basse (<200 GeV)

Le particelle supersimmetriche, con masse alte (~ 500-1000 GeV)

È vero?????

---

Backup

# Il campo di Higgs

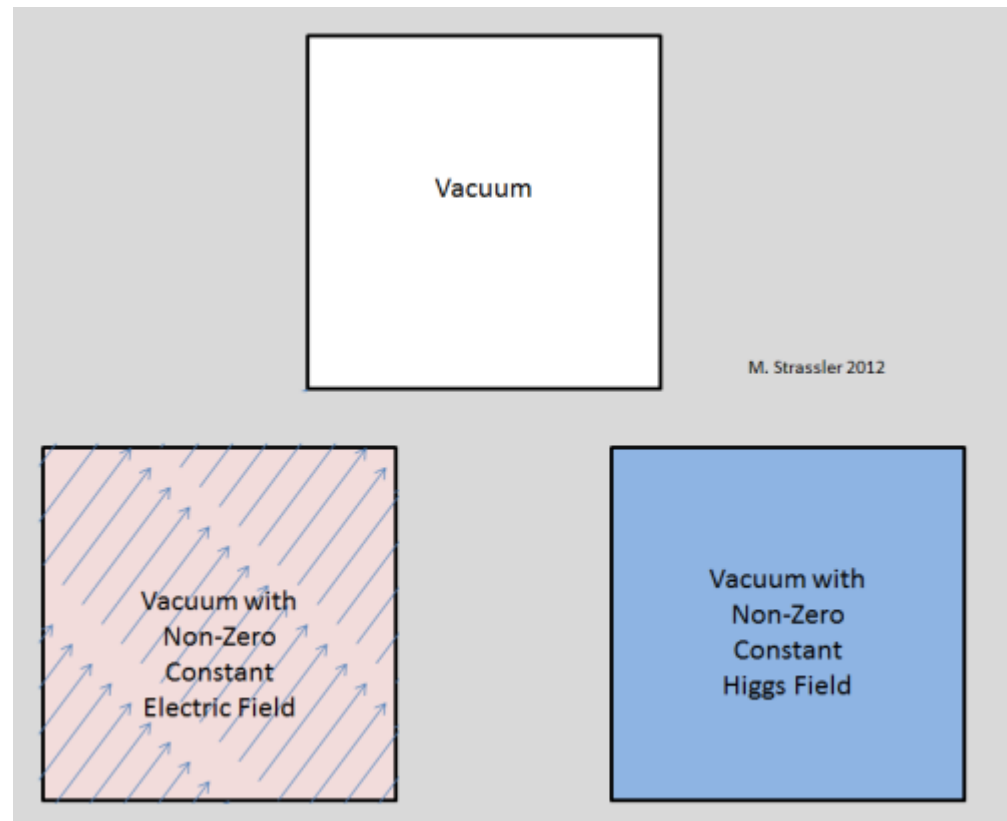
Il concetto di “campo” in fisica è comune, pensate ad un campo elettrico tra le facce di un condensatore. Importante: **il campo elettrico ha una direzione.**

Il campo di Higgs è analogo, ma è uno scalare, come la temperatura:

**Il campo di Higgs non ha una direzione.**

Così come il vuoto in un condensatore non è esattamente vuoto perché c'è il campo elettrico, così **lo spazio non è esattamente vuoto perché c'è il campo di Higgs.**

Il vuoto non è assolutamente vuoto!!



# Due problemi connessi

1) I quark ed i leptoni sono ripetuti 3 volte, ci sono 3 generazioni simili (ma non identiche)

Non si sa perché...

(ci *deve* essere un doppietto di quark per ogni doppietto di leptoni, se no la teoria non è "rinormalizzabile, i conti predicono delle probabilità = infinito)

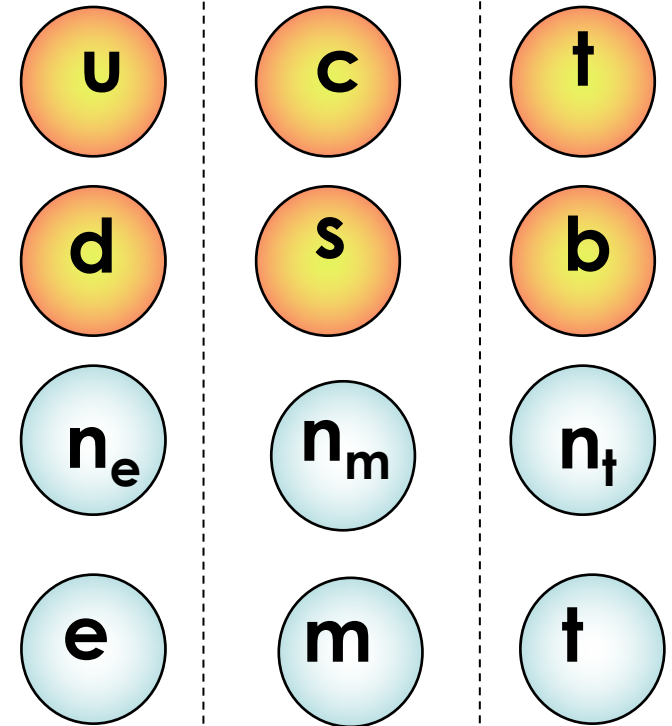
2) Tuttavia: 3 generazioni è il numero minimo per permettere una differenza tra materia ed anti-materia

Quindi:

Se ci fossero solo 2 generazioni non saremmo qui poiché tutta la materia ed anti-materia si sarebbero annichilate.

È la nostra esistenza una ragione sufficiente? Probabilmente no...

Dato che non sappiamo perché ci sono 3 generazioni, stiamo cercando la quarta



# La lista completa: 17 particelle “elementari”

1. Non si possono rompere
2. I bosoni hanno spin 0, 1..., i fermioni hanno spin  $\frac{1}{2}$
3. Materia o portatori di forza
4. I fermioni hanno un'antiparticella
5. Le forze sono scambiate attraverso un bosone

6 quarks (fermioni): up, down, strange, charm, top, bottom

6 leptoni (fermioni): elettrone, muone, tau, neutrino\_e, neutrino\_m, neutrino\_tau

4 trasmettitori di forza (bosoni): fotone, gluone, W, Z

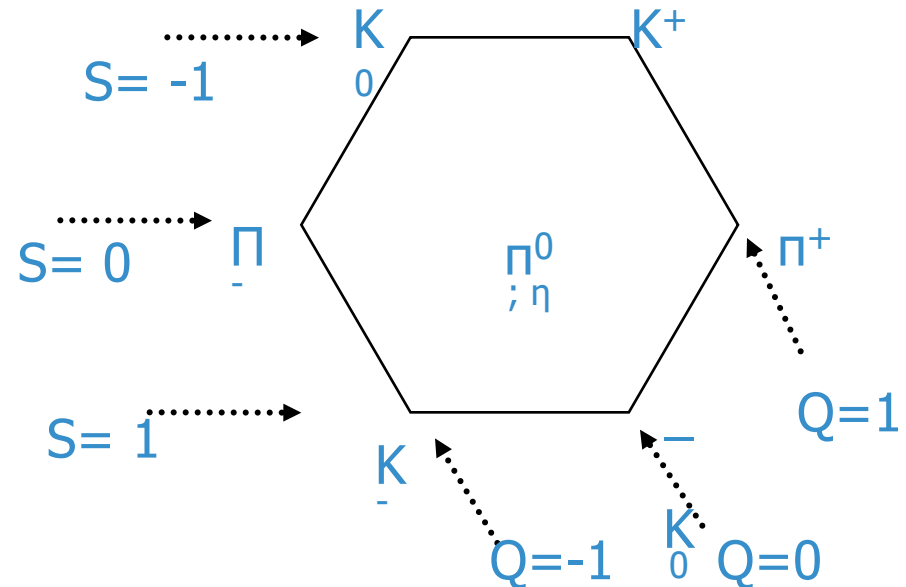
1 Higgs

# Simmetrie nella fisica delle particelle

Le particelle prodotte negli urti possono essere “catalogate” in famiglie:

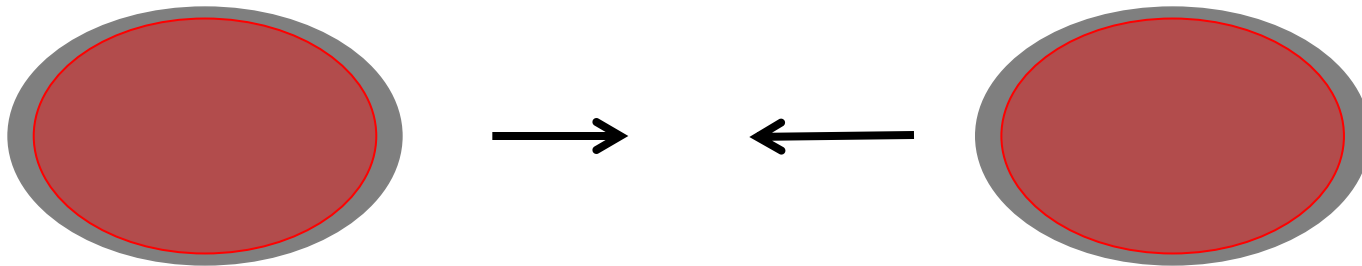
evidenza di sottostruttura!

Queste simmetrie sono state usate per predire particelle mancanti



# Cosa sappiamo della Dark matter?

Consider two colliding galaxies: each is made of visible matter and a halo of dark matter



After the collision the matter part has changed shape, while the anti-matter part is the same (Hubble, Chandra data)



Dark matter interacts very weakly even with itself



# Le forze ed i loro intermediari

---

Non esiste l'azione a distanza, le forze sono portate da dei messaggeri

Forza **elettromagnetica**:

magneti, atomi, chimica...

messaggero: **fotone**

carica: **elettrica (1 tipo)**

Forza **forte**:



tiene uniti i protoni, i neutroni ed il nucleo anche se di carica uguale

messaggero: **gluone**

carica: **colore (3 tipi)**

Forza **debole**:

radioattività, attività solare ...

messaggeri:  **$W^\pm$**  e la **Z**

carica: **debole**

---

# The Higgs mechanism

Let's look at the relationship between Energy, mass and momentum:

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

In the absence of a Higgs field, the energy is pure momentum:

$$E^2 = (p_1c)^2$$

Higgs mechanism



**In the presence of the Higgs field, the particles slow down and acquire mass:**

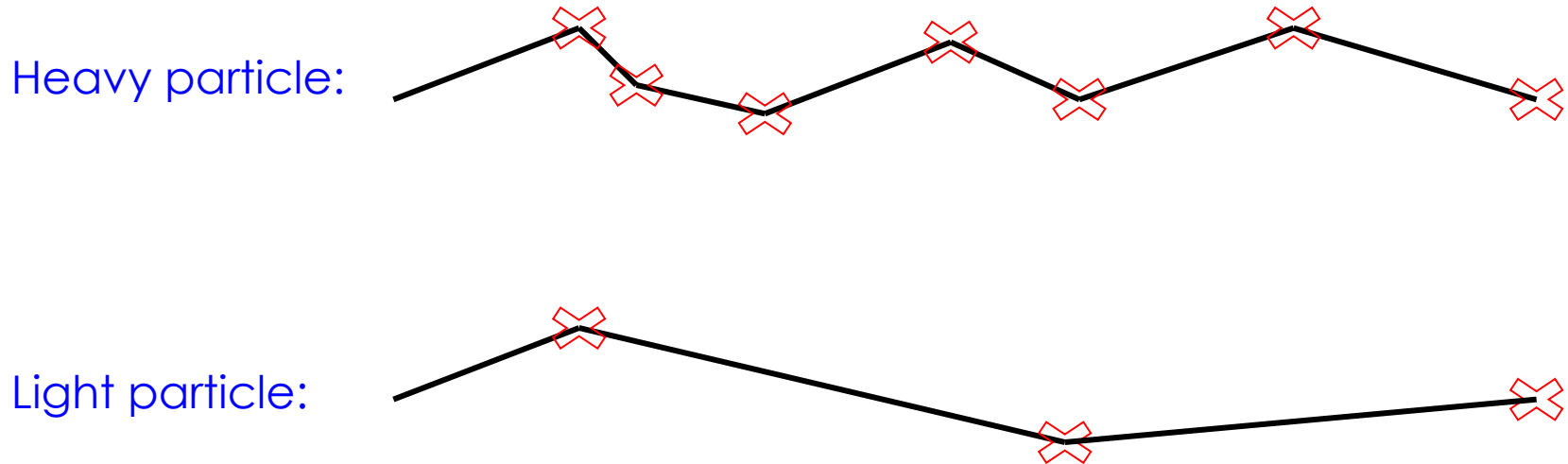
$$E^2 = (mc^2)^2 + (p_2c)^2$$

$$p_1 > p_2$$

---

# Why some particles are more massive?

Bumping against the Higgs field produces the mass

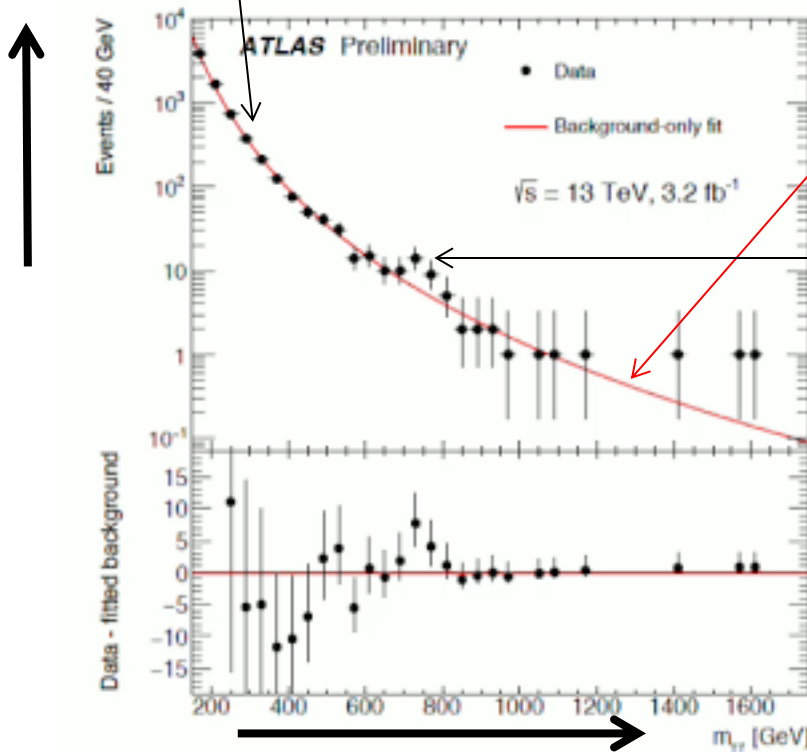


# È proprio vero che non abbiamo trovato niente?

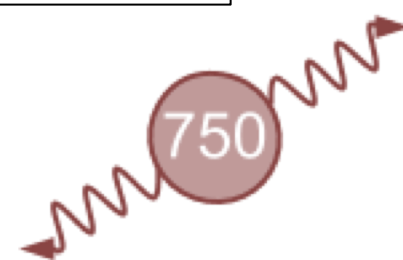
Punti neri: eventi misurati

Linea rossa: quello che sappiamo già

Numero di eventi misurati



Perché ci sono più eventi qui?



Magari una nuova particella????

Massa di due fotoni