



Storia di una Scoperta

Come trovare il bosone di Higgs in (~)poche e (~)semplici mosse

CERN MASTERCLASS

Linda Finco
University of Nebraska - Lincoln

9 luglio 2021

Problema: la complessità del mondo

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

Pensate alla stanza in cui siete ora: 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

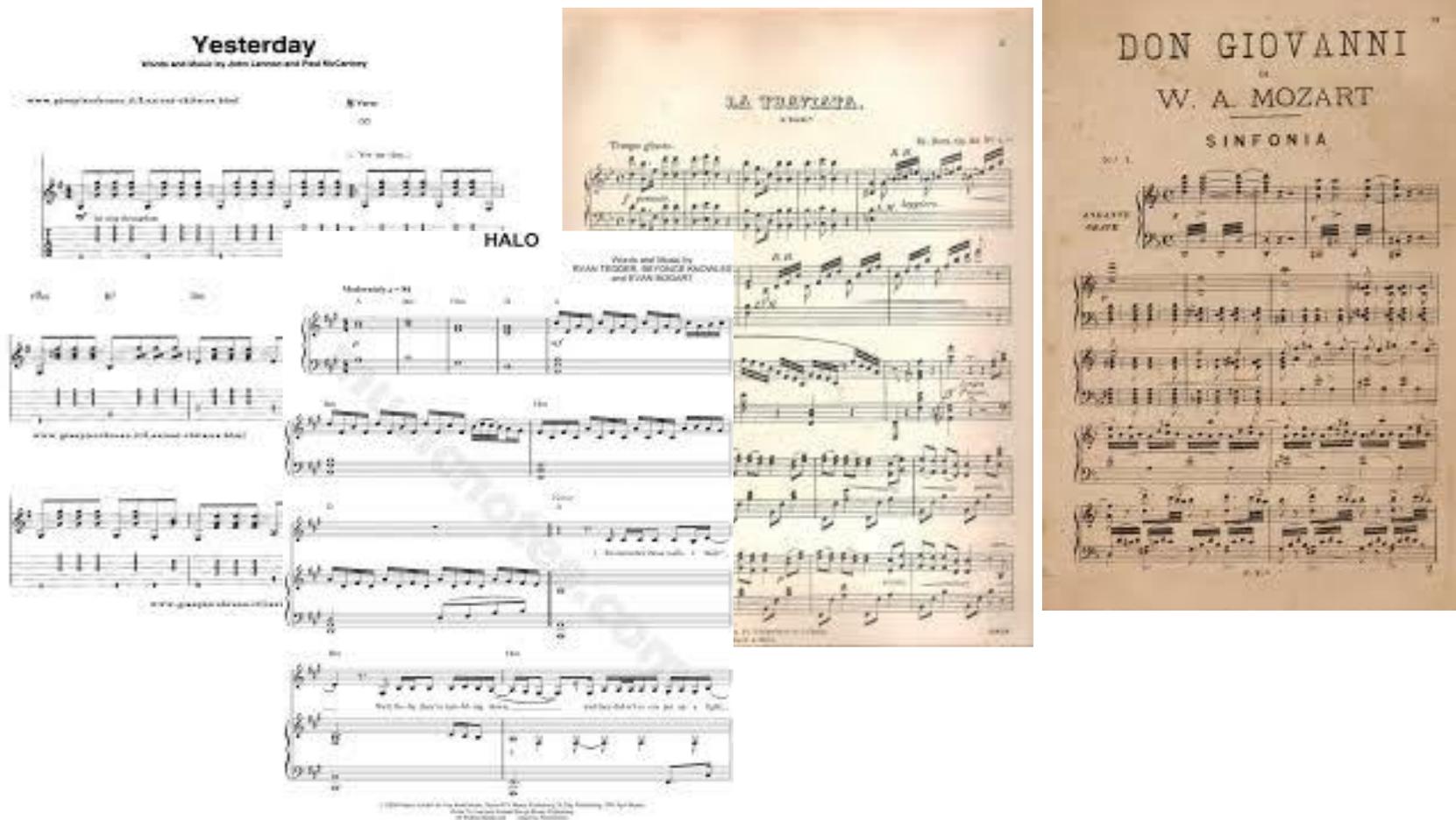


Immaginate di mangiare questi cibi, e di dover scoprire gli elementi di base

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

➡ cibi complessi sono fatti da **ingredienti semplici**

Riduzionismo in musica



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)
MINERALI:		
FERRO	8,0 mg (57)	2,4 mg (17)

(%NRV) = Valori nutritivi di riferimento

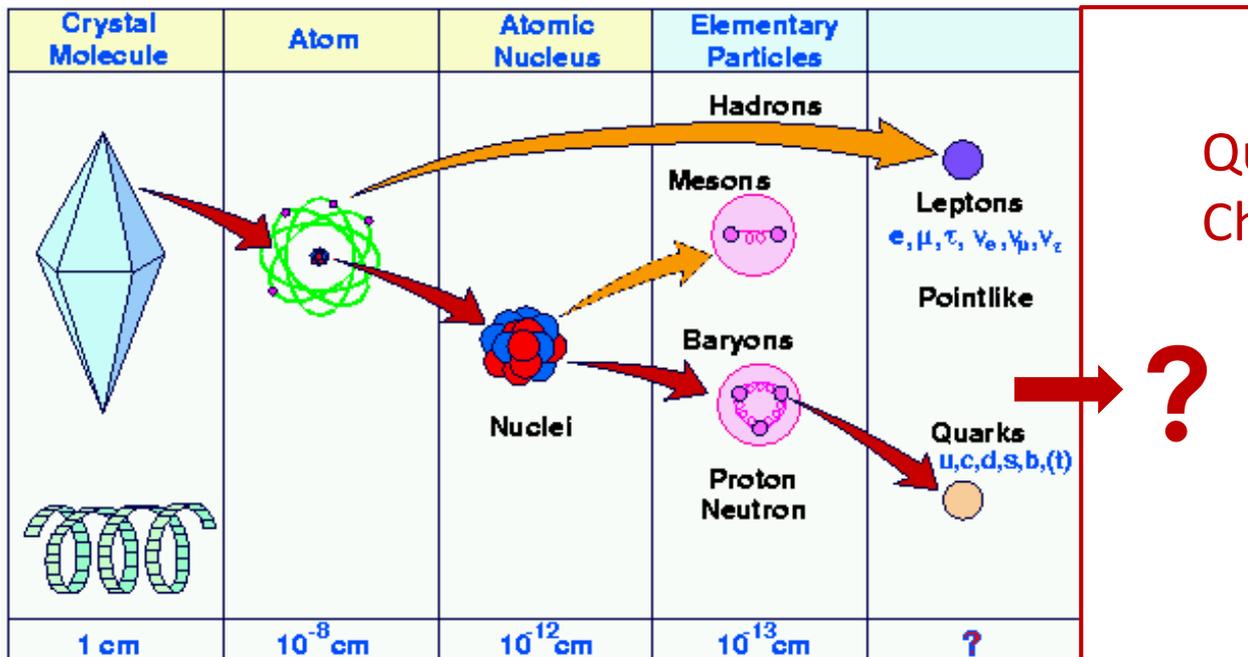
Immaginate tutto quello che ci circonda, e di domandarvi:
Di cosa è fatto? Perché?
Qual è il minor numero di componenti affinché funzioni?

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



Quale sarà prossimo livello?
Chi lo scoprirà?

?

Your picture here



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:

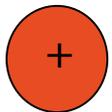
➡ particelle che oggi riteniamo puntiformi possono in realtà essere **composte**.



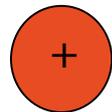
Materia e messaggeri

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

1. Particelle che formano la **materia** (**12**)
2. Particelle che trasmettono le **forze** (**3+1**)



Spostati, mi
manda uno della
tua stessa carica



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**

Forza **gravitazionale**:

Per ora non si ha una spiegazione a livello particellare, la gravità quantistica è ancora da scrivere

Le particelle elementari

Elementari:

queste particelle sono ritenute senza struttura interna (anche se non è esclusa)

Queste particelle si dicono “**materia**”, sono i costituenti della materia

Three generations of matter (fermions)

	I	II	III		
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0	? GeV/c ²
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
name	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs boson
	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	g gluon	
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson	

Notate la **simmetria!!!**

La forza di Higgs è diversa dalle altre...

Queste particelle si dicono “**messaggeri**”, sono quelli che trasmettono le forze

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.

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): $\rho, K, \omega, r, \gamma$

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 ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-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 ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

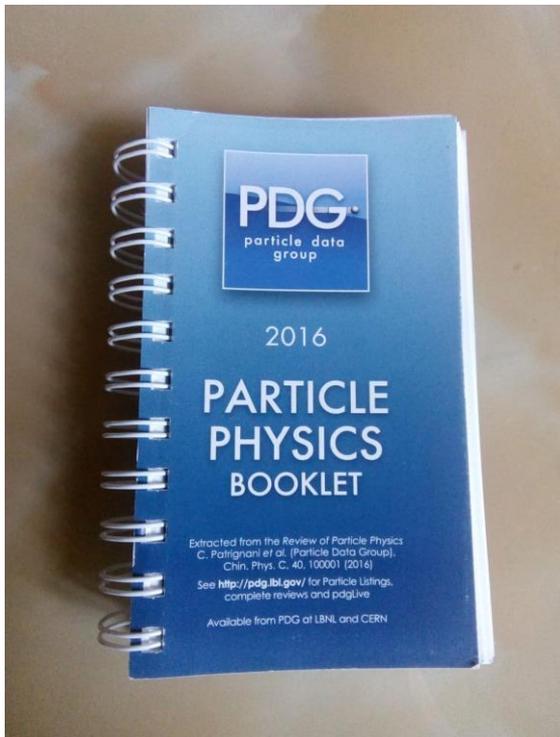
Un libro pieno di particelle

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

Non lo si fa!!

**If I was able to
remember half of the
names of all elementary
particles, I would have
become a botanist**

~ Enrico Fermi ~



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 (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level	ρ (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 ^{+0.11} _{-0.13}) %	S=1.2	366
neutrals (excluding $\pi^0\gamma$)	(8 ⁺⁸ ₋₅) × 10 ⁻³	S=1.1	–
$\eta\gamma$	(4.6 ± 0.4) × 10 ⁻⁴	S=1.1	200
$\pi^0 e^+ e^-$	(7.7 ± 0.6) × 10 ⁻⁴		380
$\pi^0 \mu^+ \mu^-$	(1.3 ± 0.4) × 10 ⁻⁴	S=2.1	349
$e^+ e^-$	(7.28 ± 0.14) × 10 ⁻⁵	S=1.3	391
$\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$	< 2 × 10 ⁻⁴	CL=90%	262
$\pi^+\pi^-\gamma$	< 3.6 × 10 ⁻³	CL=95%	366
$\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$	< 1 × 10 ⁻³	CL=90%	256
$\pi^0\pi^0\gamma$	(6.6 ± 1.1) × 10 ⁻⁵		367
$\eta\pi^0\gamma$	< 3.3 × 10 ⁻⁵	CL=90%	162
$\mu^+\mu^-$	(9.0 ± 3.1) × 10 ⁻⁵		377
3γ	< 1.9 × 10 ⁻⁴	CL=95%	391
Charge conjugation (C) violating modes			
$\eta\pi^0$	C < 2.1 × 10 ⁻⁴	CL=90%	162
$2\pi^0$	C < 2.1 × 10 ⁻⁴	CL=90%	367
$3\pi^0$	C < 2.3 × 10 ⁻⁴	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 (Γ_i/Γ)	Confidence level	ρ (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 ⁻³		430
$\mu^+\mu^-\gamma$	(1.08 ± 0.27) × 10 ⁻⁴		467
$\pi^+\pi^-\mu^+\mu^-$	< 2.9 × 10 ⁻⁵	90%	401
$\pi^+\pi^-\pi^0$	(3.8 ± 0.4) × 10 ⁻³		428
$\pi^0\rho^0$	< 4 %	90%	111
$2(\pi^+\pi^-)$	< 2.4 × 10 ⁻⁴	90%	372

$f_0(500)$ or σ [g]
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 (Γ_i/Γ)	ρ (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 (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level	ρ (MeV/c)
$\pi\pi$	~ 100 %		363

$\rho(770)^\pm$ decays

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

$\rho(770)^0$ decays

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

Lo spin delle particelle

Le particelle ruotano su se stesse.

Questa proprietà si chiama **spin**.

Se lo **spin** è

- $\frac{1}{2}, 3/2, 5/2$ si chiamano **fermioni**
- $0, 1, 2, \dots$ si chiamano **bosoni**



Nelle particelle elementari:

I **portatori di forze**, che sono bosoni, hanno spin 1, e girano più in fretta delle **particelle di materia**, fermioni, che hanno spin $\frac{1}{2}$

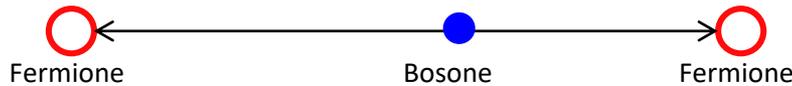
Questo fatto, apparentemente secondario, ha delle **conseguenze importantissime** sul comportamento delle particelle

Lo spin: i bosoni ed i fermioni

Le particelle elementari di materia hanno tutte spin $\frac{1}{2}$: **FERMIONI**

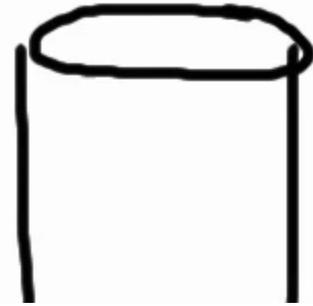
I messaggeri elementari delle forze (tranne 1, forse..) hanno tutti spin intero (1): **BOSONI**

I fermioni interagiscono tra di loro scambiandosi bosoni



Le particelle bosoniche possono stare tutte nello 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..



Le macchine non sono bosoniche...

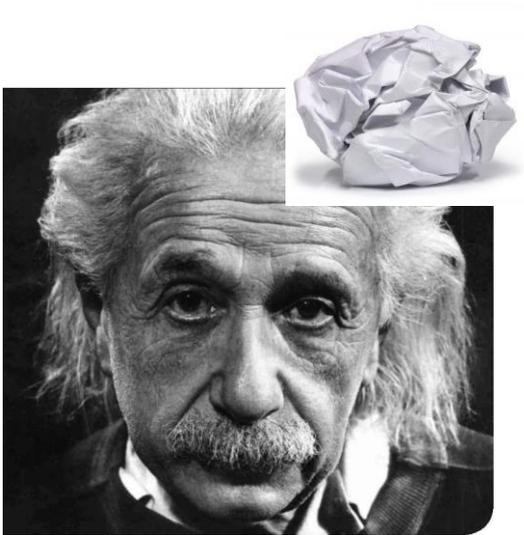


Esempio pratico: compito in classe di fisica

Foglietto con la soluzione

Mediatore

Bosone, spin = 1



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

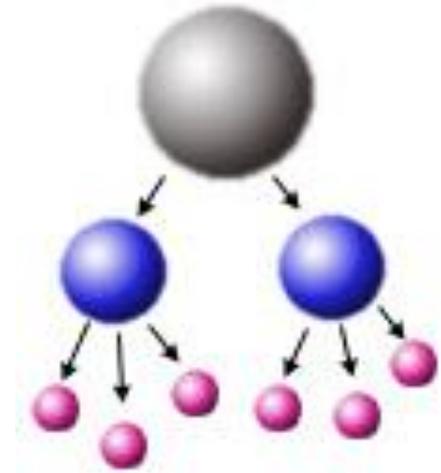
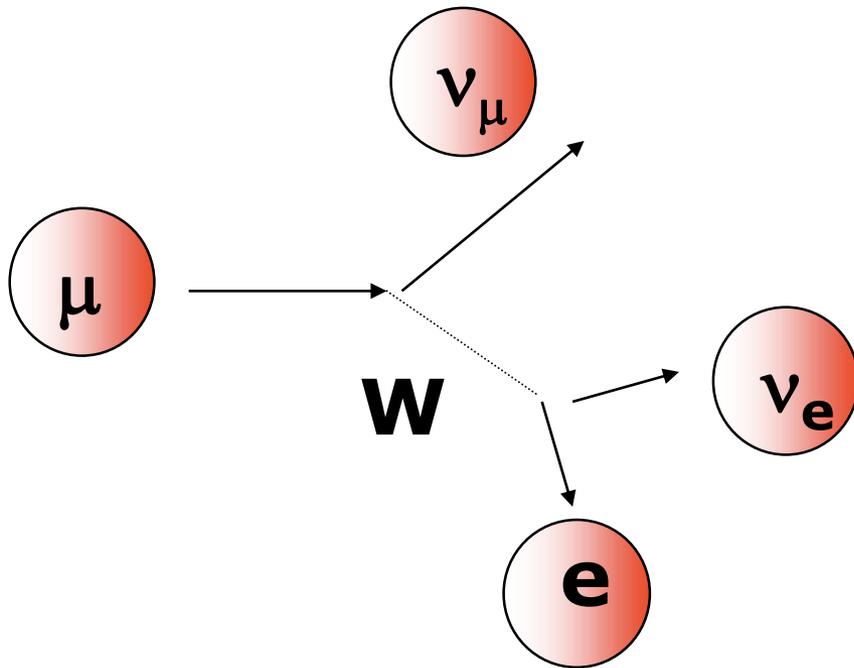


Studente meno bravo
(particella di materia)
Fermione, spin = 1/2

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



Ulteriori decadimenti non sono possibili!

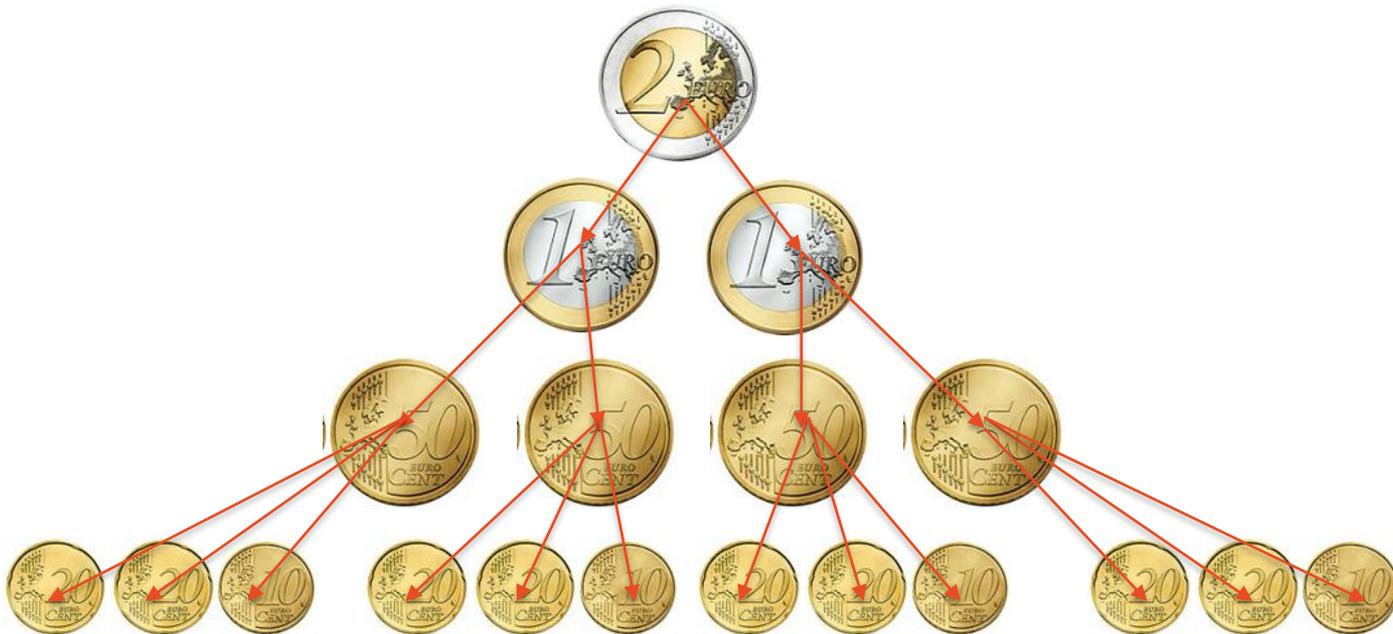
Ma cosa vuol dire “decadono”?

Molte delle proprietà della particella madre vengono trasmesse alle particelle figlie:

➔ Conservazione della energia totale, carica....

Alcune proprietà non sono conservate:

➔ Non conservazione della massa, etc..

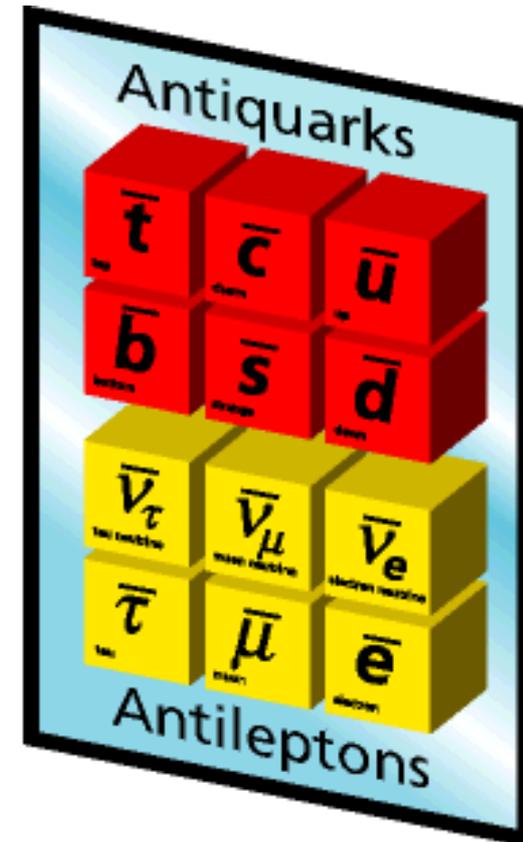
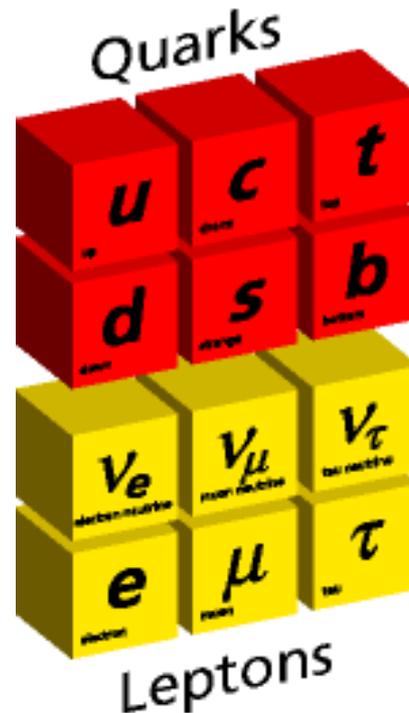


Conservazione del valore, non conservazione del peso

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 quanta 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....



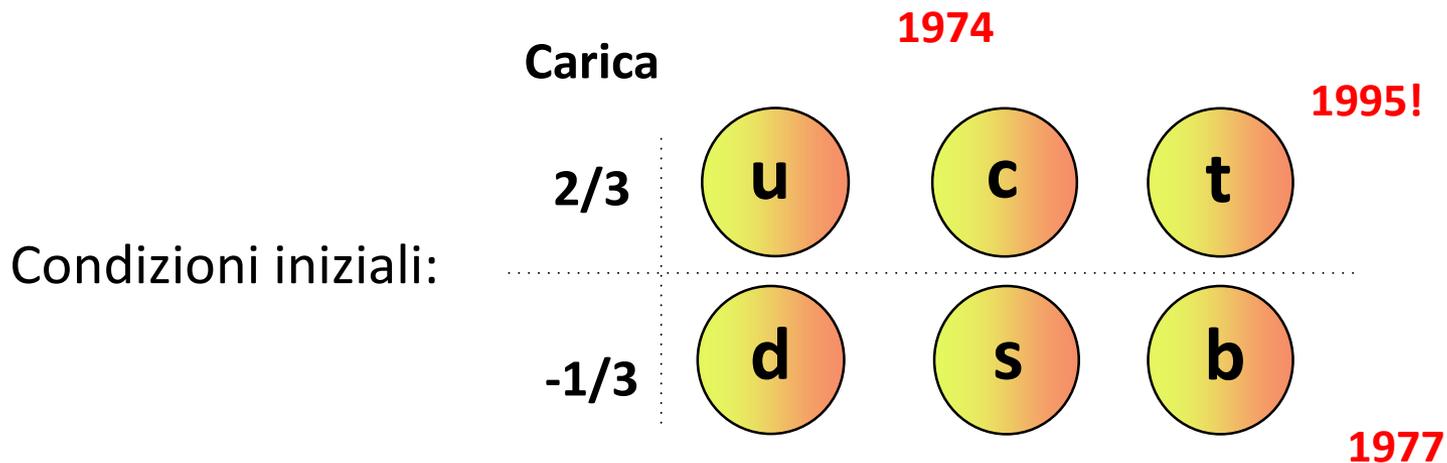
Ci sono anche altri modi di produrre antimateria....

Simmetrie in fisica delle particelle

Le simmetrie sono

Una guida nella ricerca di nuove scoperte

La scoperta dei quark è un esempio:



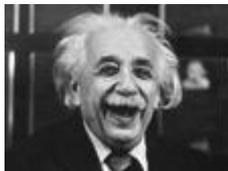
Simmetrie Nascoste

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.

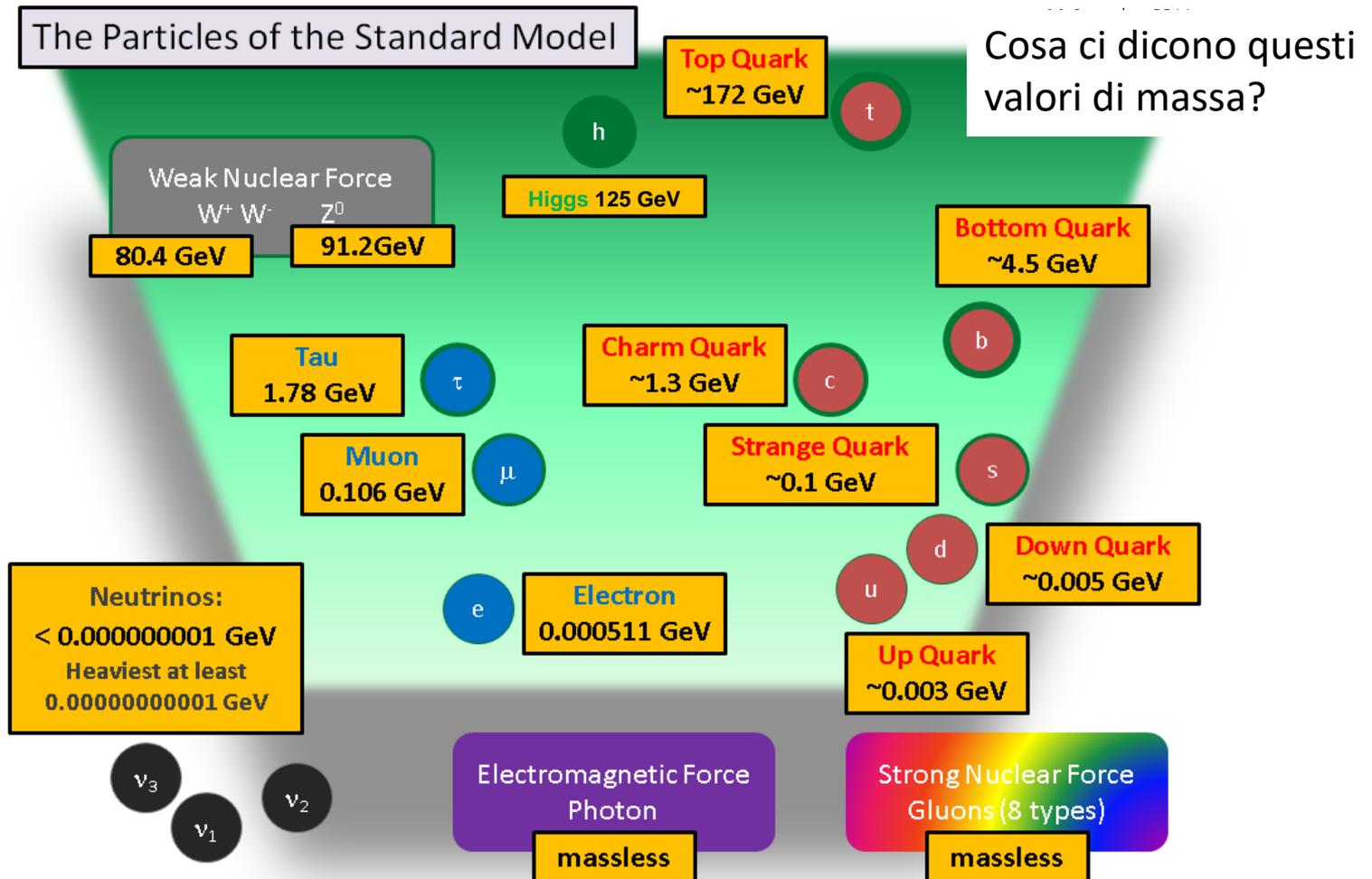
Si dice allora che la simmetria è nascosta (o rotta) dalla gravità. La simmetria esiste, ma non si vede più

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



La massa delle particelle elementari

Qual è la simmetria tra le masse delle particelle elementari?

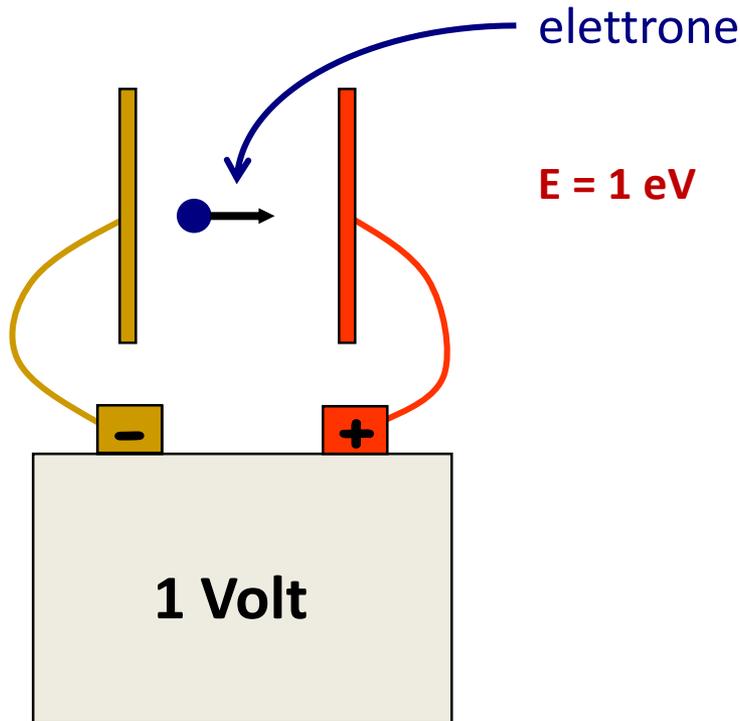


Intermezzo: unità di misura dell'energia

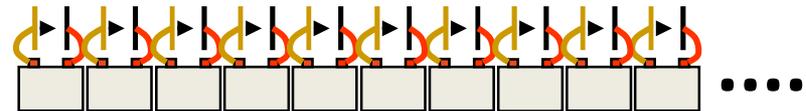
I fisici usano il **GeV** - **Giga Electron Volt** = 10^9 eV = 1000000000 eV

$m(\text{protone}) = 0.938 \text{ GeV} \longrightarrow 1.67262158(31) \times 10^{-27} \text{ Kg}$

$m(\text{elettrone}) = 0.0005 \text{ GeV} \longrightarrow 9.109 \times 10^{-31} \text{ Kg} = (1/2000 m(p))$



Per dare ad un elettrone l'energia di **1 GeV**, dovremmo mettere di seguito **666,666,666 pile** da 1.5 Volt!!



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 ^{1, 2)}: 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 ³⁾ 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 ⁴⁾, 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 ⁴⁾, 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**.

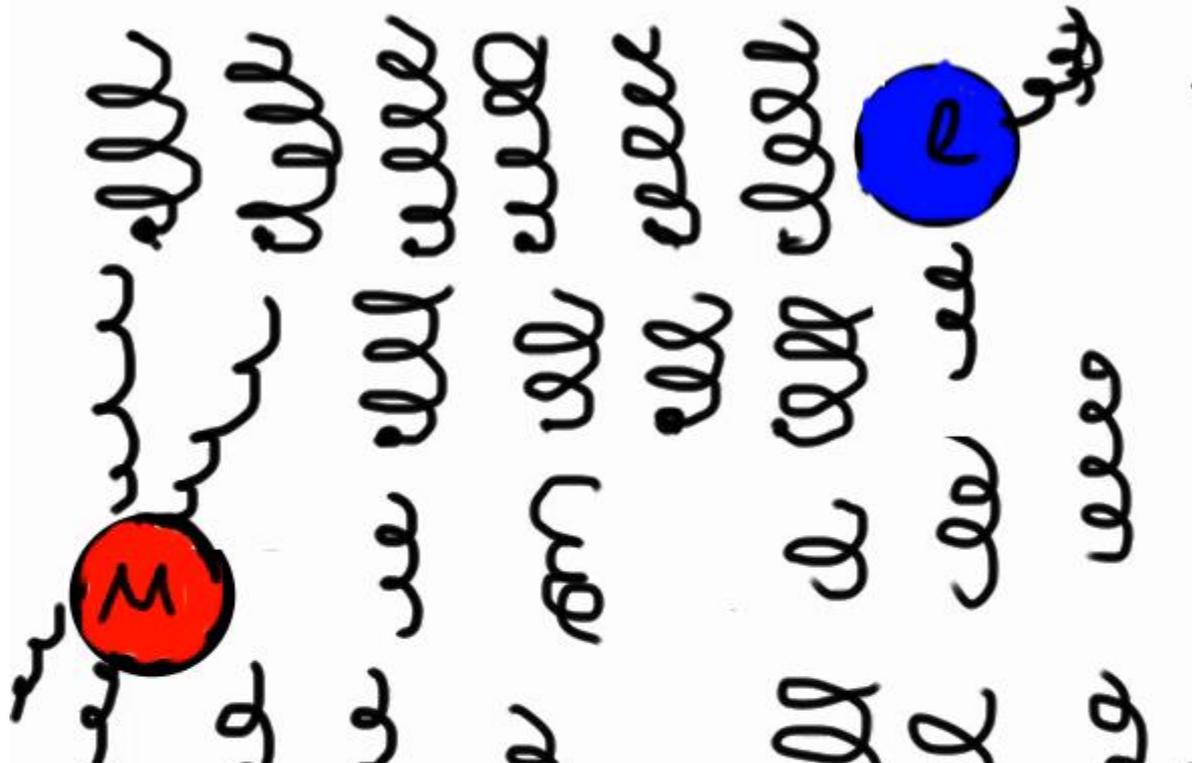


La massa dei leptoni e quark

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.



Il campo di Higgs

Possiamo pensare alla particella di Higgs, il messaggero del campo di Higgs, come un fiocco di neve



Possiamo pensare al “vuoto” come un mezzo denso che offre una “resistenza” ad una forza e quindi è equivalente ad una massa:

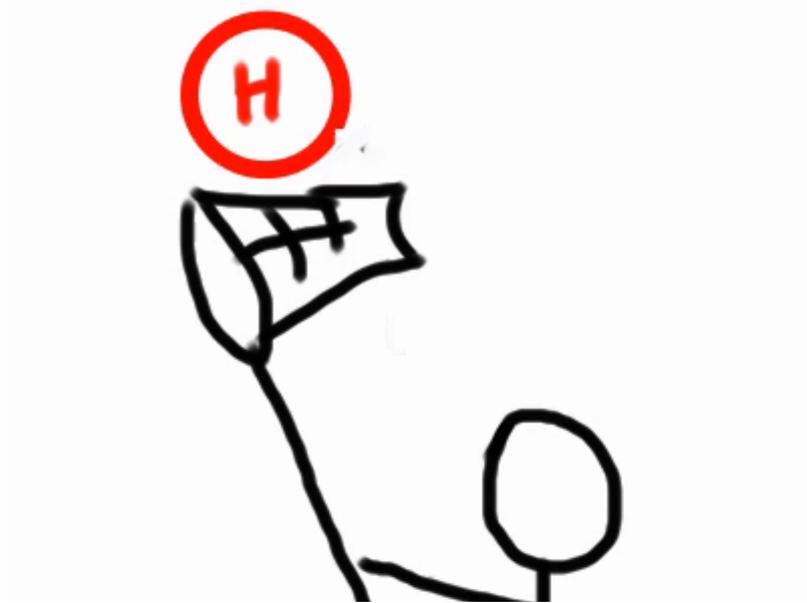


quark top



elettrone

Caccia al bosone di Higgs



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

Caccia al bosone di Higgs, e non solo...

Vogliamo dunque:

- Scoprire se esiste il **bosone di Higgs**
- Cercare il meccanismo responsabile dell'**origine delle masse**
- Cercare **nuova fisica/nuove particelle**
- Verificare altre e **nuove teorie**

Per dare una risposta a queste domande, al **CERN** è stato costruito l'acceleratore chiamato **LHC (Large Hadron Collider)**, entrato in funzione alla fine del 2009.



Gli acceleratori di particelle

Acceleriamo particelle portandole ad altissime energie per poi farle scontrare:

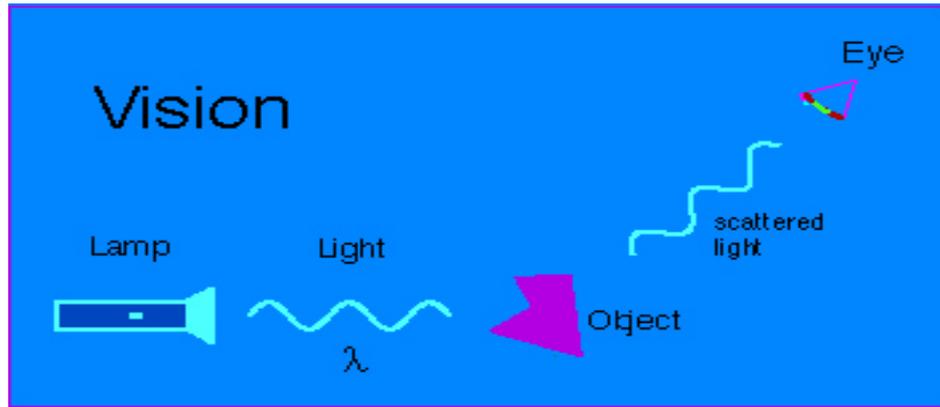
- per studiare cosa succede durante l'interazione
- per produrre nuove particelle grazie a $E=mc^2$

$$E=mc^2$$



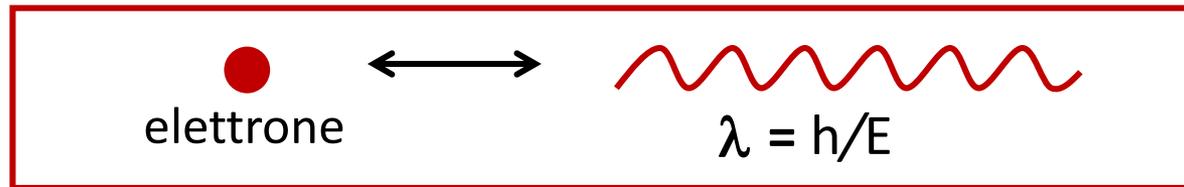
Studiando le particelle prodotte (quante sono, quali sono, le loro caratteristiche etc.) possiamo capire cosa è successo al momento dell'urto e risalire ai processi fondamentali che regolano la natura

Perché accelerare le particelle?



L'occhio umano può vedere fino a dimensioni di $\sim 10^{-2}$ cm

La meccanica quantistica ci dice che le **particelle** si comportano come un'**onda** e viceversa.



Tanto più la **lunghezza d'onda** è **piccola**, ovvero tanto più l'**energia** è **grande**, tanto più **piccole** sono le **dimensioni** che possiamo esplorare/vedere

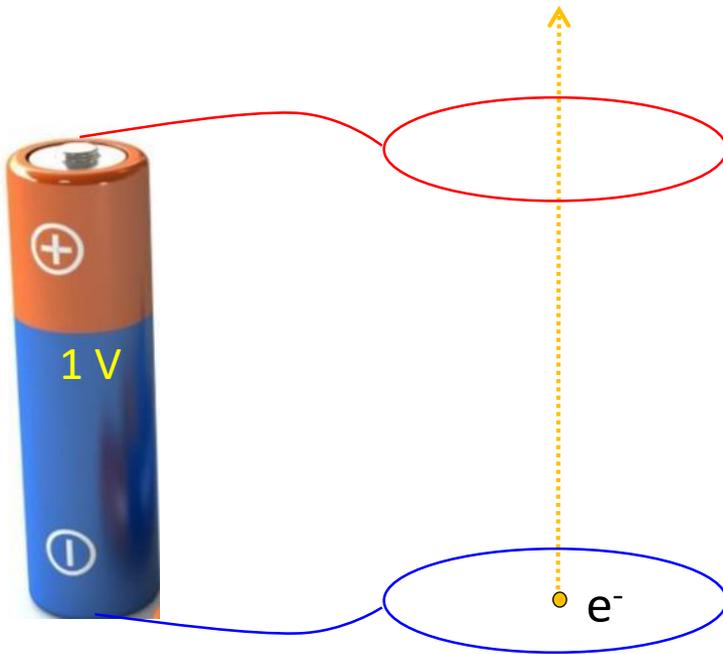
I microscopi elettronici possono esplorare regioni di $\sim 10^{-6}$ cm (cellule/DNA)

Per andare oltre (10^{-13} - 10^{-15} cm) dobbiamo accelerare le particelle.

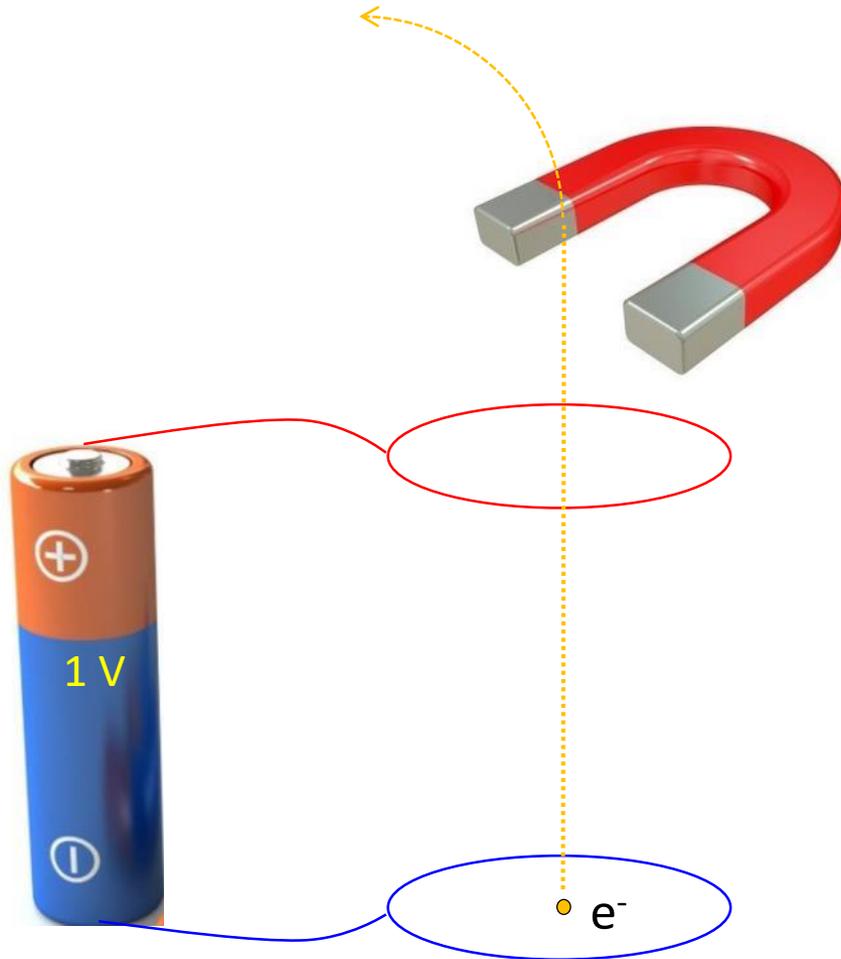
Come accelerare le particelle?

Una **particella carica** si **muove** a causa dell'effetto del **campo elettrico**

Aumentando il voltaggio della pila, la velocità della particella aumenta conseguentemente. La **particella è accelerata**



Come accelerare le particelle?



Una **particella carica** si **muove** a causa dell'effetto del **campo elettrico**

Aumentando il voltaggio della pila, la velocità della particella aumenta conseguentemente. La **particella è accelerata**

Se aggiungiamo un **campo magnetico** prodotto da un magnete la **traiettoria viene curvata**.

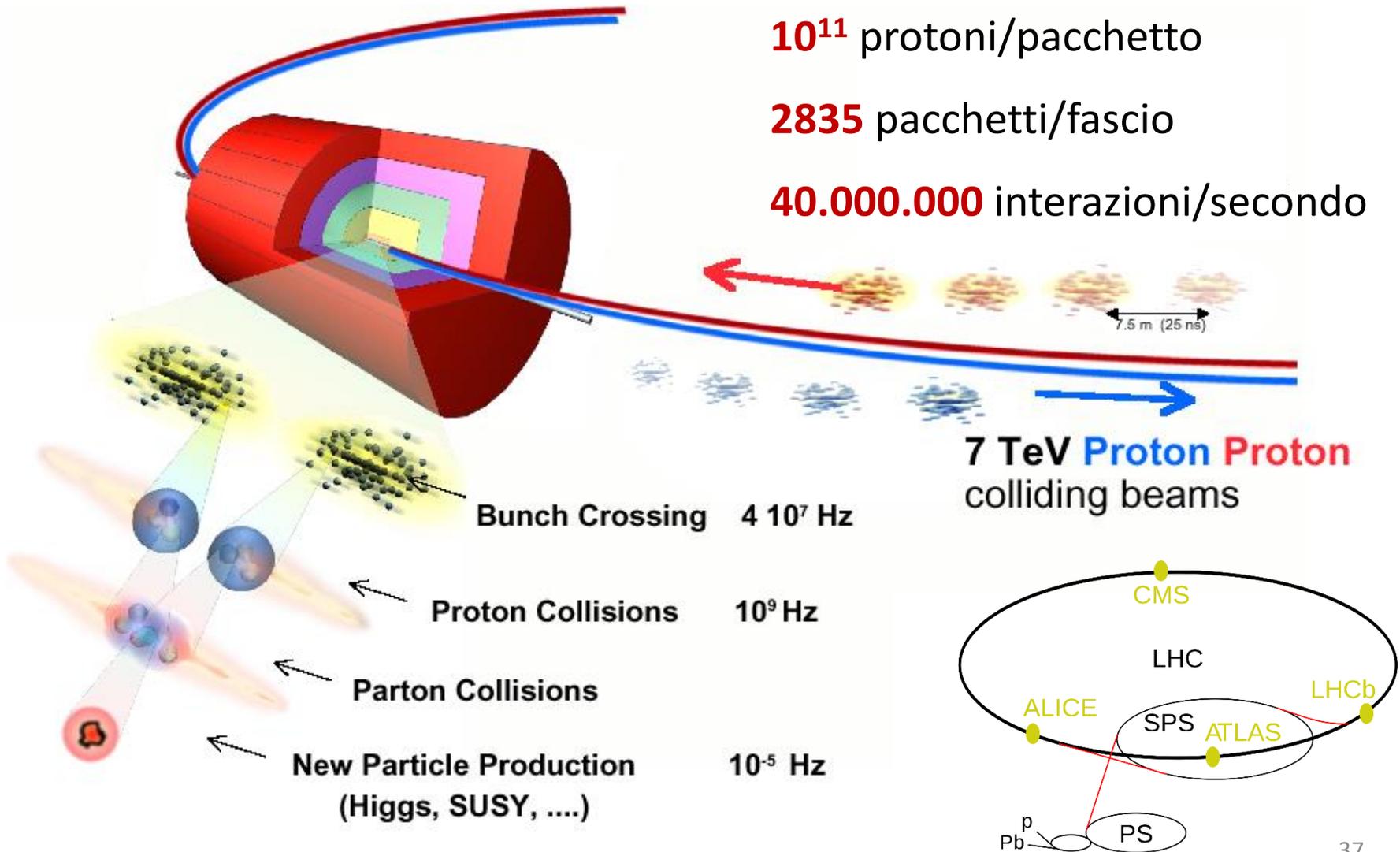
Le collisioni protone-protone a LHC

7 TeV energia del fascio

10^{11} protoni/pacchetto

2835 pacchetti/fascio

40.000.000 interazioni/secondo



L'esperimento CMS

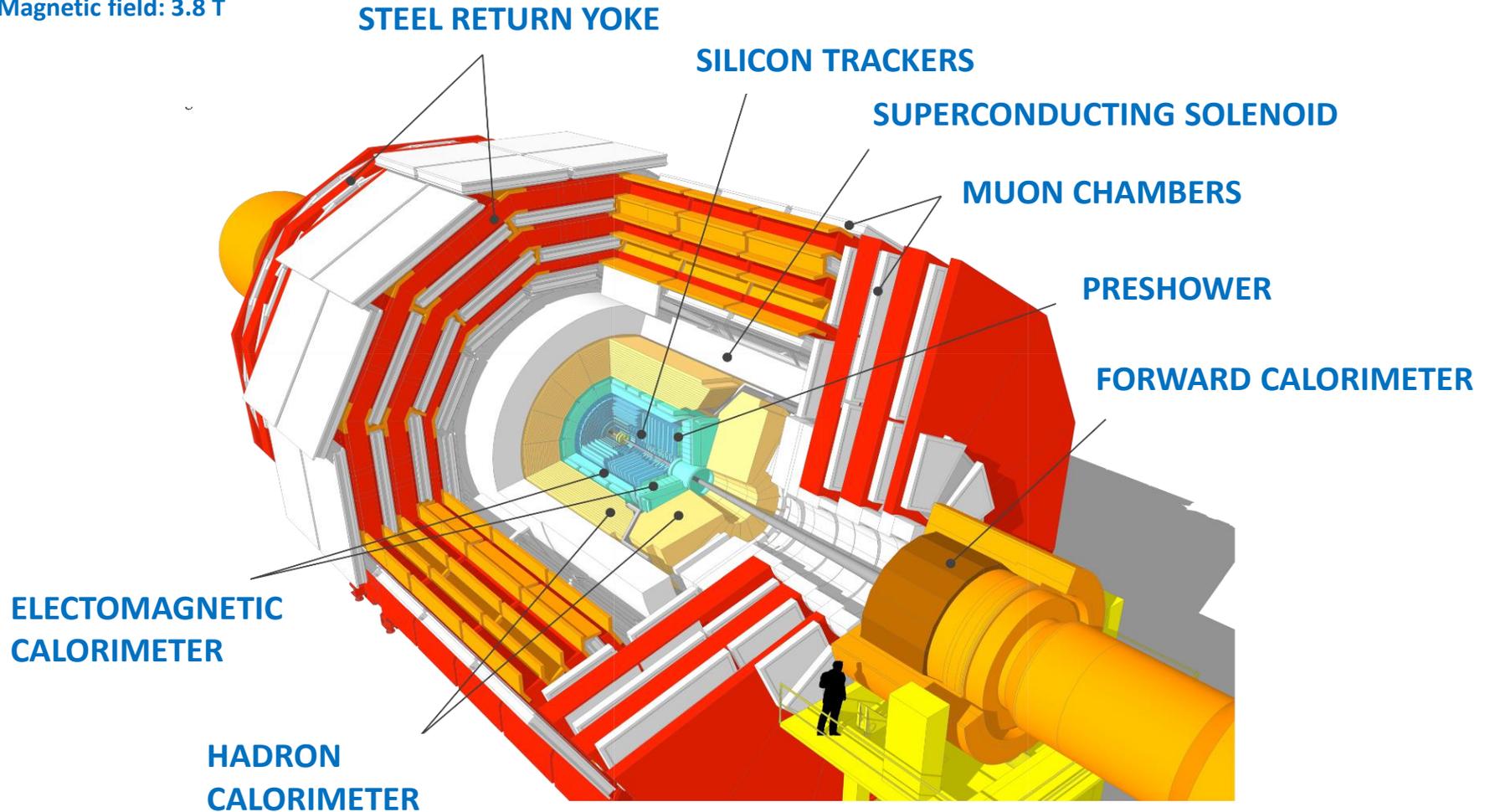
CMS DETECTOR

Total weight: 14000 tonnes

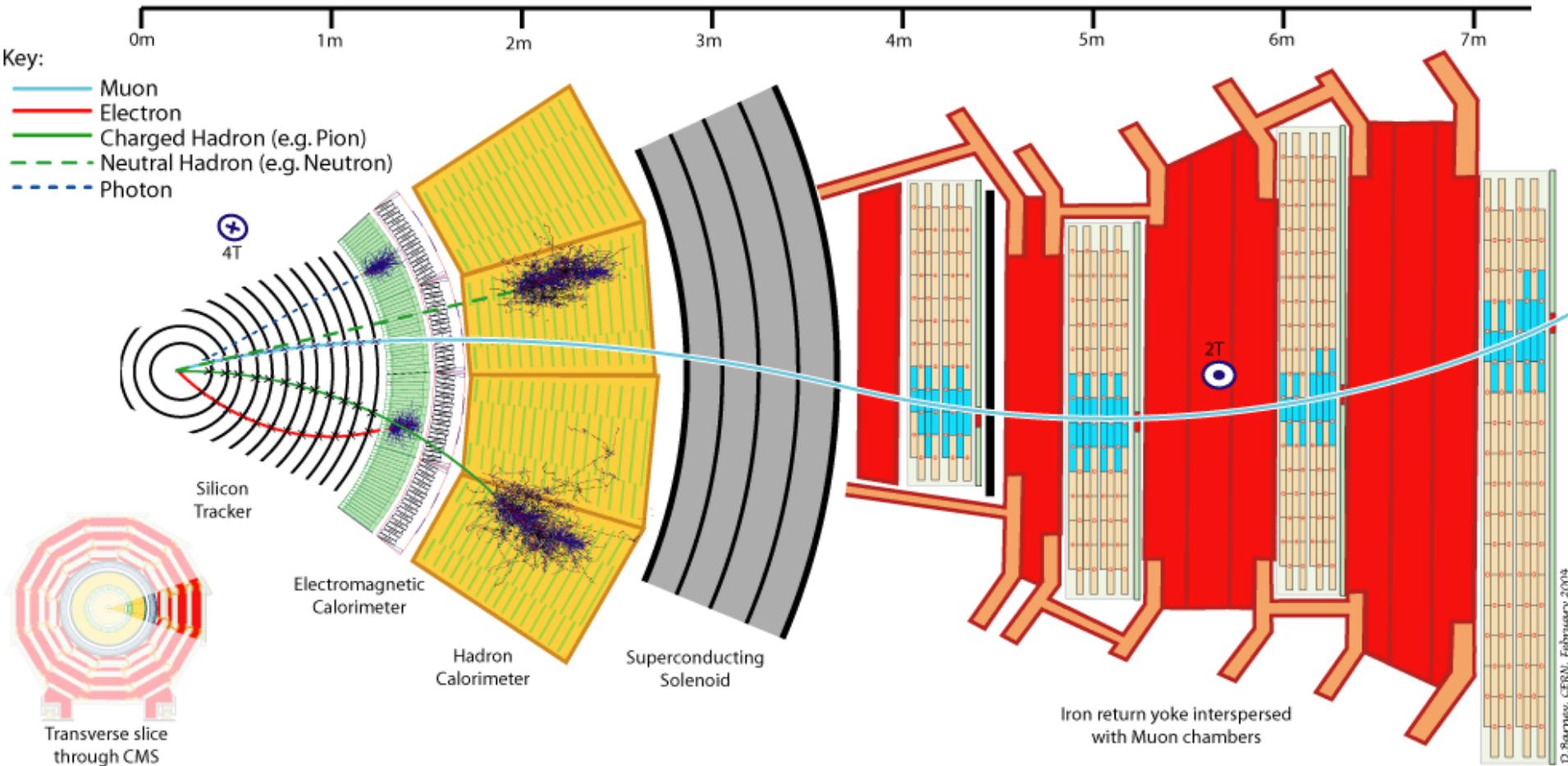
Overall diameter: 15.0 m

Overall length: 28.7 m

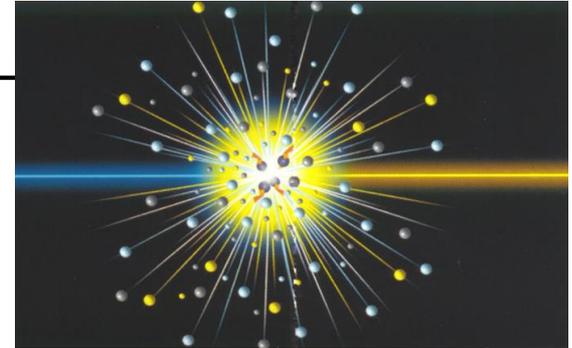
Magnetic field: 3.8 T



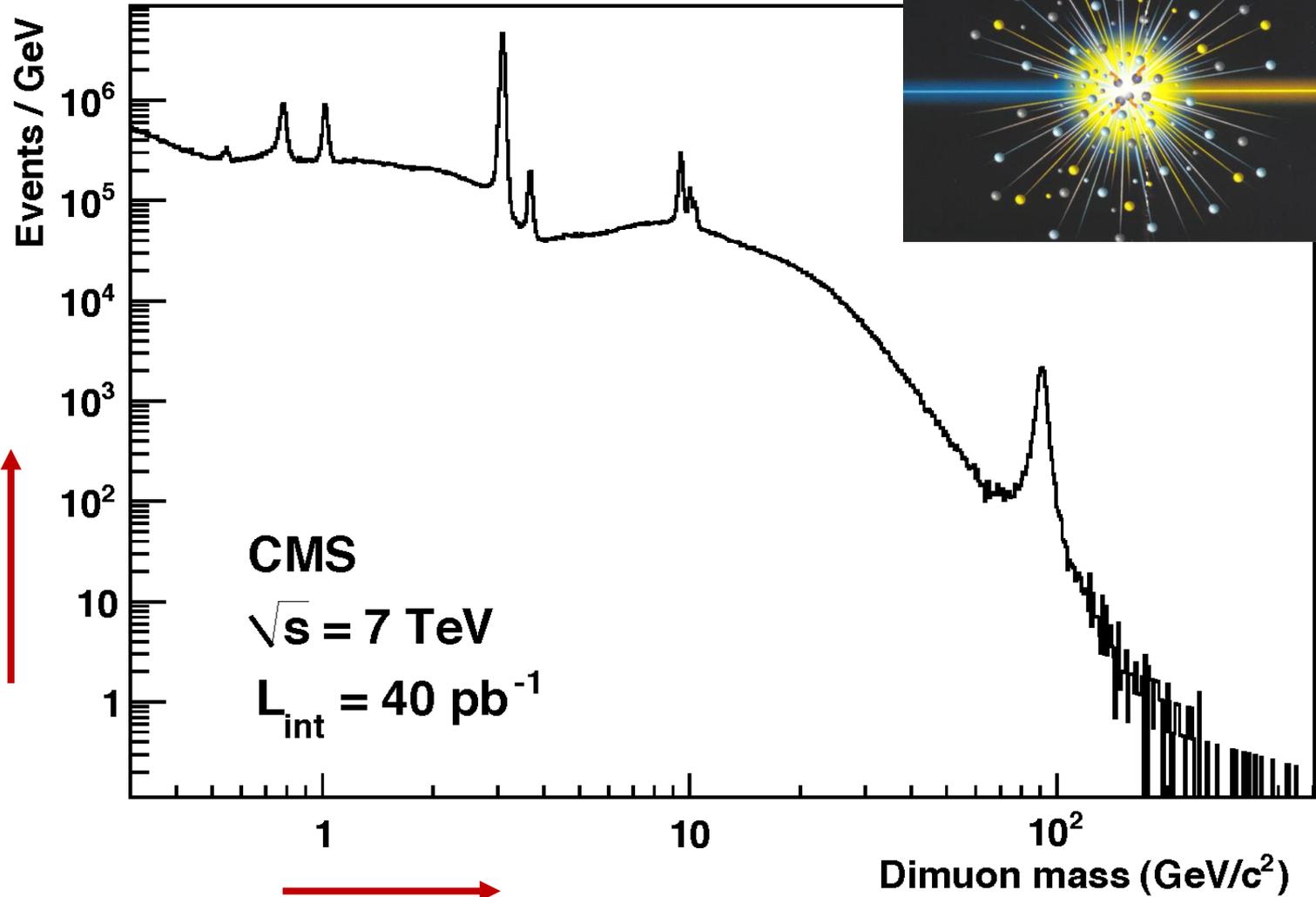
Come "vediamo" le particelle?



La sezione d'urto

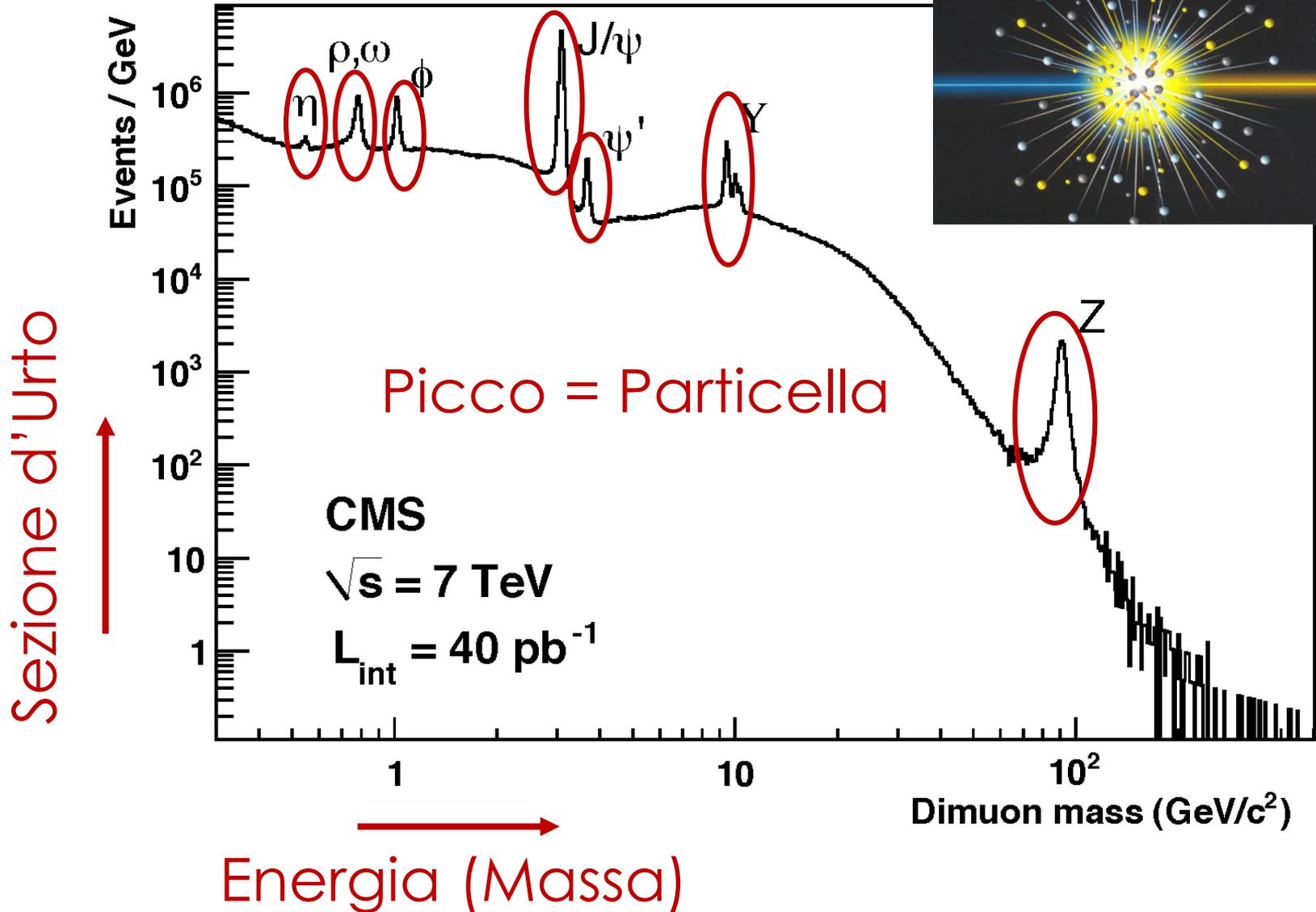
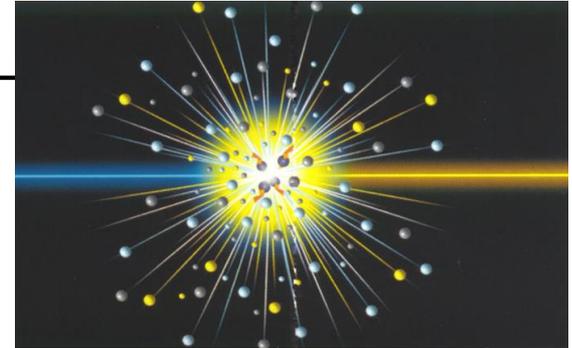


Sezione d'Urto

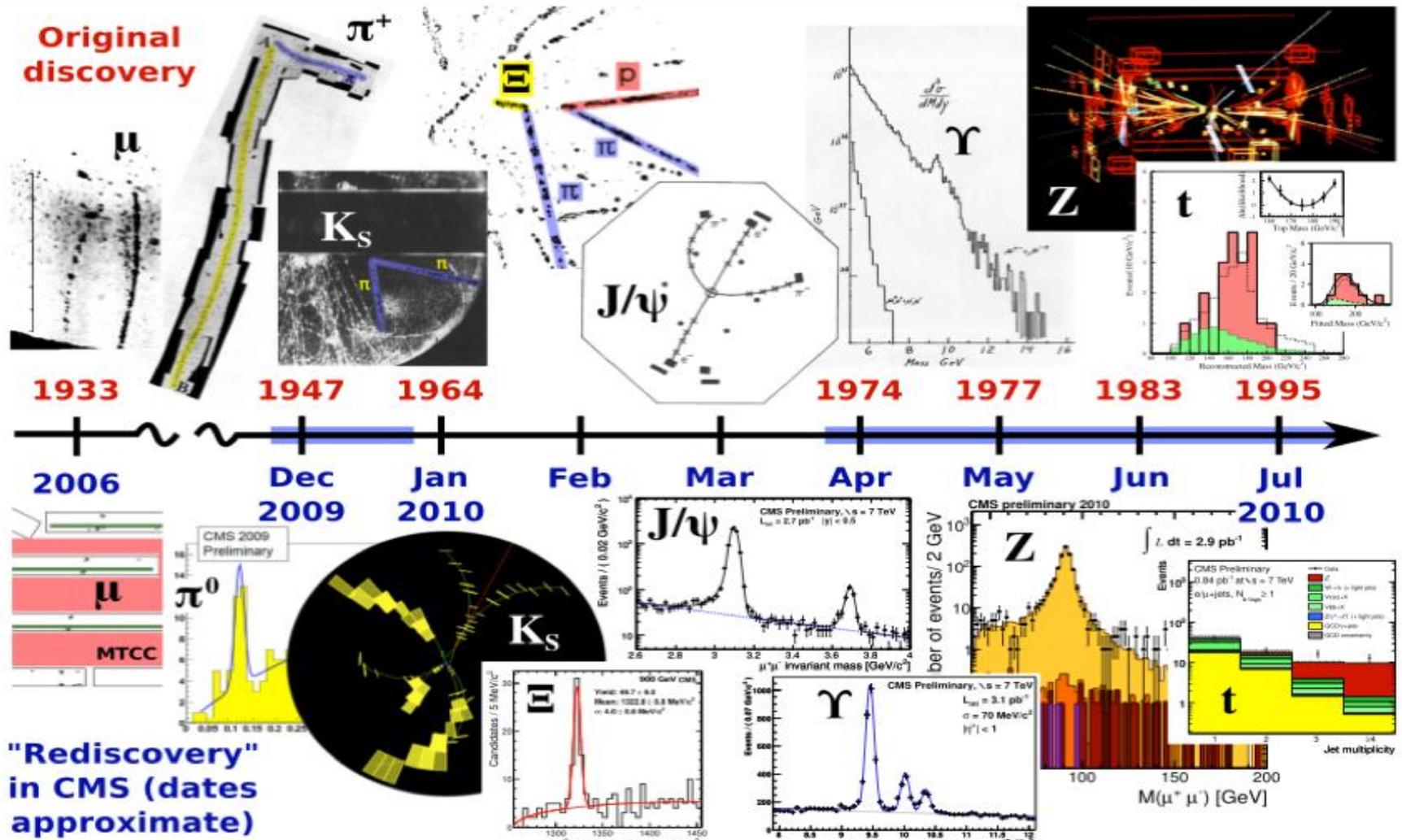


Energia (Massa)

La sezione d'urto



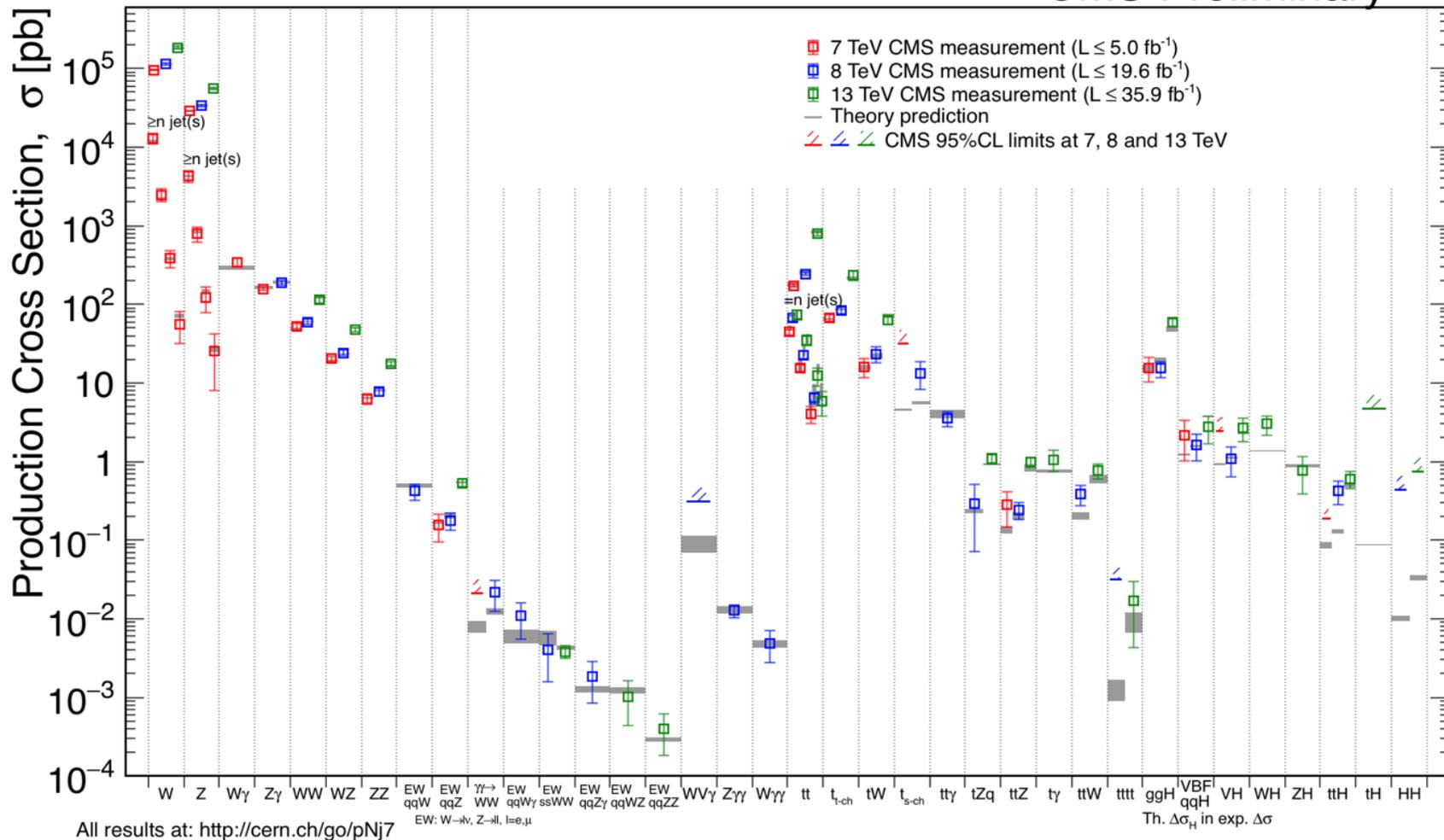
La riscoperta del Modello Standard



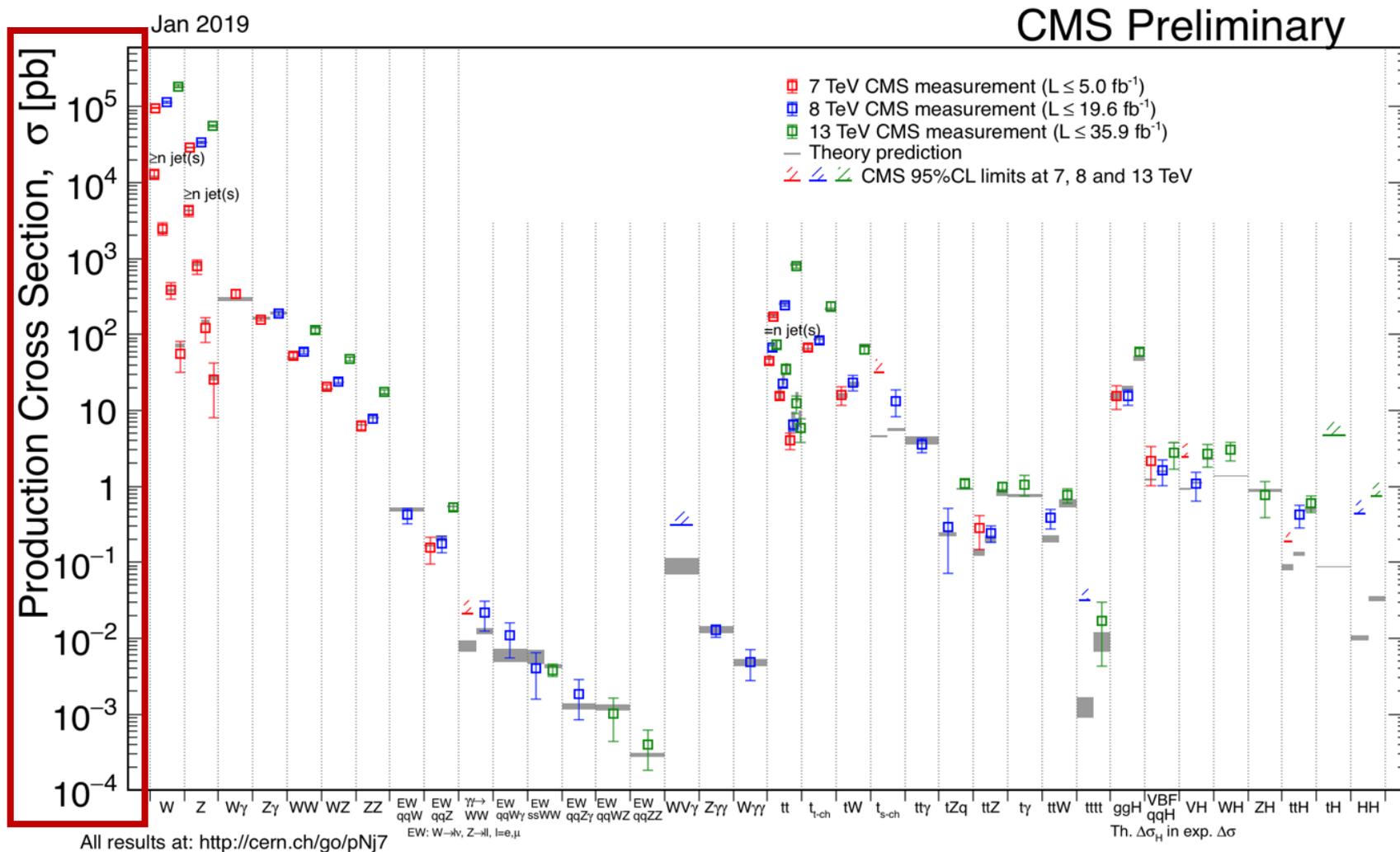
Misure di precisione

Jan 2019

CMS Preliminary

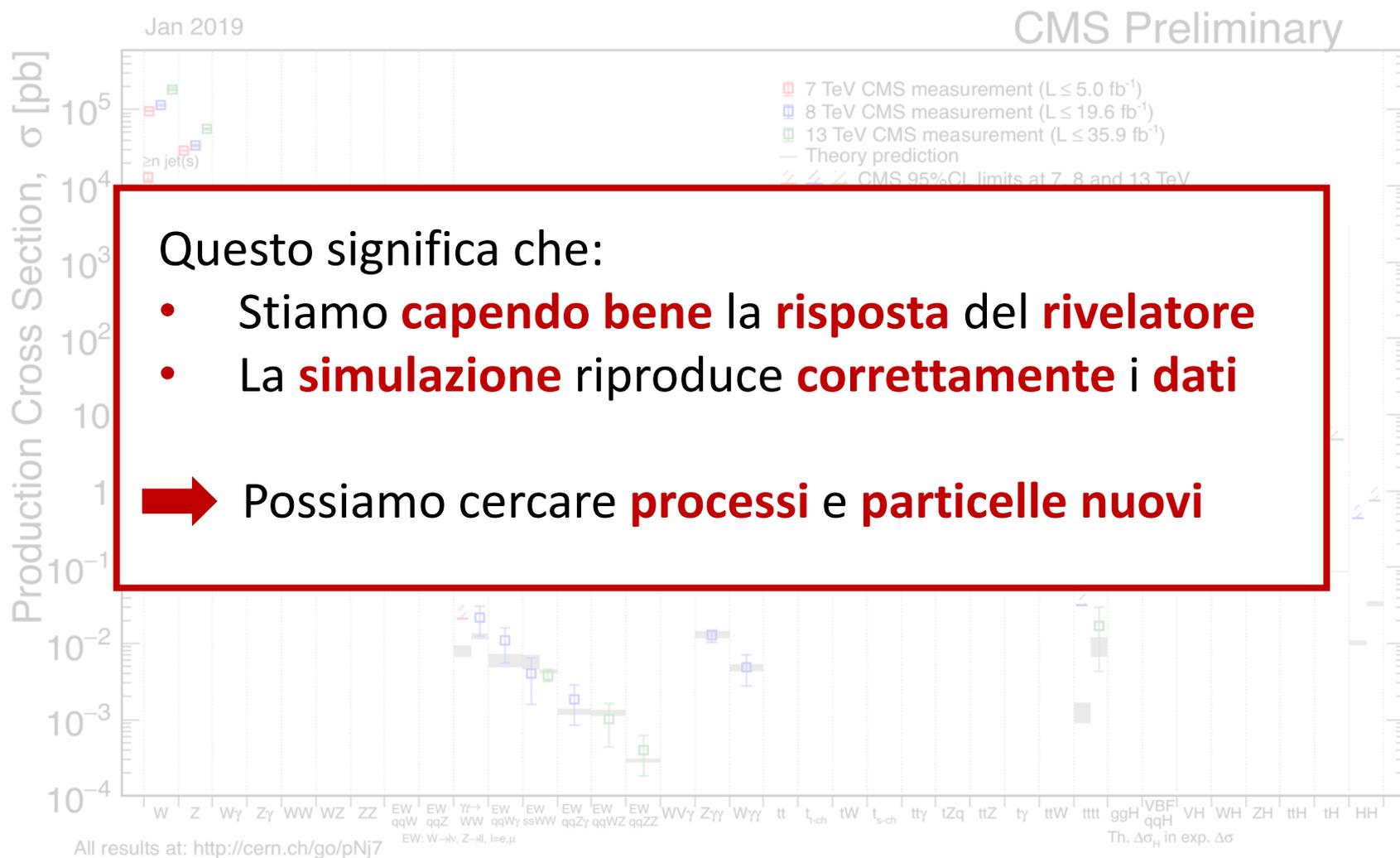


Misure di precisione



Processi del MS conosciuti con **grande precisione** su più di **10 ordini di grandezza**

Misure di precisione



Processi del MS conosciuti con grande precisione su più di 10 ordini di grandezza

Con che probabilità si crea un bosone di Higgs?

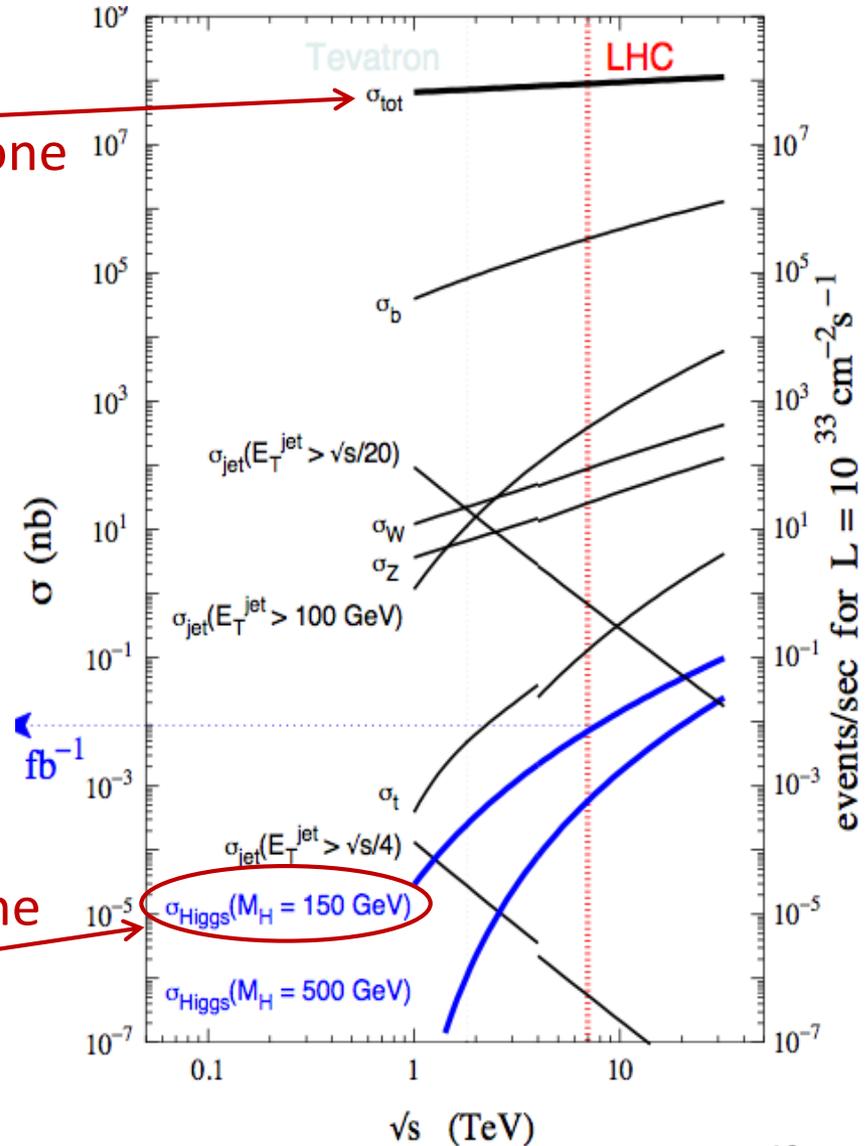
Si riesce a fare un bosone di Higgs una volta ogni mille miliardi di urti = 1000.000.000.000 urti...

Urto protone-protone



10^{-12}

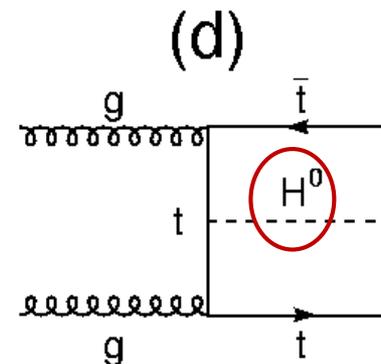
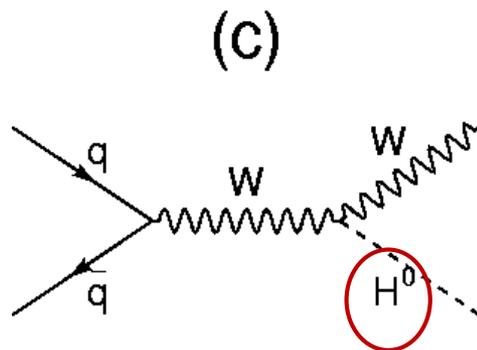
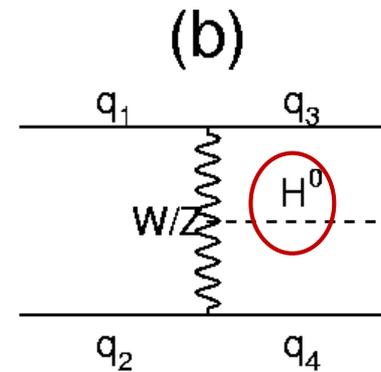
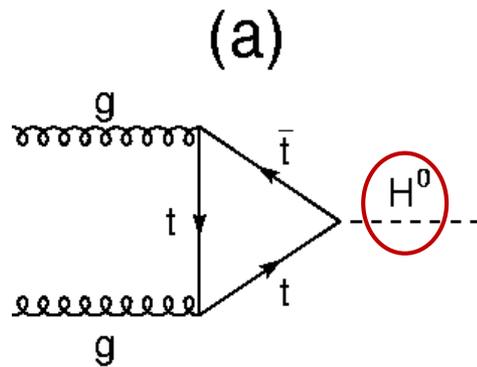
Urto protone-protone che fa un Higgs



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

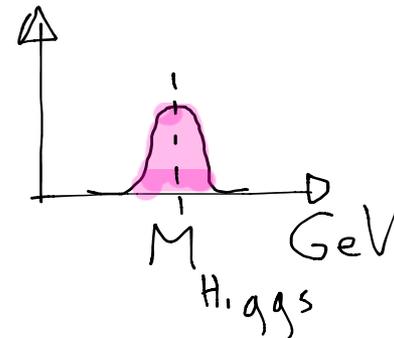
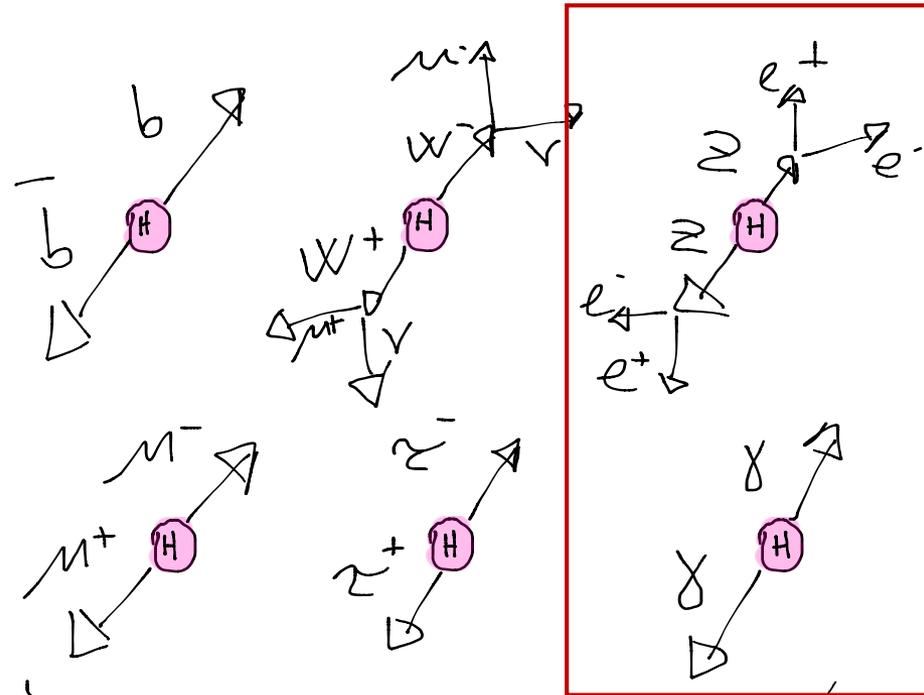


Come facciamo a vederlo?

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

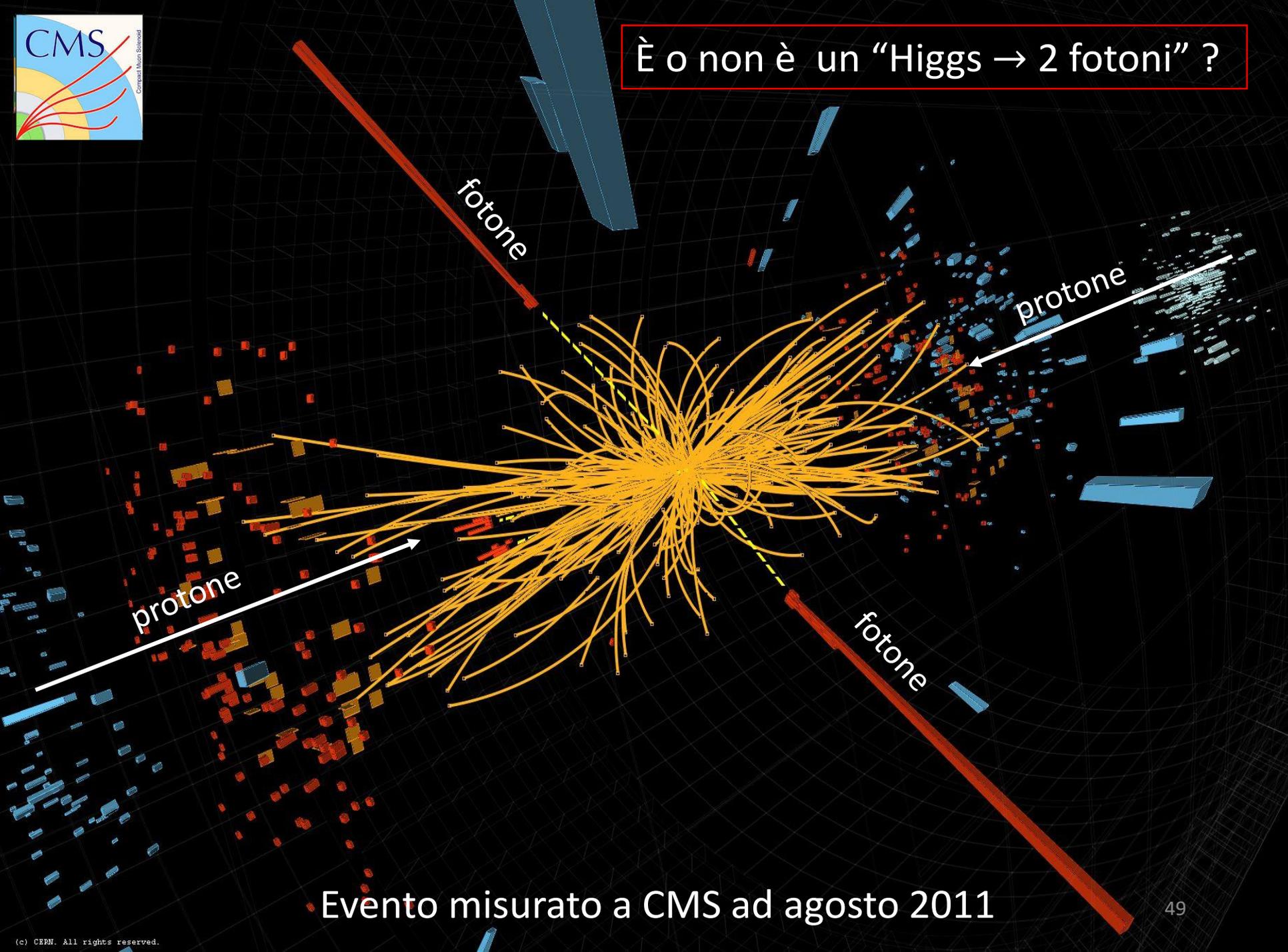
Il bosone di Higgs non vive abbastanza a lungo per essere misurato, ma decade subito in altre particelle.

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



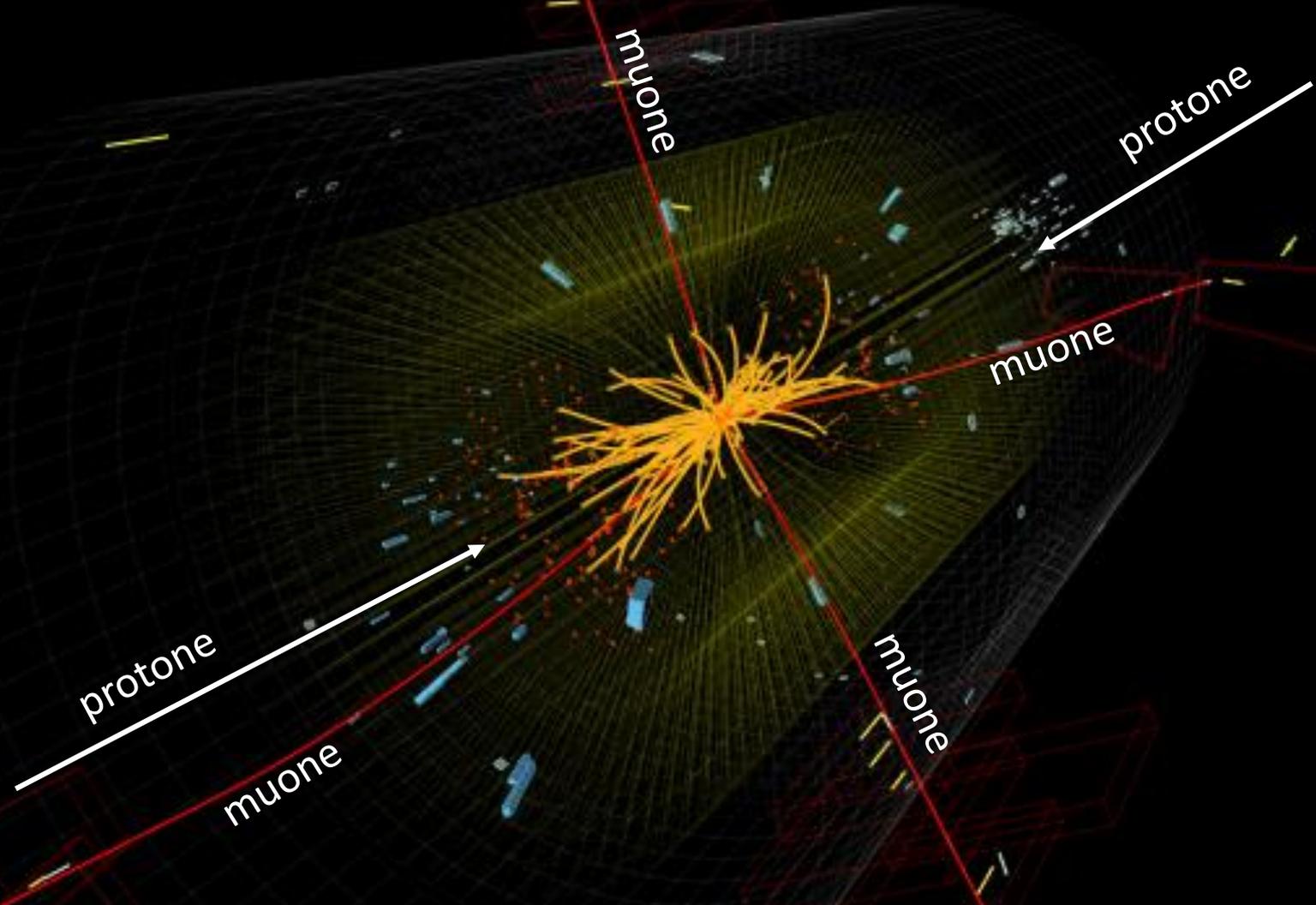
Tutte le combinazioni hanno la stessa massa!

È o non è un "Higgs \rightarrow 2 fotoni" ?

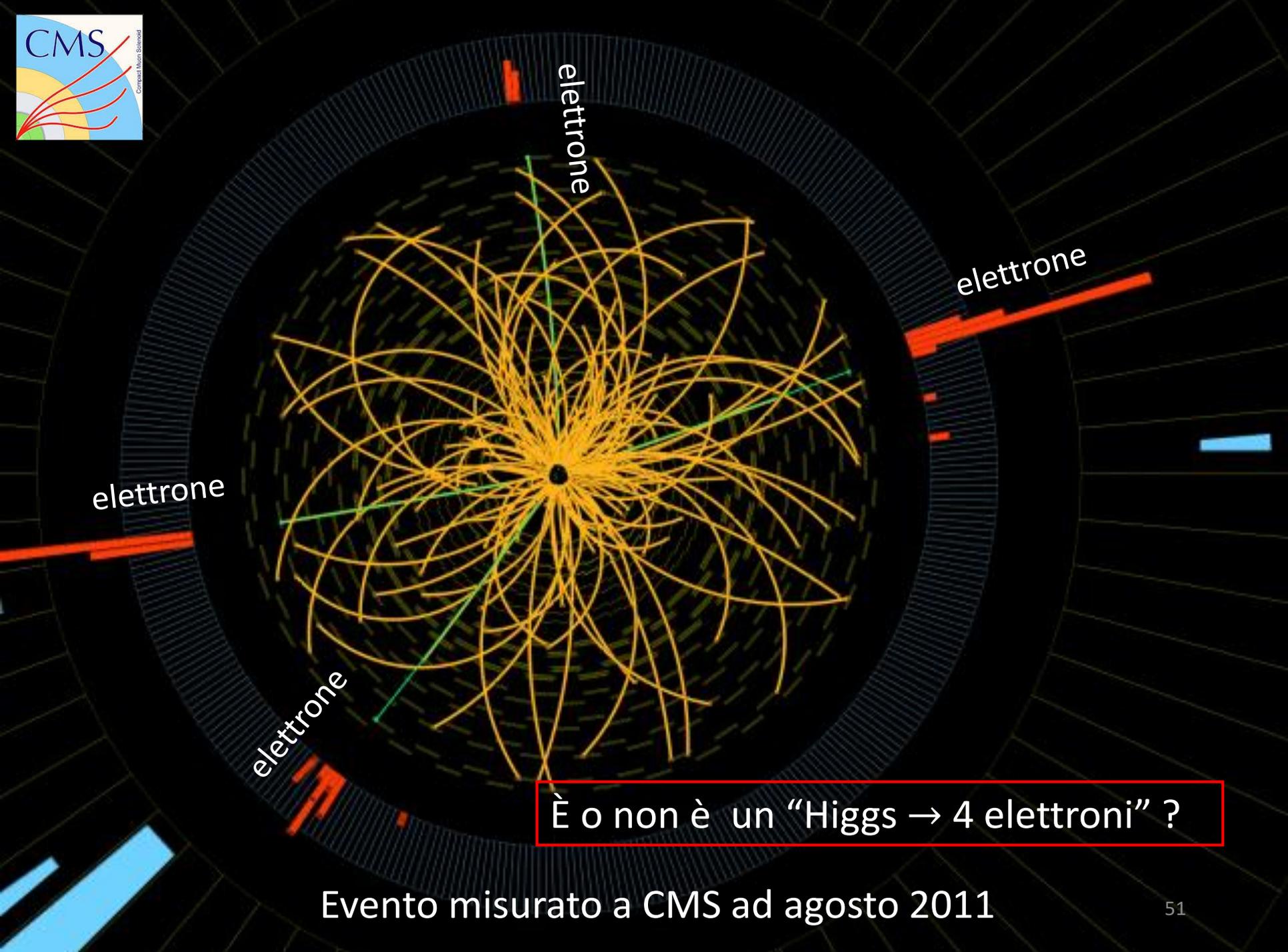


Evento misurato a CMS ad agosto 2011

È o non è un "Higgs \rightarrow 4 muoni" ?



Evento misurato a CMS ad agosto 2011

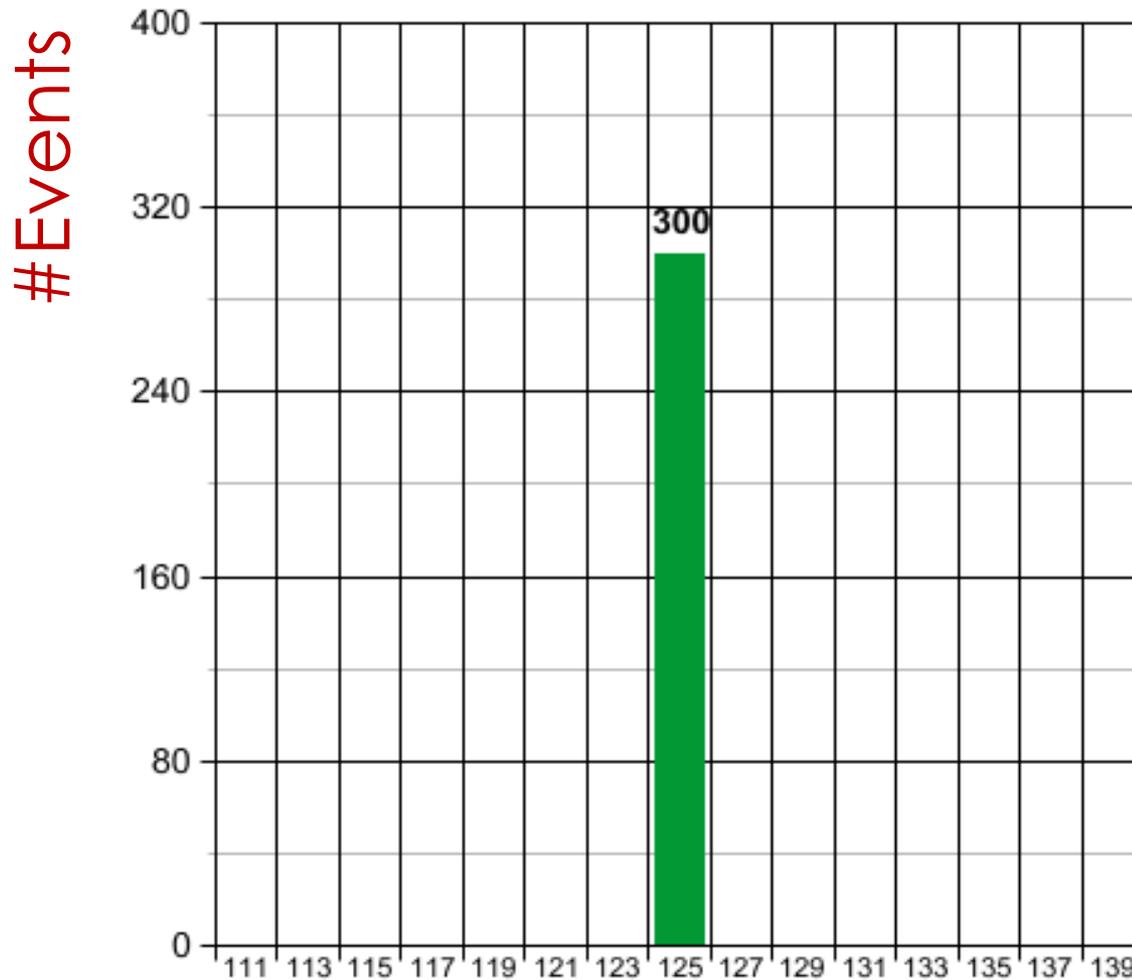


È o non è un "Higgs \rightarrow 4 elettroni" ?

Evento misurato a CMS ad agosto 2011

Decadimento di una particella

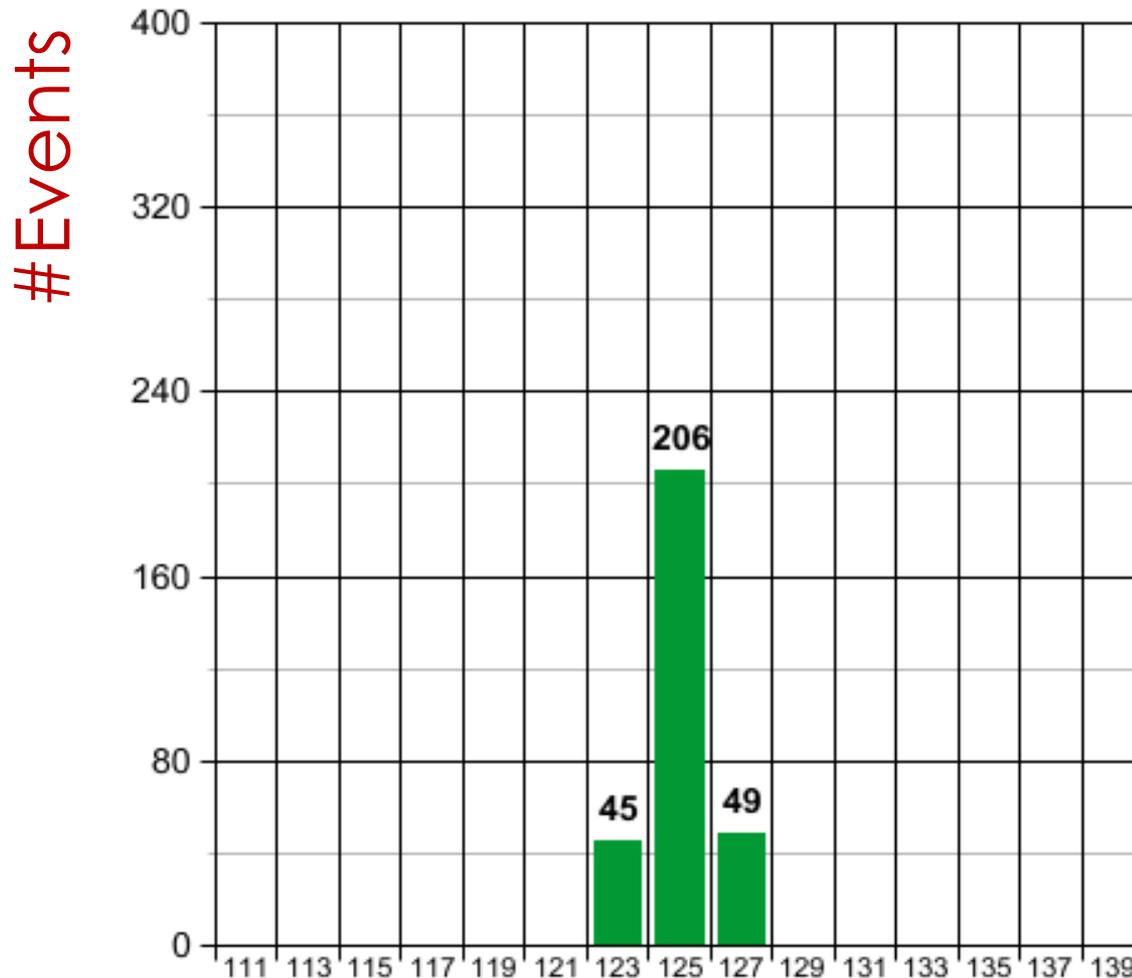
$m = 125 \text{ GeV}$



4 lepton mass

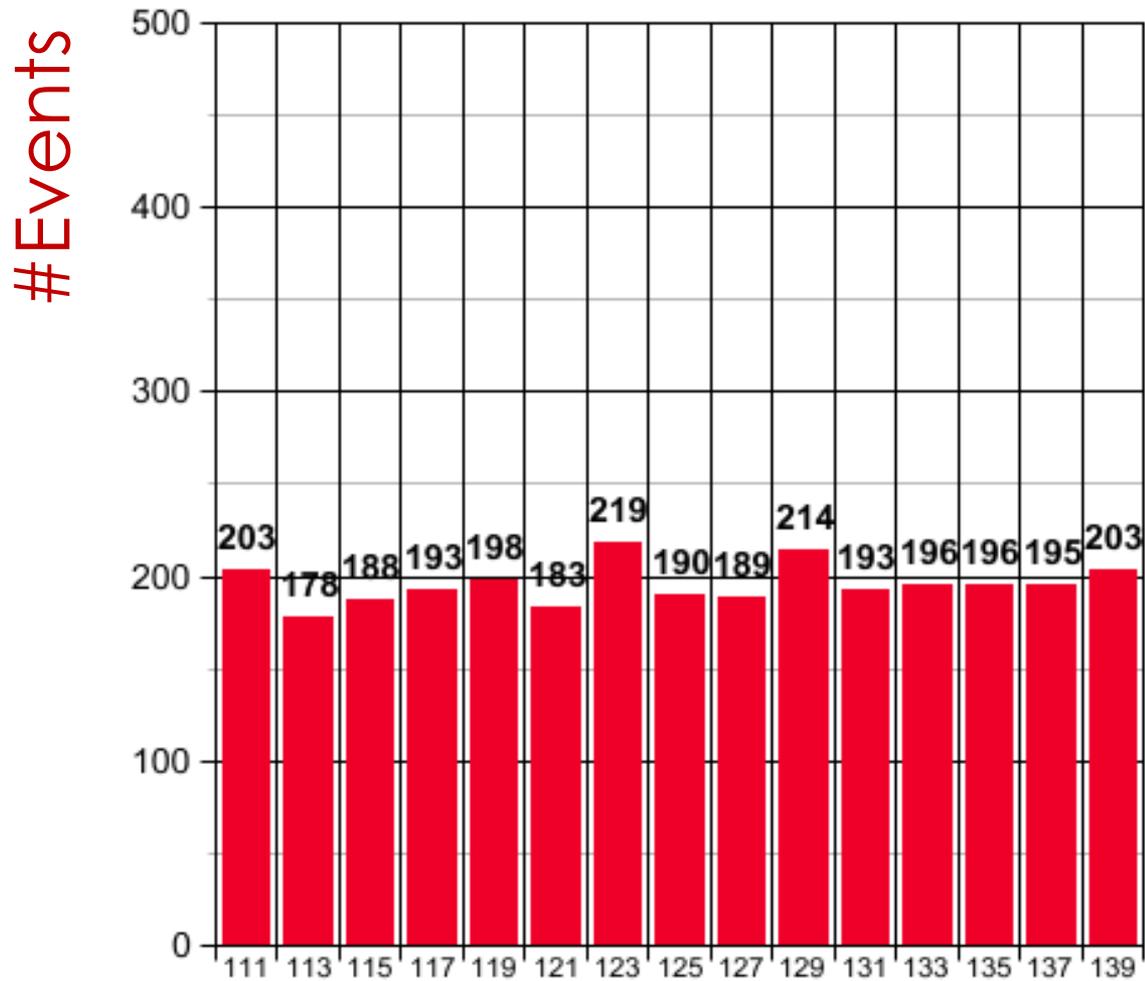
Decadimento di una particella

$m = 125 \text{ GeV}$



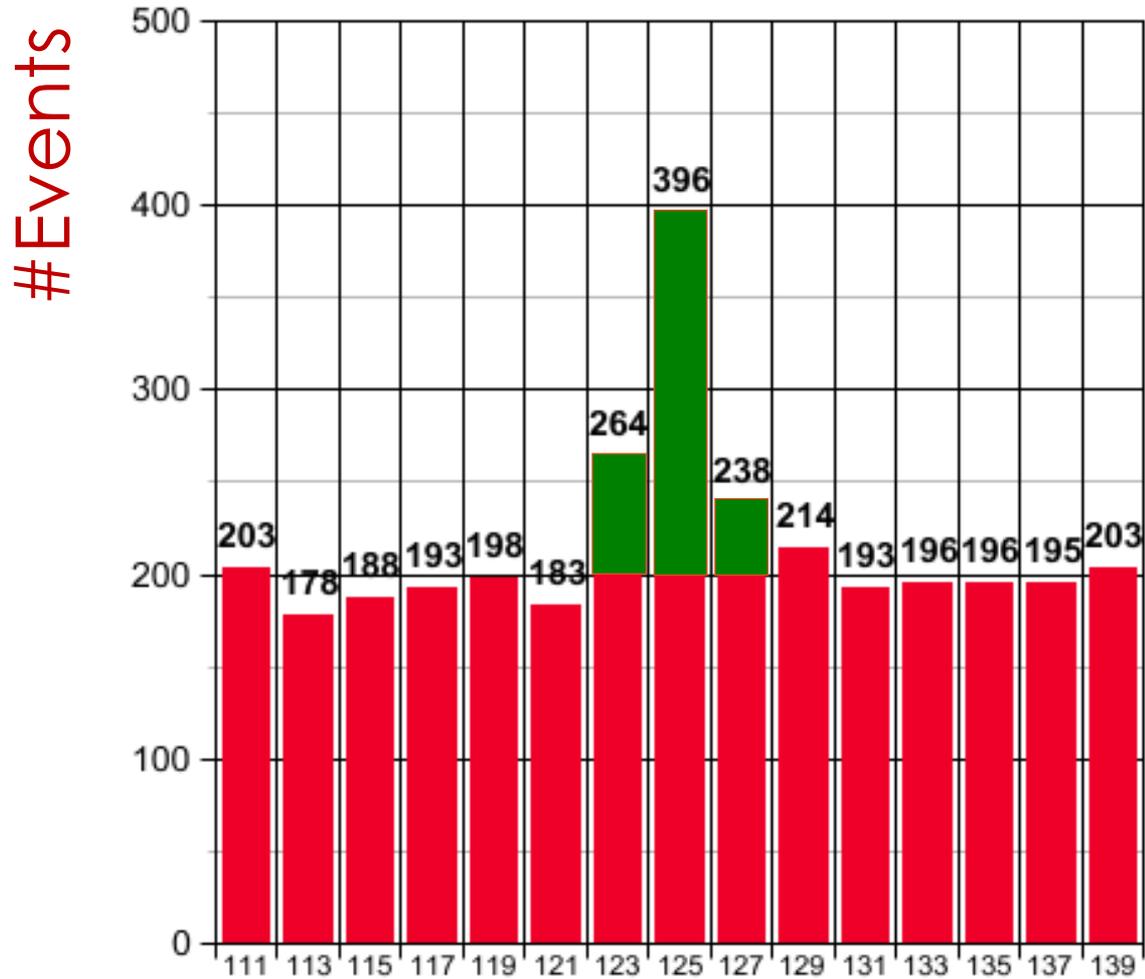
4 lepton mass

Eventi di fondo



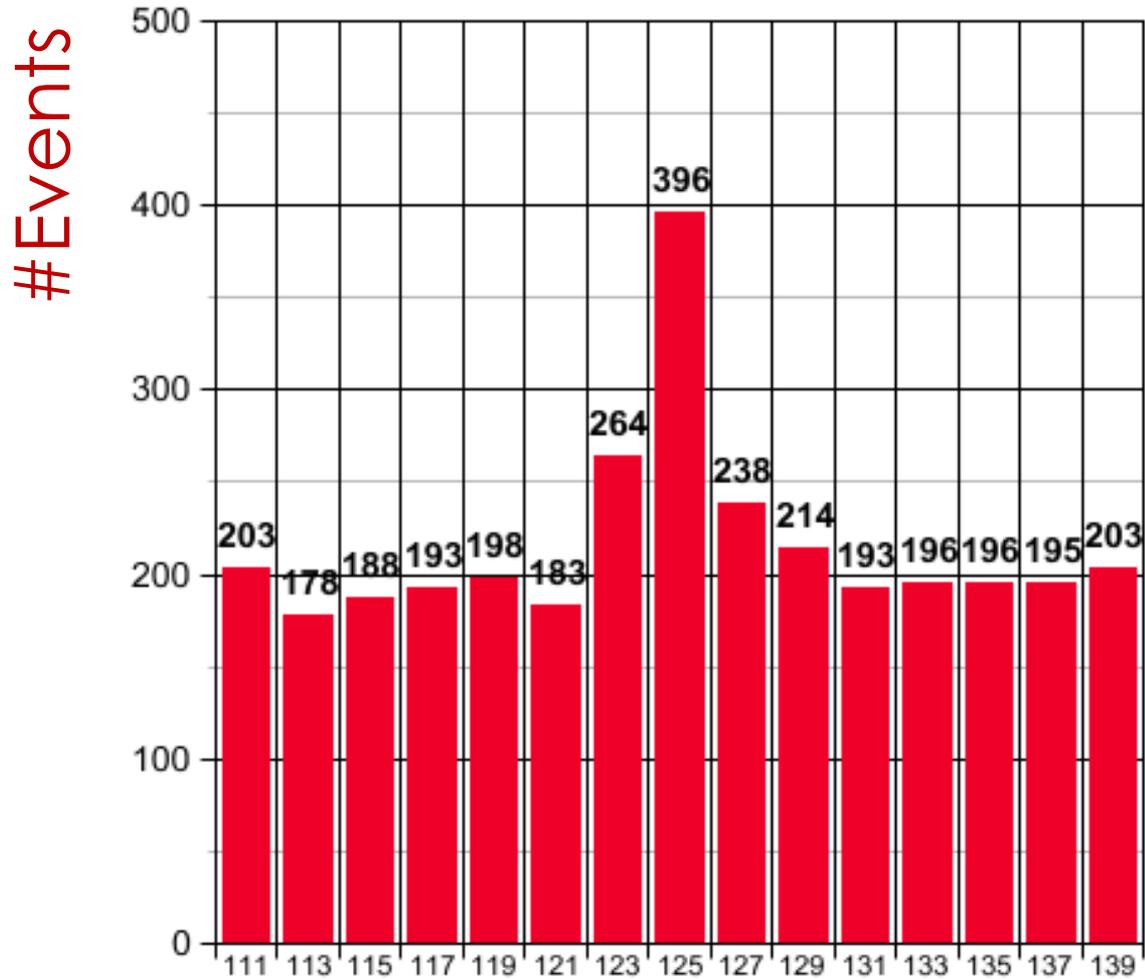
4 lepton mass

Segnale e fondo



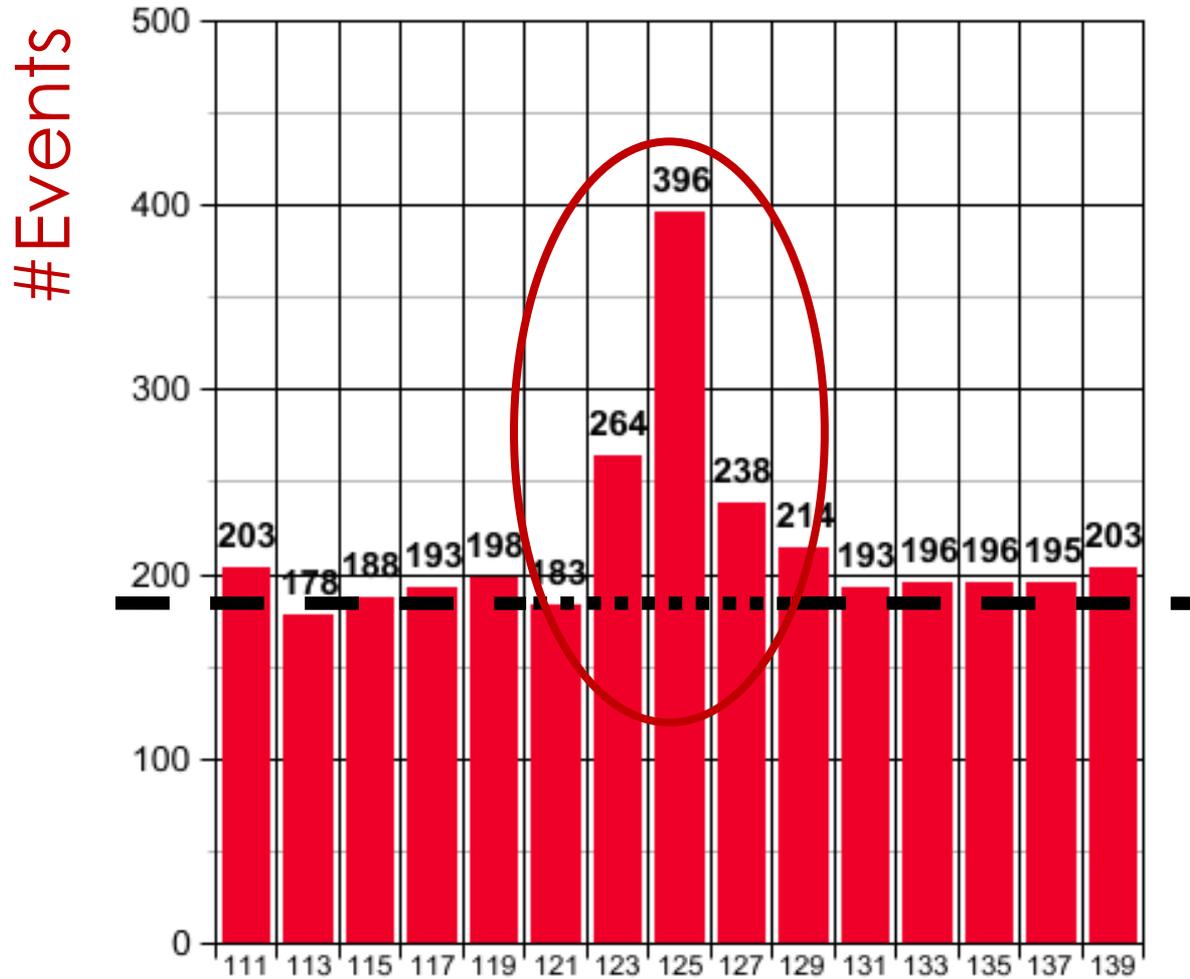
4 lepton mass

Segnale e fondo



4 lepton mass

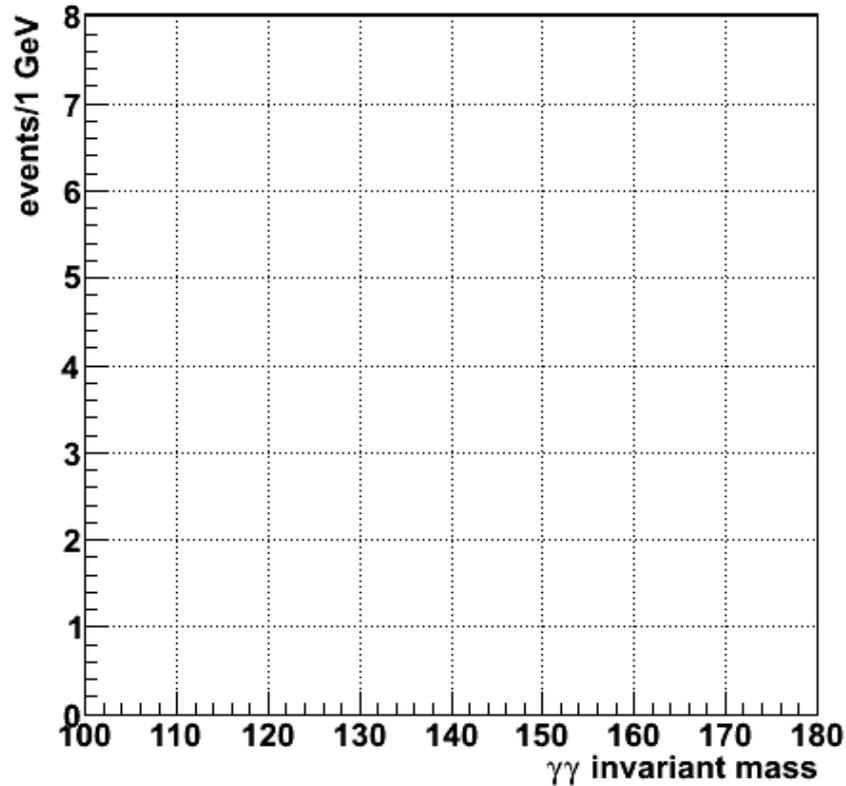
Segnale e fondo



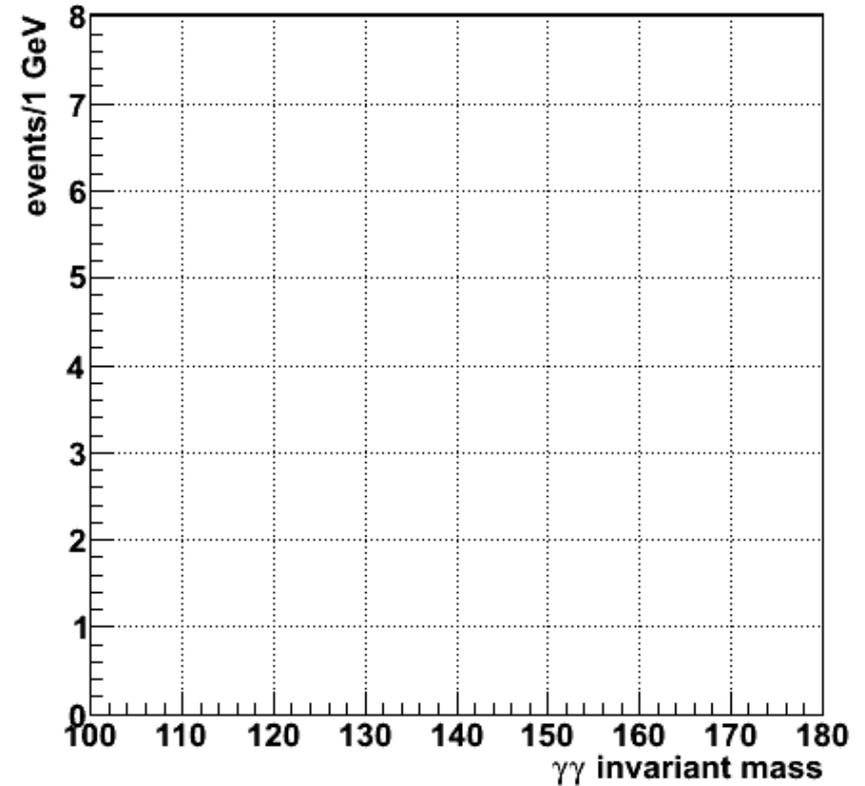
4 lepton mass

L'importanza del fondo

$L=0.00 \text{ fb}^{-1}$



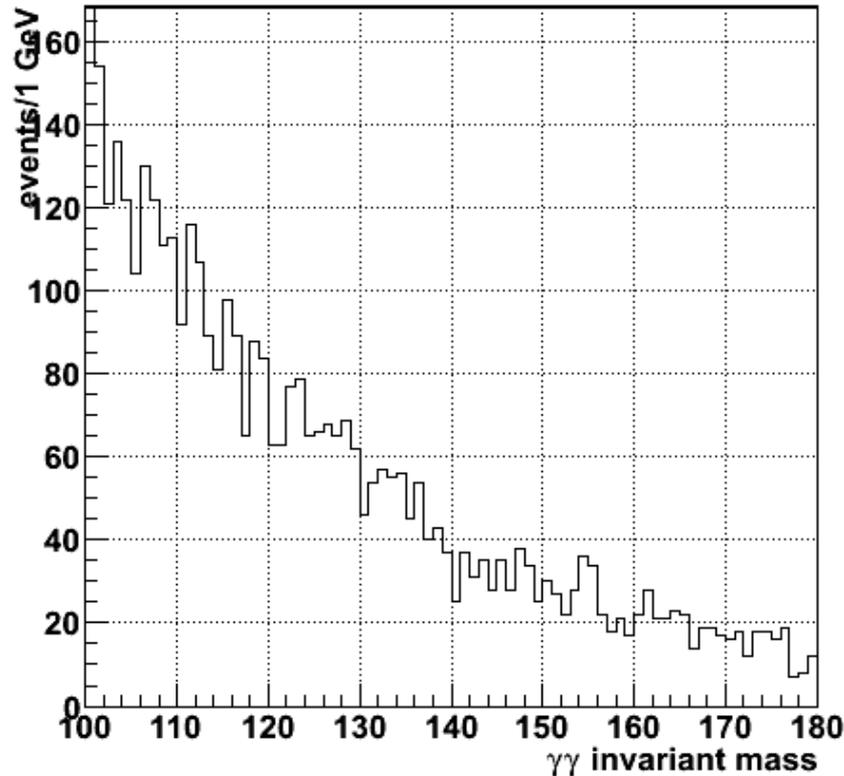
$L=0.00 \text{ fb}^{-1}$



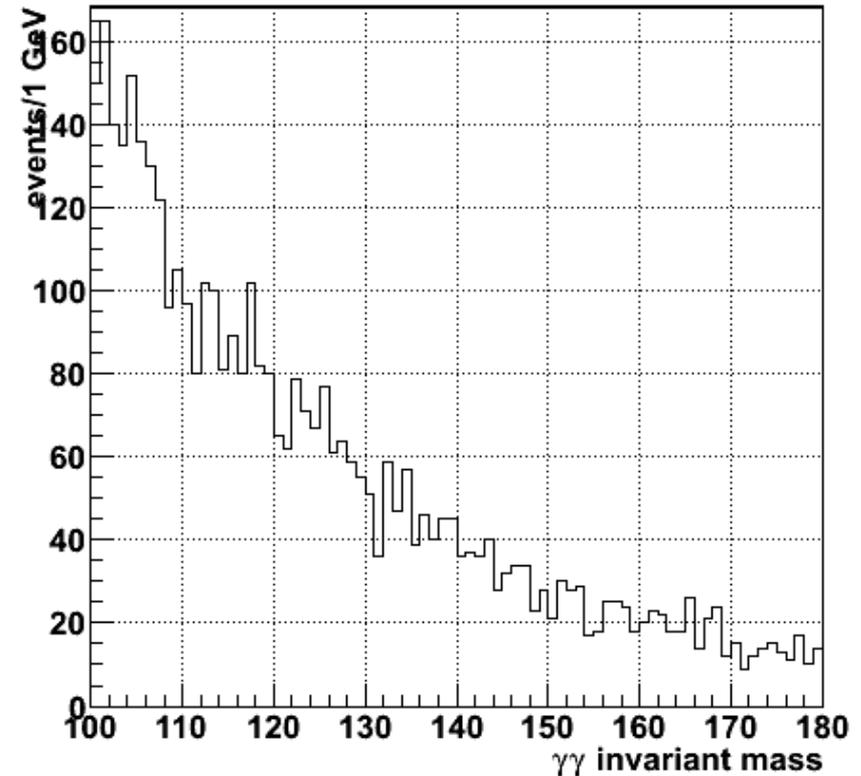
Uno di questi due istogrammi contiene un **segnale** (simulato) di Higgs in due fotoni. Sapreste dire **quale**? E **dove**?

L'importanza del fondo

$L=1.00 \text{ fb}^{-1}$



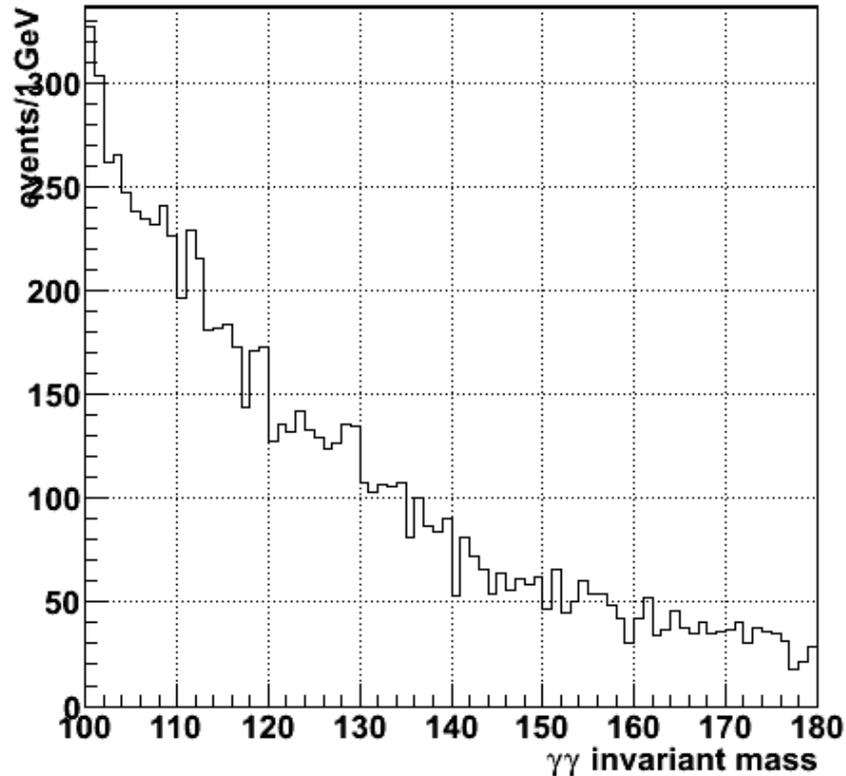
$L=1.00 \text{ fb}^{-1}$



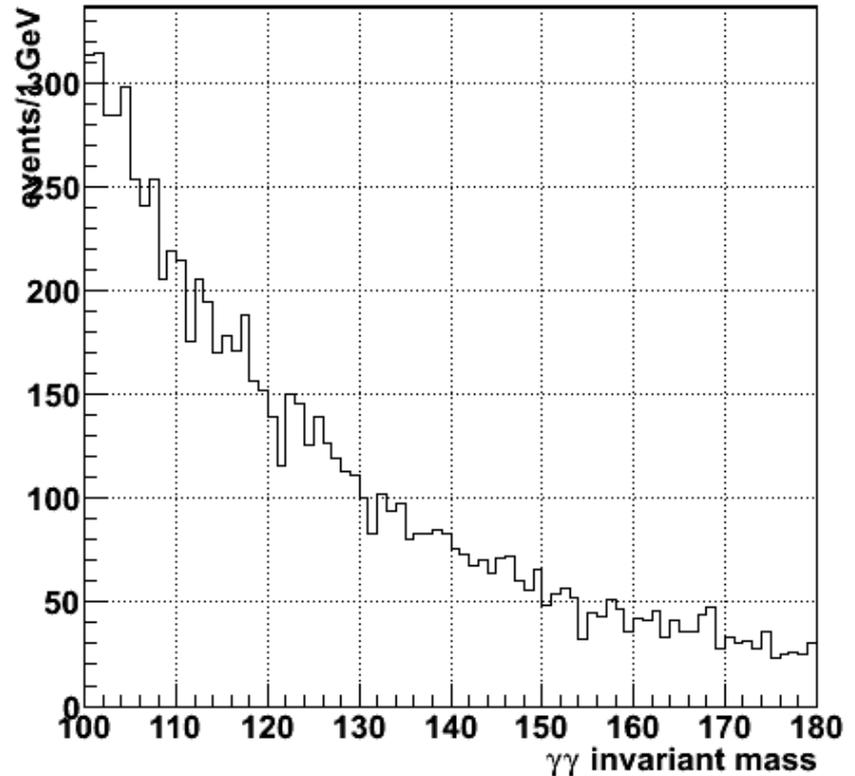
Uno di questi due istogrammi contiene un **segnale** (simulato) di Higgs in due fotoni. Sapreste dire **quale**? E **dove**?

L'importanza del fondo

$L=2.00 \text{ fb}^{-1}$



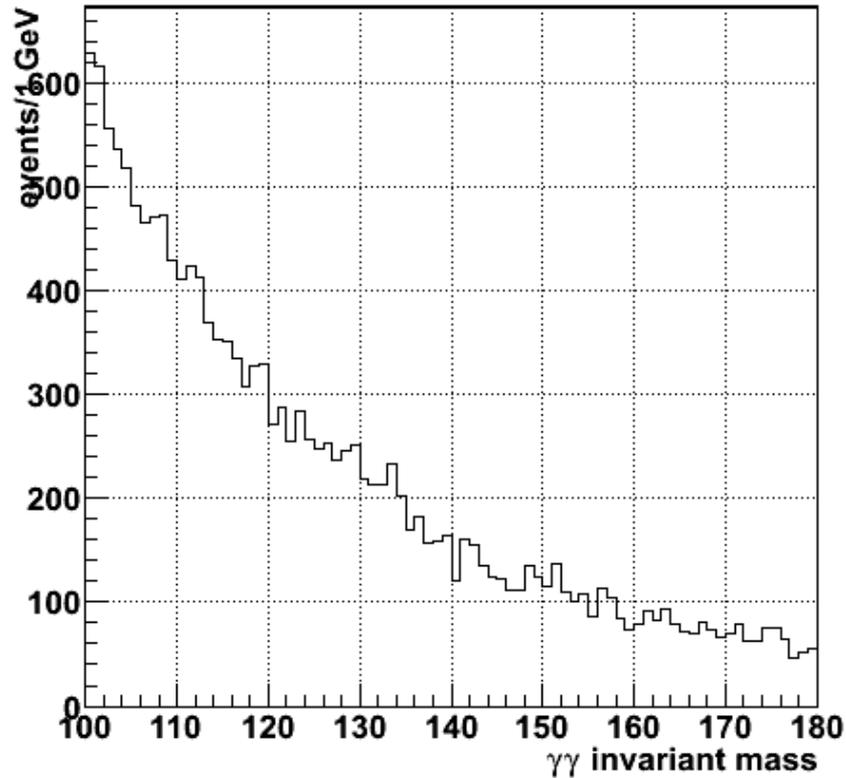
$L=2.00 \text{ fb}^{-1}$



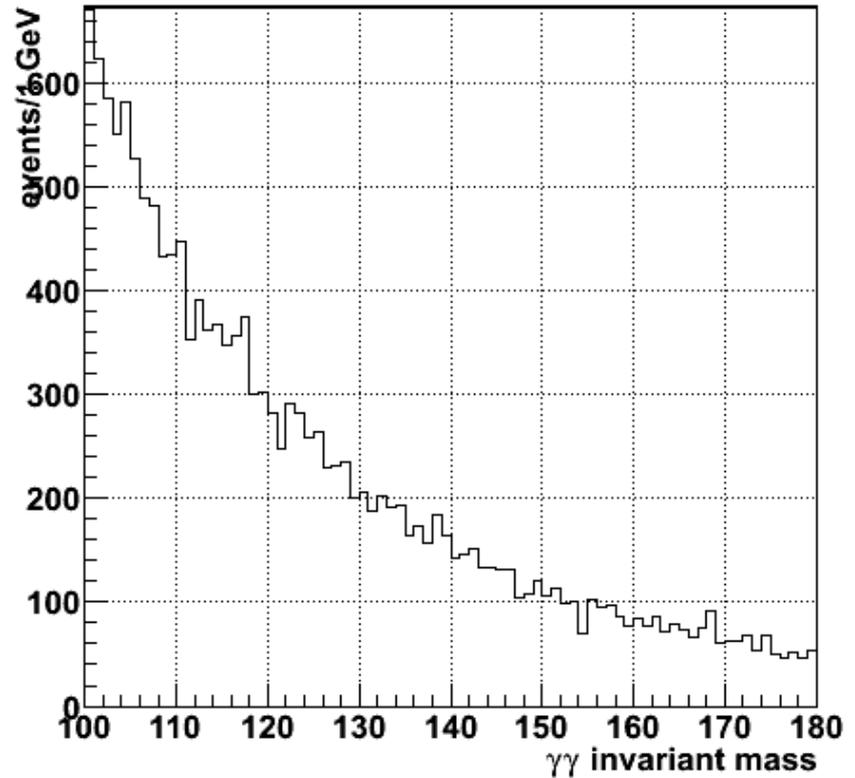
Uno di questi due istogrammi contiene un **segnale** (simulato) di Higgs in due fotoni. Sapreste dire **quale**? E **dove**?

L'importanza del fondo

$L=4.00 \text{ fb}^{-1}$



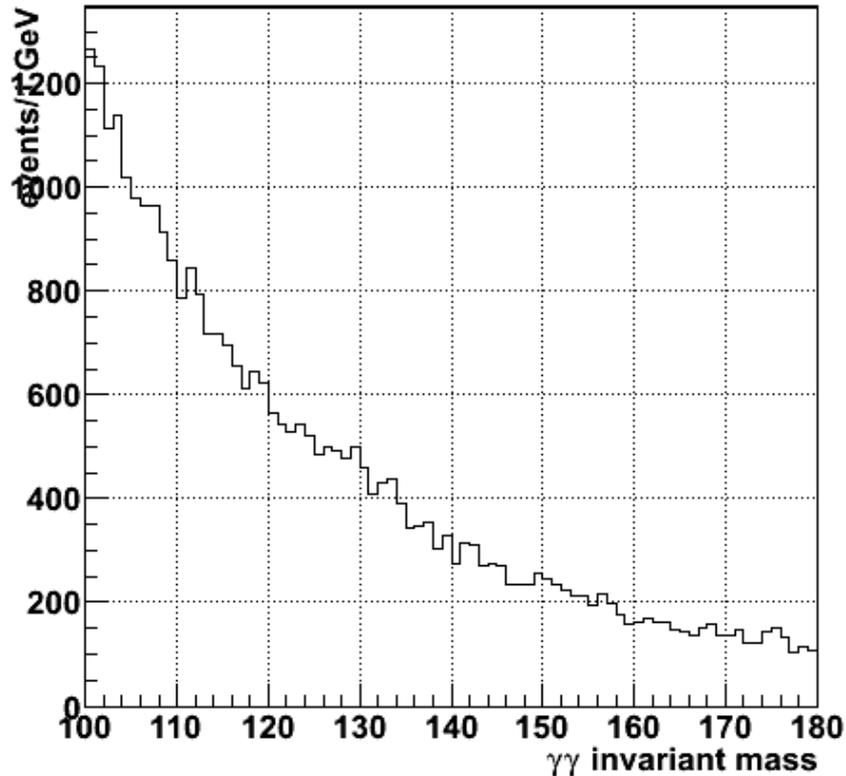
$L=4.00 \text{ fb}^{-1}$



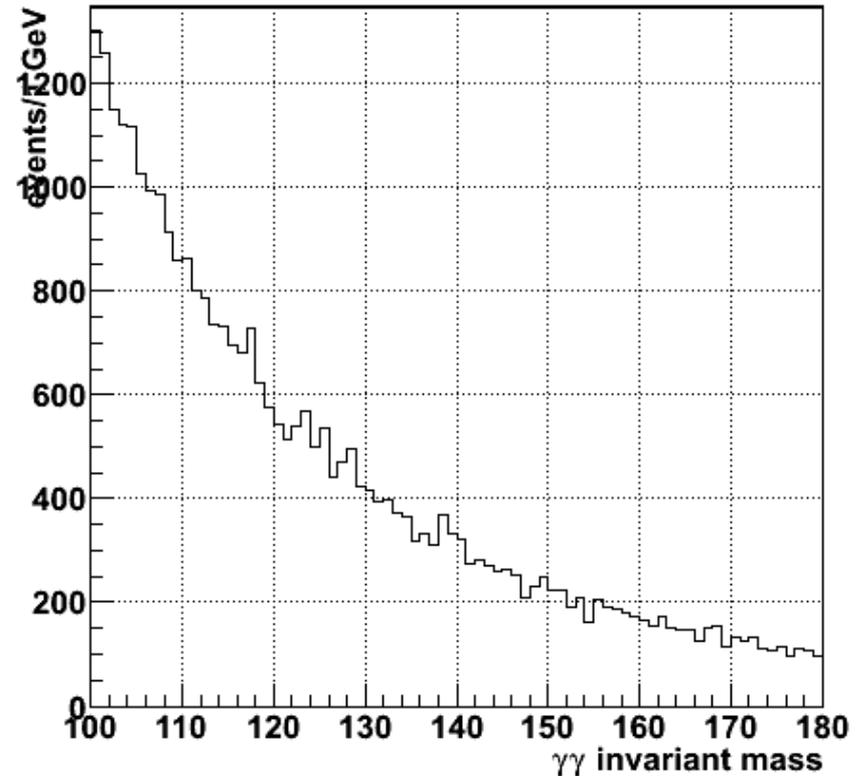
Uno di questi due istogrammi contiene un **segnale** (simulato) di Higgs in due fotoni. Sapreste dire **quale**? E **dove**?

L'importanza del fondo

$L=8.00 \text{ fb}^{-1}$



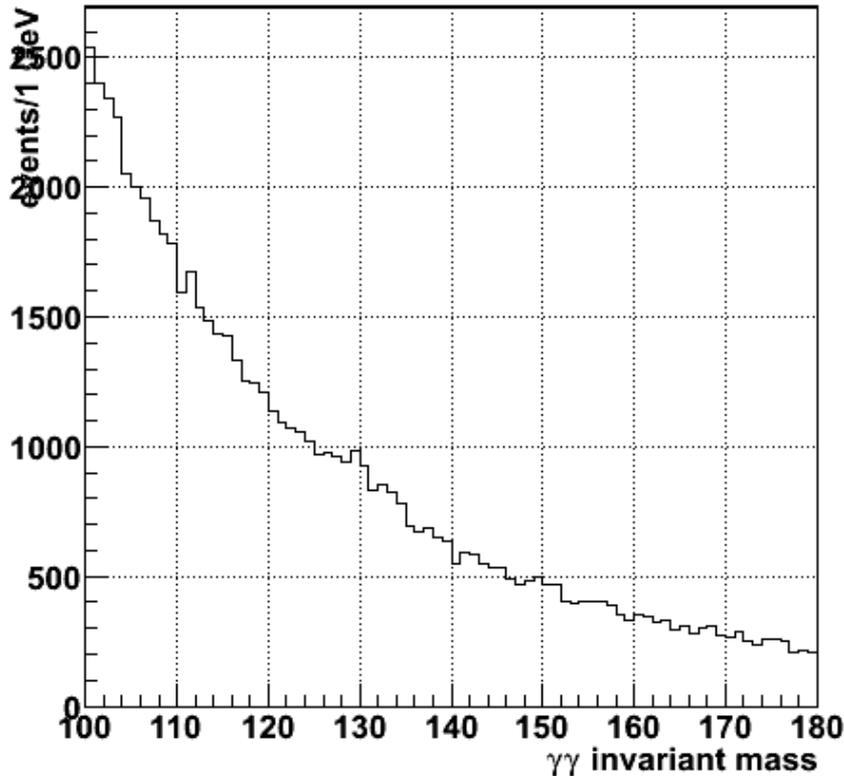
$L=8.00 \text{ fb}^{-1}$



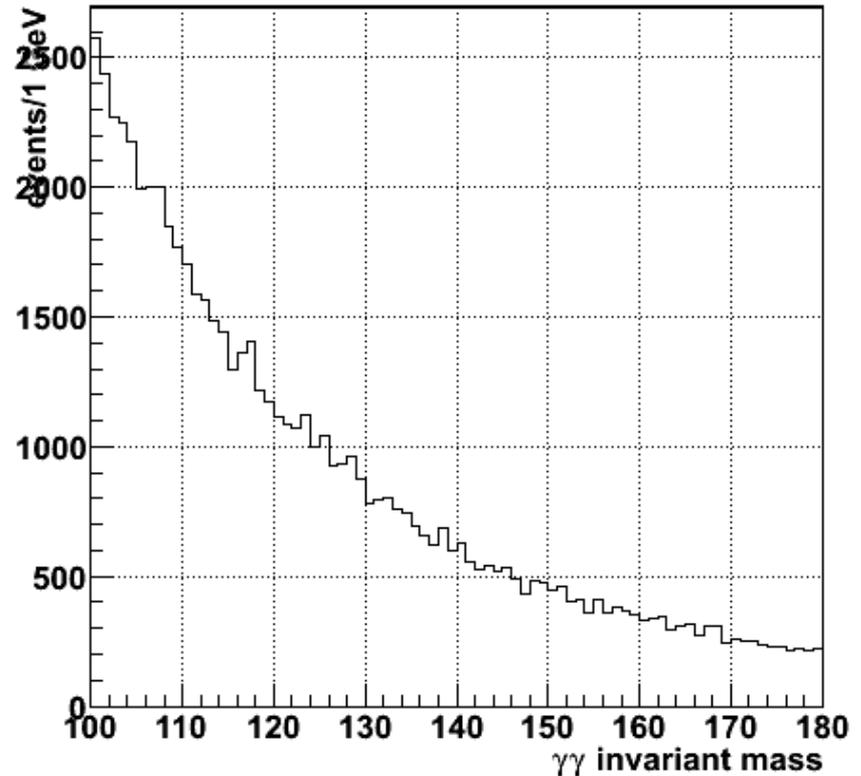
Uno di questi due istogrammi contiene un **segnale** (simulato) di Higgs in due fotoni. Sapreste dire **quale**? E **dove**?

L'importanza del fondo

$L=16.00 \text{ fb}^{-1}$



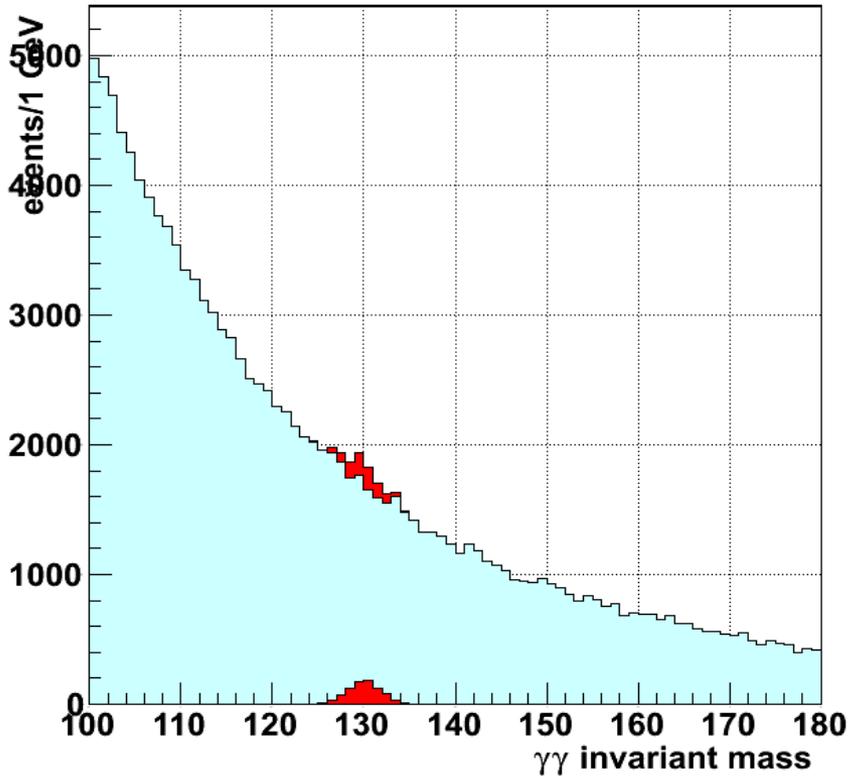
$L=16.00 \text{ fb}^{-1}$



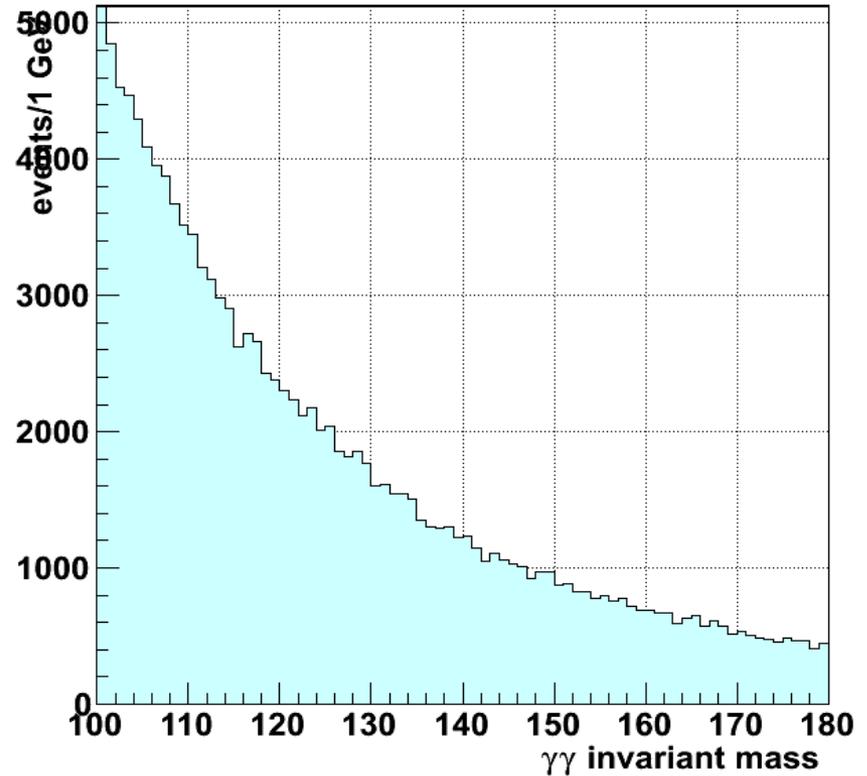
Uno di questi due istogrammi contiene un **segnale** (simulato) di Higgs in due fotoni. Sapreste dire **quale**? E **dove**?

L'importanza del fondo

$L=32.00 \text{ fb}^{-1}$



$L=32.00 \text{ fb}^{-1}$



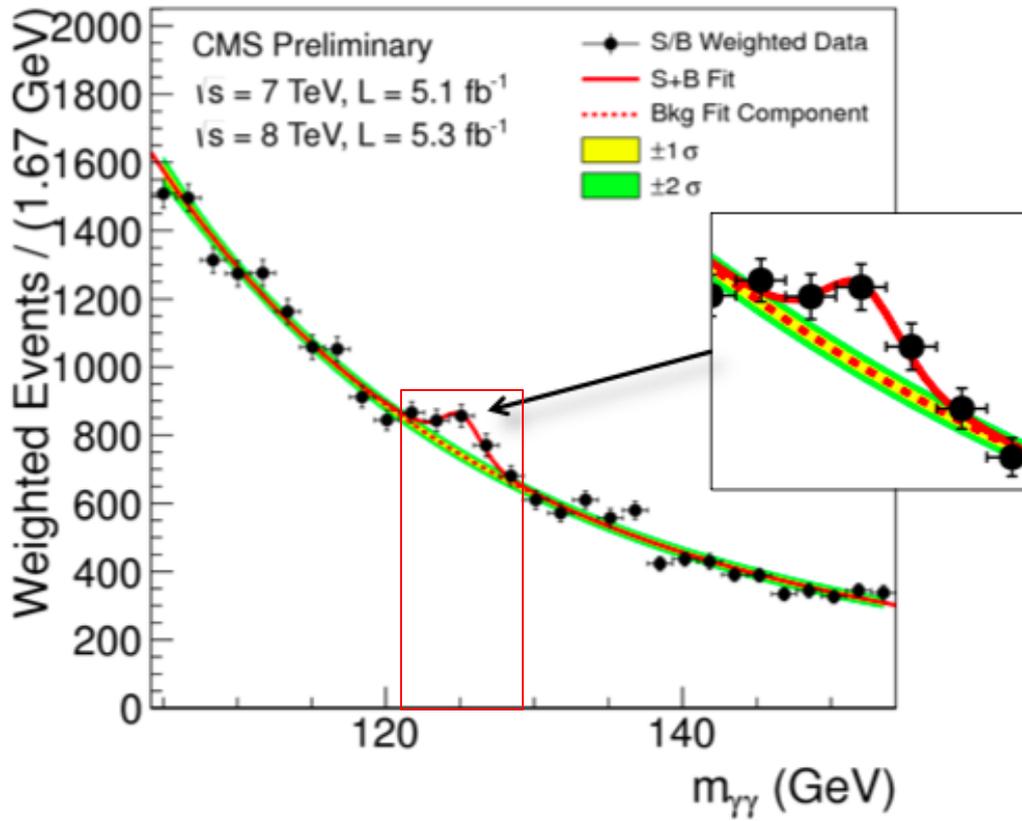
Uno di questi due istogrammi contiene un **segnale** (simulato) di Higgs in due fotoni. Sapreste dire **quale**? E **dove**?

Che aspetto ha una scoperta da premio Nobel?

In questo grafico si vede:

Riga verde: somma di tutti i processi di fisica noti

Riga rossa: eccesso di eventi



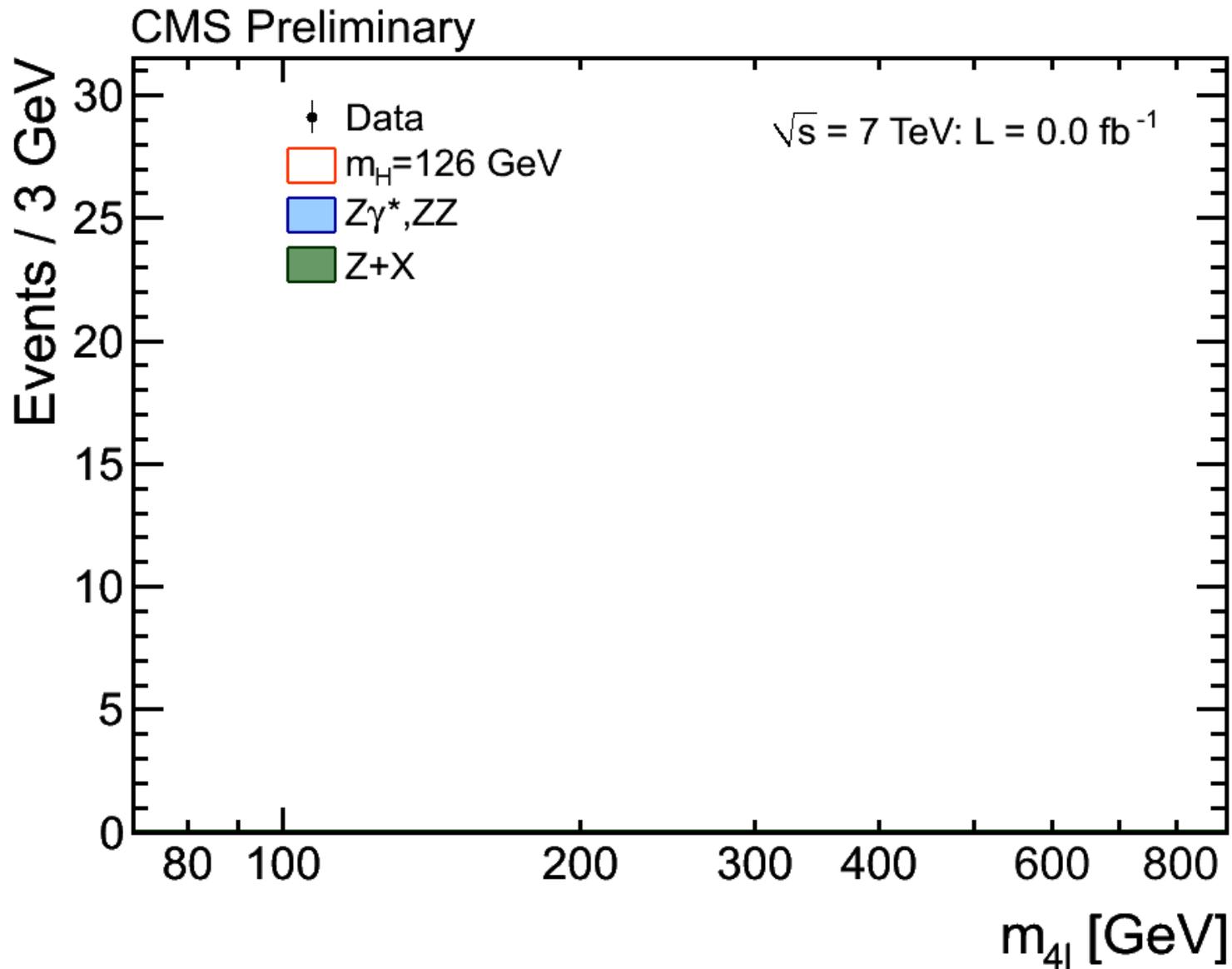
Quello che si vede è che in un certo intervallo di massa ci sono più eventi di quelli attesi dalla somma di tutti i processi noti escludendo il bosone di Higgs.

Tuttavia: non si riesce a sapere se il singolo evento sia un bosone di Higgs: è un processo statistico.

Stoccolma!!!!, premio Nobel 2014

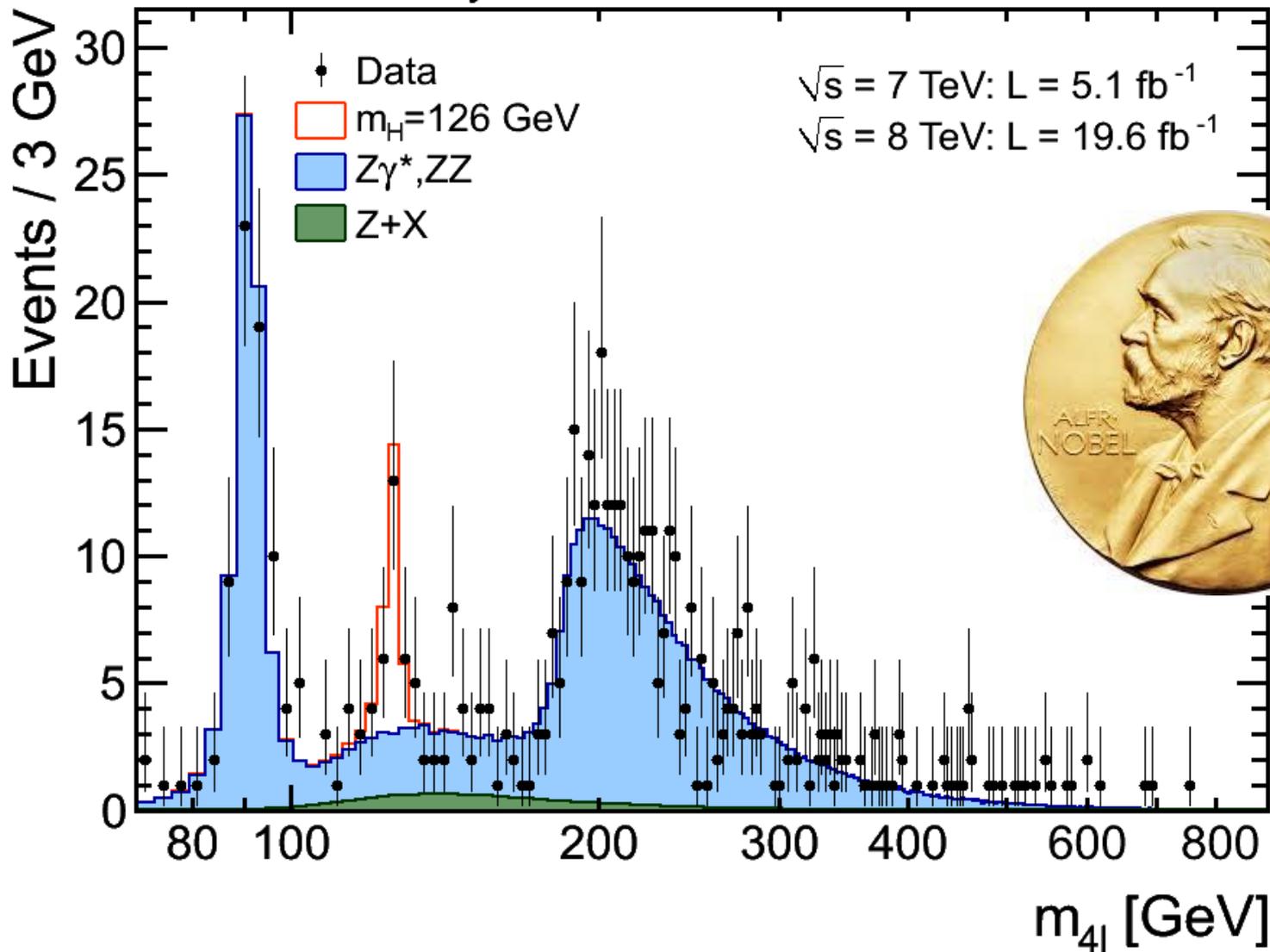


Higgs in 4 lepton ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$)



Higgs in 4 lepton ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$)

CMS Preliminary



La scoperta del bosone di Higgs



**CERN Main Auditorium, 4 luglio 2012:
Gli esperimenti ATLAS e CMS annunciano
la SCOPERTA di un NUOVO BOSONE**

La scoperta del bosone di Higgs

C'ero anche io!!



CERN Main Auditorium, 4 luglio 2012:
Gli esperimenti ATLAS e CMS annunciano
la SCOPERTA di un NUOVO BOSONE

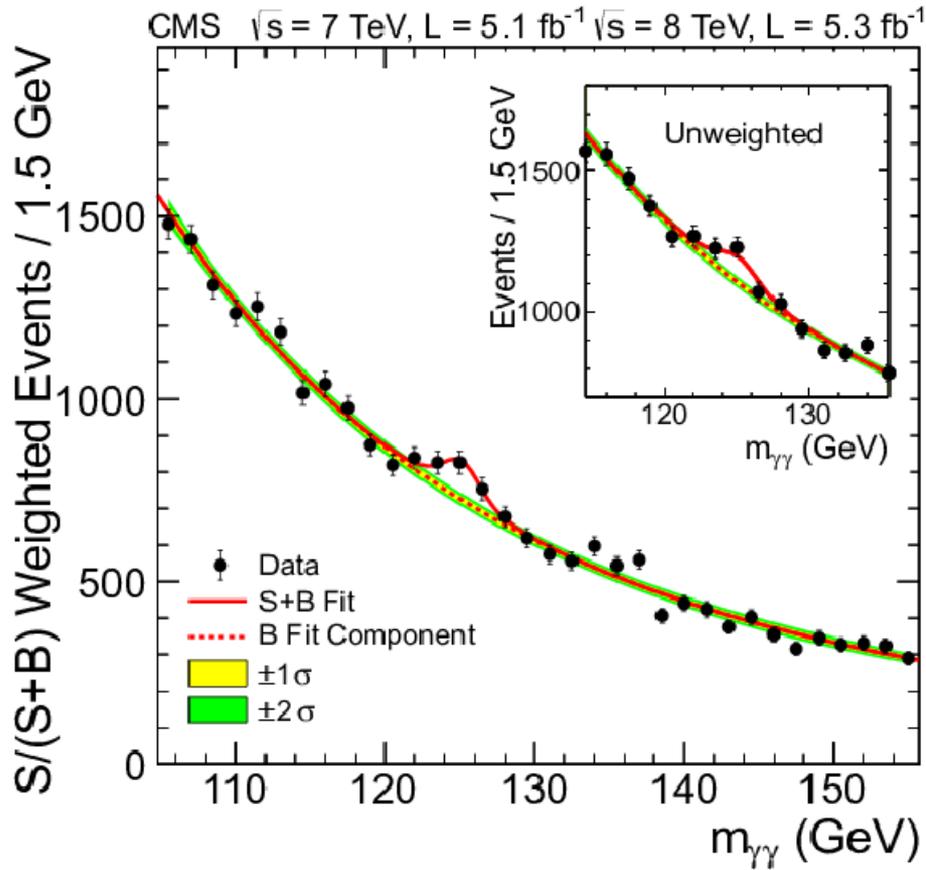
La scoperta del bosone di Higgs



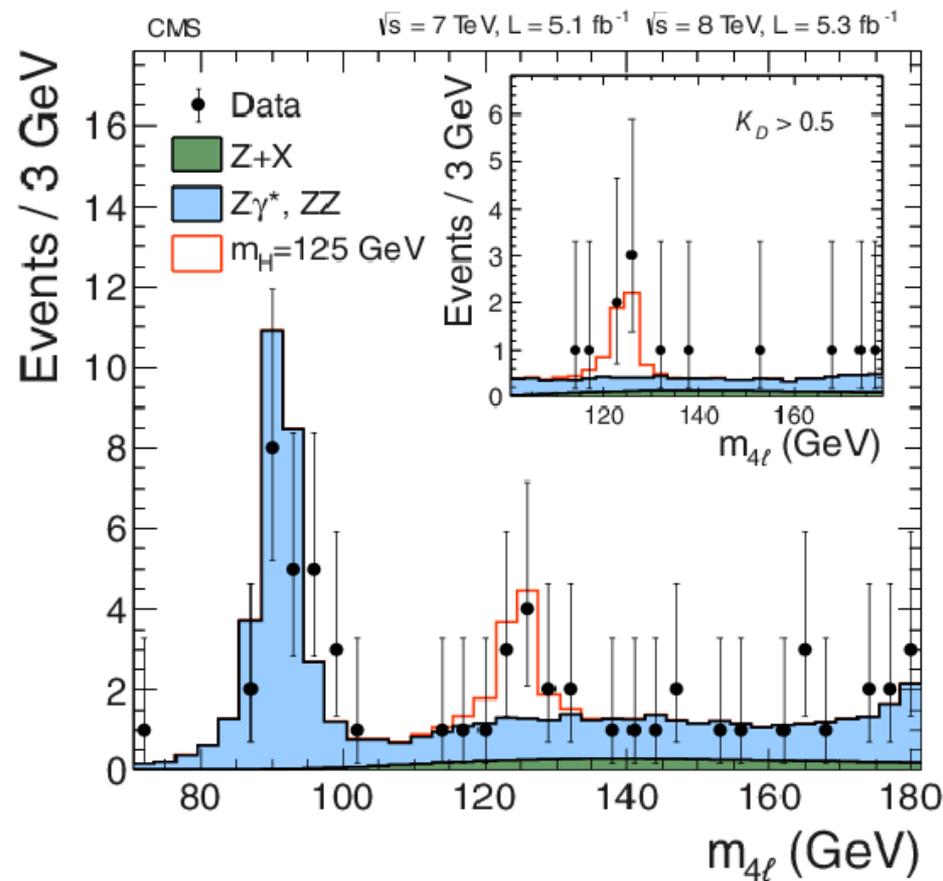
Mr Higgs

4 luglio 2012

Higgs \rightarrow 2 fotoni



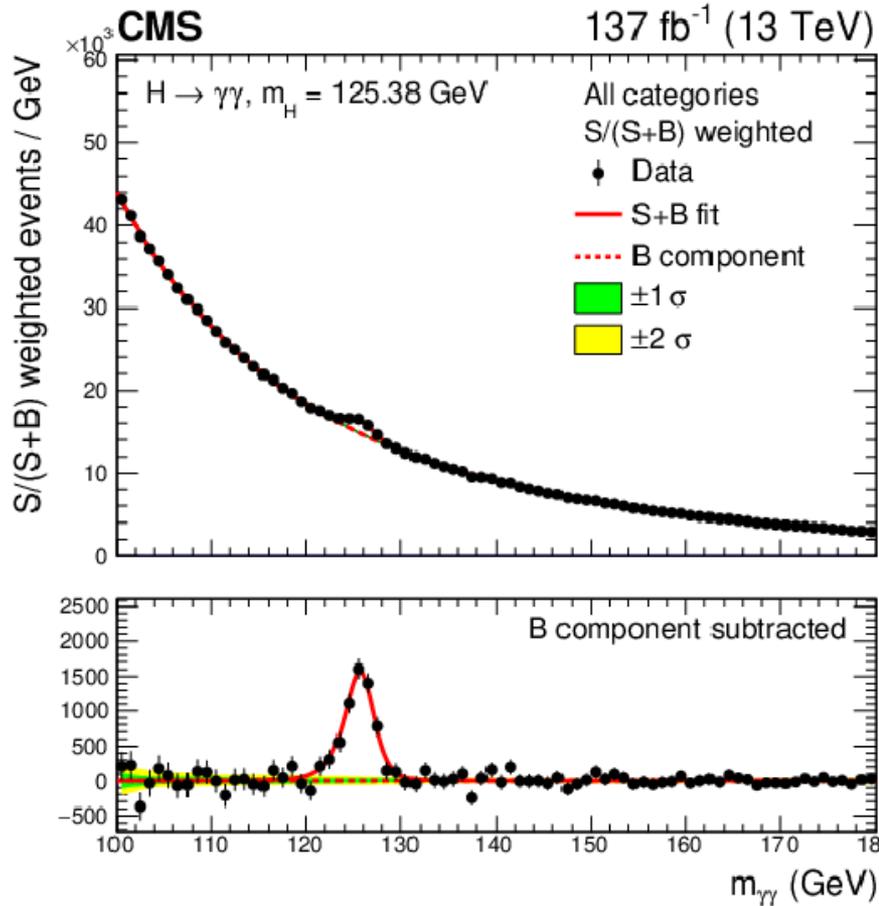
Higgs \rightarrow 4 leptoni



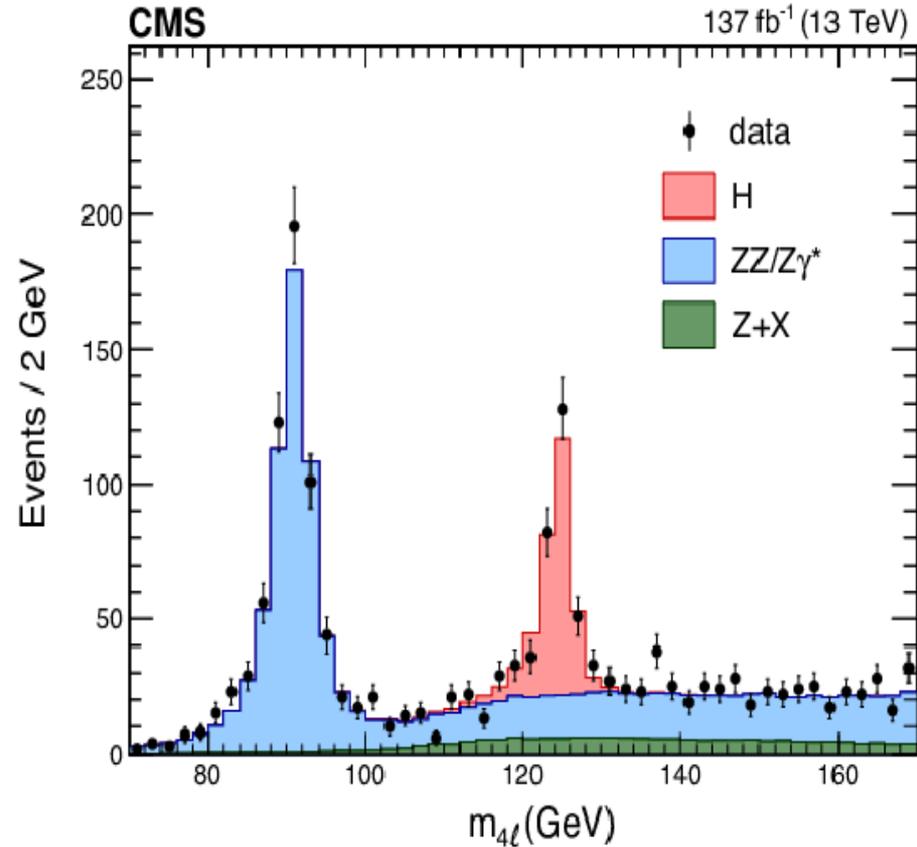
Abbiamo scoperto il bosone di Higgs con una manciata (poche decine) di queste particelle

Oggi

Higgs \rightarrow 2 fotoni



Higgs \rightarrow 4 leptoni



Ora ne abbiamo centinaia e possiamo studiare molto meglio le sue proprietà!
Ma...

C'è ancora molto da fare

Questioni aperte:

Capire la natura di questo bosone di Higgs e se c'è fisica oltre al Modello Standard

Come??

Continuando a cercare nuove particelle
(altri bosoni di Higgs, s-particelle, qualcosa di nuovo)



Misurando con grande precisione le sue proprietà

Esplorando fenomeni non ancora osservati



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



**WE WANT
YOU IN
OUR TEAM!**

Grazie a...

Un grazie enorme a Chiara Mariotti, Mario Pelliccioni e Nicolò Cartiglia, che hanno fornito molto del materiale che vi ho mostrato oggi.

Grazie infinite anche ad Antonella Del Rosso, che rende eventi come questo possibili.

E mille grazie anche a voi, che avete trovato la voglia di partecipare, nonostante là fuori sia già estate!





Backup

Il campo di Higgs

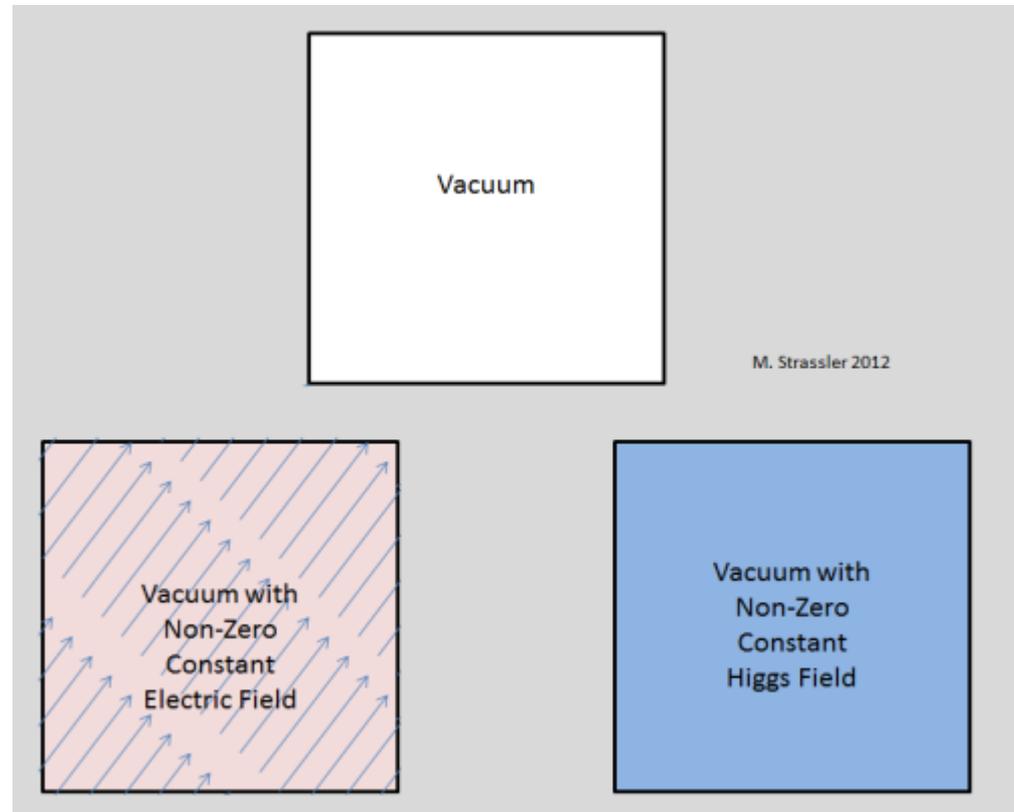
Il concetto di “campo” in fisica è comune, pensate ad un campo elettrico tra le facce di un condensatore. Importante: **il campo elettrico ha una direzione.**

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!!

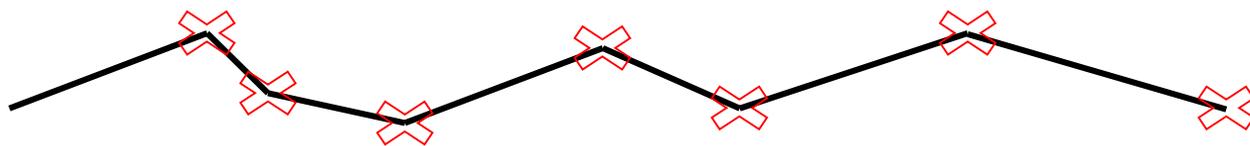


Effetto dell'interazione con il campo di Higgs

In assenza del campo di Higgs, l'energia è tutta contenuta nella quantità di moto:

$$E^2 = (p_1 c)^2$$

Tuttavia, se il campo di Higgs è presente:



Meccanismo di Higgs



L'energia non cambia, ma la particella rallenta ed "acquisisce" massa

$$E^2 = (mc^2)^2 + (p_2 c)^2$$

$$p_1 > p_2$$