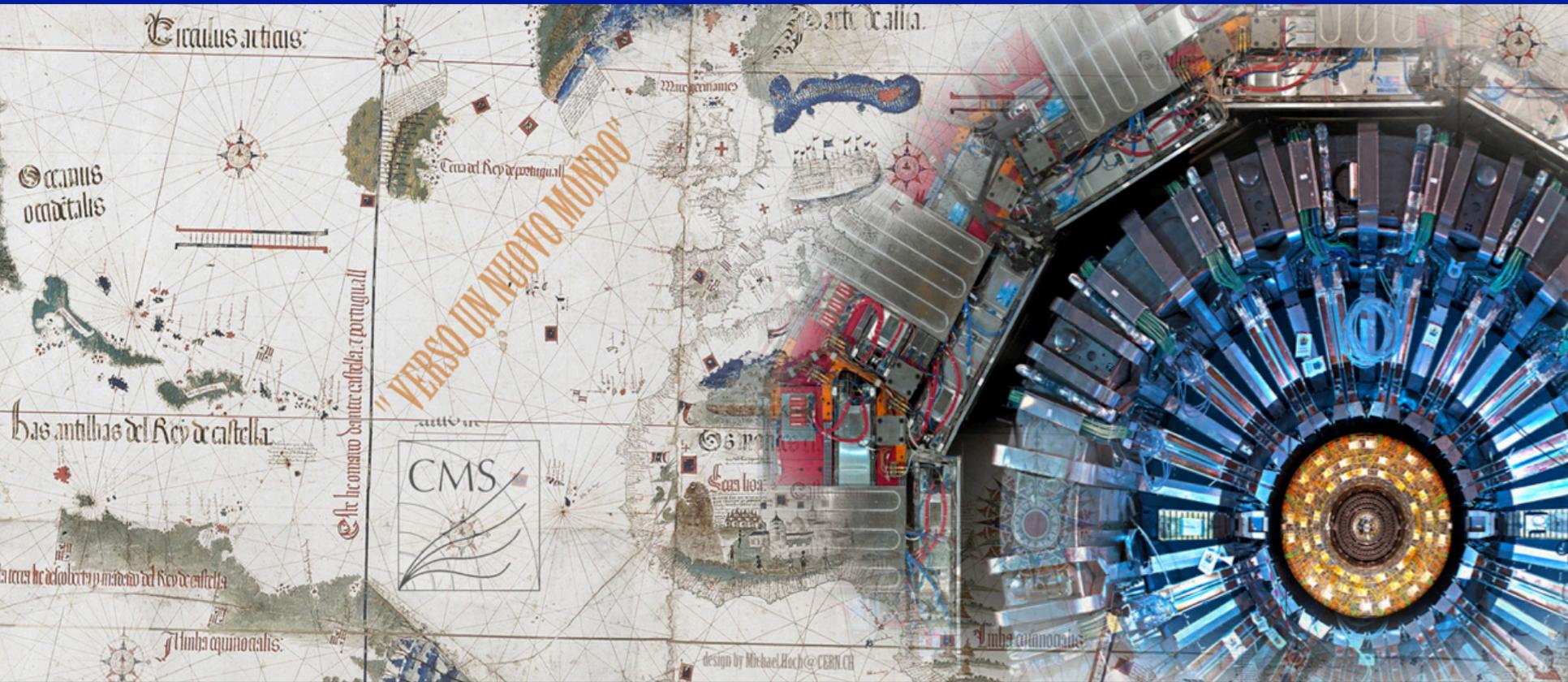


# Scoperte e misure di precisione



Chiara Mariotti INFN-Torino

7-9 settembre 2015, CERN

# Programma per gli insegnanti italiani 2015

*L'insegnante è la persona alla quale un genitore affida la cosa più preziosa che possiede suo figlio: il cervello. Glielo affida perché lo trasformi in un oggetto pensante. Ma l'insegnante è anche la persona alla quale lo Stato affida la sua cosa più preziosa: la collettività dei cervelli, perché diventino il paese di domani.*

*Piero Angela*



Silvia Miozzi e Antonella Del Rosso  
ovvero **“le due tigri del Bengala”** ©  
( Sergio Bertolucci)



Pagina web con molto materiale:

[www.to.infn.it/~mariotti/particelle2.html](http://www.to.infn.it/~mariotti/particelle2.html)

Le lezioni del “primo ciclo”

[https://dl.dropboxusercontent.com/u/9026447/lezioni\\_cern\\_settembre2014\\_1.pptx](https://dl.dropboxusercontent.com/u/9026447/lezioni_cern_settembre2014_1.pptx)

[https://dl.dropboxusercontent.com/u/9026447/lezioni\\_cern\\_settembre2014\\_2.pptx](https://dl.dropboxusercontent.com/u/9026447/lezioni_cern_settembre2014_2.pptx)

[https://dl.dropboxusercontent.com/u/9026447/lezioni\\_cern\\_settembre2014\\_3.pptx](https://dl.dropboxusercontent.com/u/9026447/lezioni_cern_settembre2014_3.pptx)

“Secondo ciclo”:

[https://dl.dropboxusercontent.com/u/9026447/lezioni\\_2ciclo\\_cern\\_settembre2015.pptx](https://dl.dropboxusercontent.com/u/9026447/lezioni_2ciclo_cern_settembre2015.pptx)

# Precisione e nuove scoperte

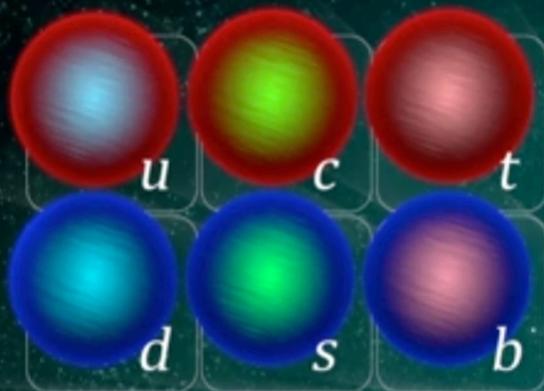
Misurare con precisione delle quantità ben definite teoricamente permette di verificare la teoria e/o i modelli ed eventualmente "scoprire" effetti nuovi.

Cercare nuove particelle o nuovi processi permette di verificare in modo diretto teorie e/o modelli

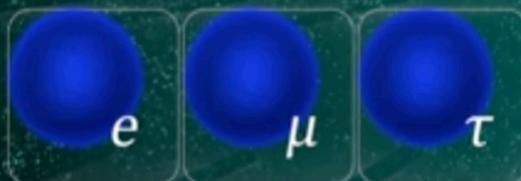
Entrambe le strade devono essere perseguite.

Per spiegare bene cosa intendo dire vorrei tornare indietro di un po' di anni e parlare del  
Modello Standard e di LEP

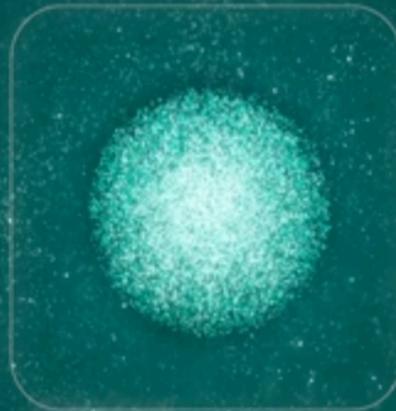
# Il Modello Standard



Quarks



Leptons



Higgs boson



Forces

TABLE 2.1: Properties of the quarks [5].

Quark properties			
Generation	Flavour	Electric charge [ $e$ ]	Mass [MeV]
I	$u$	+2/3	2.3
	$d$	-1/3	4.8
II	$c$	+2/3	1275
	$s$	-1/3	95
III	$t$	+2/3	$173.21 \times 10^3$
	$b$	-1/3	$4.18 \times 10^3$

TABLE 2.2: Properties of the leptons [5].

Lepton properties			
Generation	Flavour	Electric charge [ $e$ ]	Mass [MeV]
I	$e$	-1	0.511
	$\nu_e$	0	$<2 \times 10^{-3}$
II	$\mu$	-1	105.66
	$\nu_\mu$	0	$<2 \times 10^{-3}$
III	$\tau$	-1	1776.82
	$\nu_\tau$	0	$<2 \times 10^{-3}$

TABLE 2.3: Properties of the gauge bosons [5].

Gauge boson properties			
Boson	Electric charge [ $e$ ]	Mass [GeV]	Interaction
$g$	0	0	strong
$\gamma$	0	0	electromagnetic
$W^\pm$	$\pm 1$	80.385	weak
$Z$	0	91.188	weak

# La Lagrangiana del MS

$$\mathcal{L}_{\text{MS}} = \mathcal{L}_{\text{Simmetrica}} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}$$

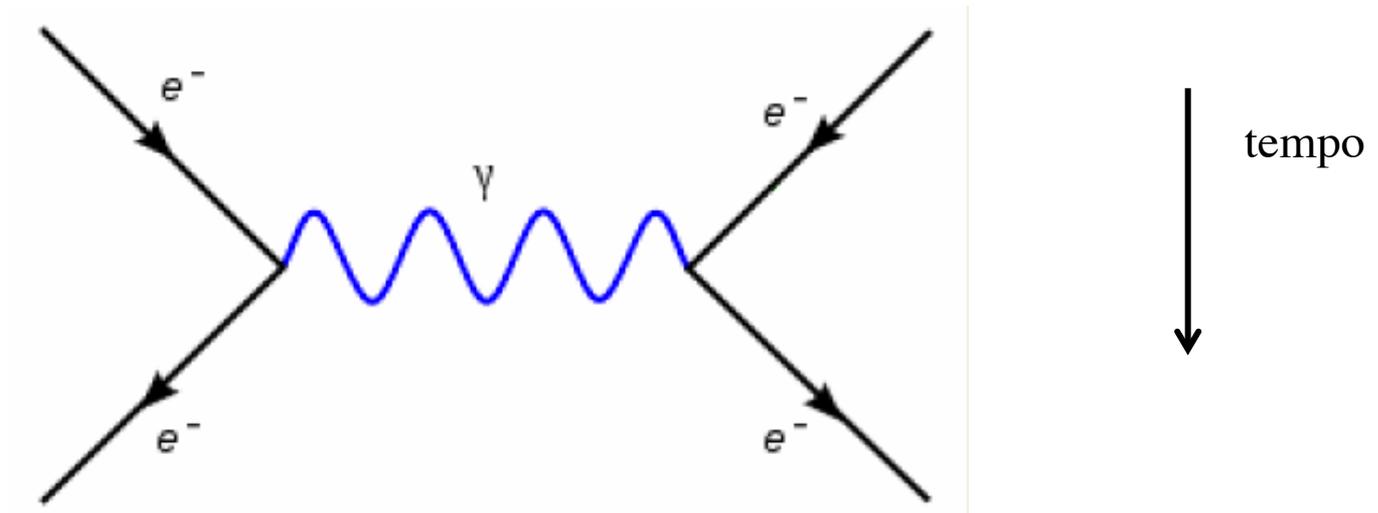
$$\mathcal{L}_{\text{Simmetrica}} = \mathcal{L}_{\text{Particella-libera}} + \mathcal{L}_{\text{Interazione particella-campo}} + \mathcal{L}_{\text{energia cinetica del campo}}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{MS}} = & -\frac{1}{4} \overline{W}_{\mu\nu} \cdot \overline{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} \\ & + \overline{L} \gamma^\mu \left[ i \partial_\mu - g \frac{1}{2} \overline{\tau} \cdot \overline{W}_\mu - \frac{g'}{2} Y B_\mu \right] L \\ & + R \gamma^\mu \left[ i \partial_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right] R \\ & + \left| \left( i \partial_\mu - g \frac{1}{2} \overline{\tau} \cdot \overline{W}_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) \phi \right|^2 - V(\phi) \\ & - G_1 \overline{L} \phi R + G_2 \overline{L} \phi_C R + h.c.\end{aligned}$$

# Le interazioni

I diagrammi di Feynmann non solo descrivono visivamente il processo di fisica, ma permettono di calcolarlo con precisione.

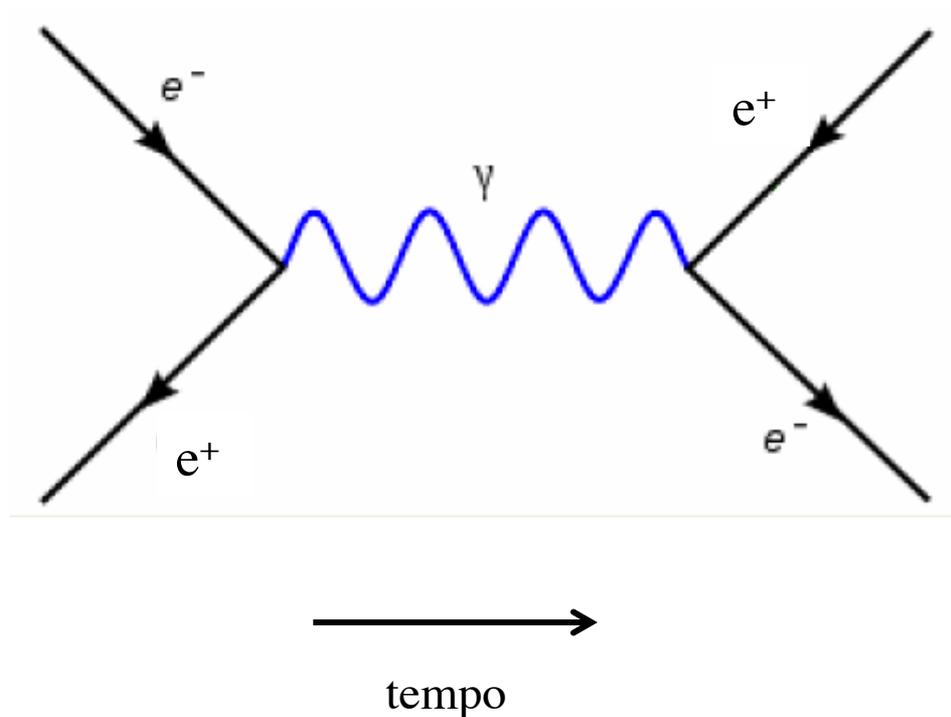
## Interazione elettromagnetica:



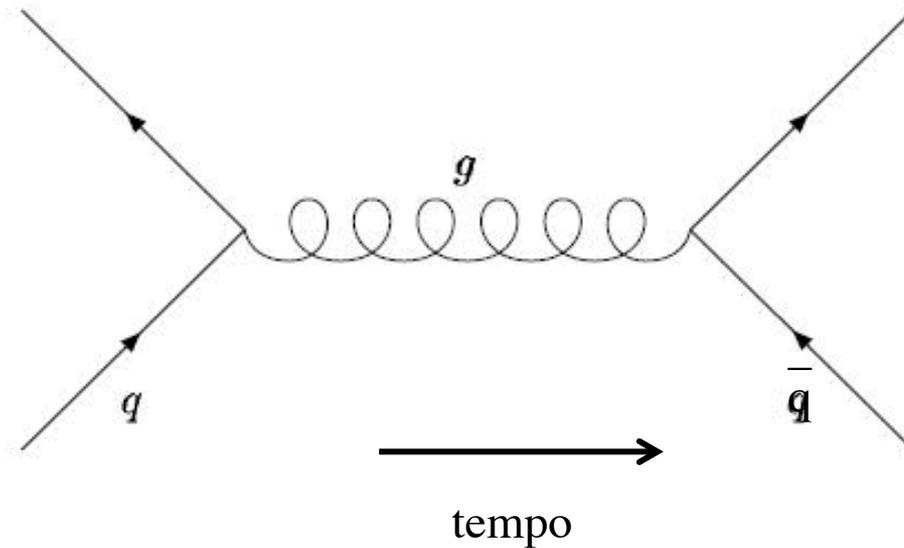
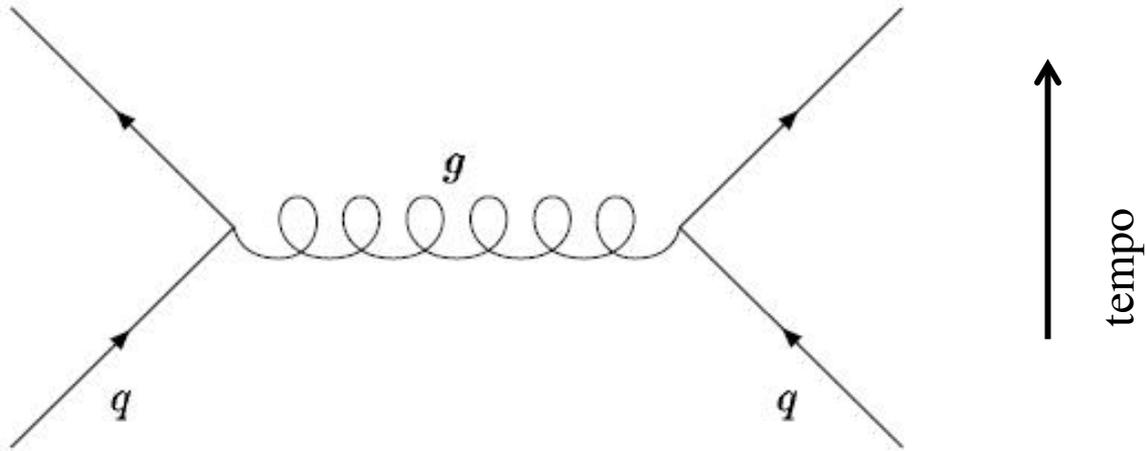
# Le interazioni

I diagrammi di Feynmann non solo descrivono visivamente il processo di fisica, ma permettono di calcolarlo con precisione.

## Interazione elettromagnetica:



# Interazioni Forti

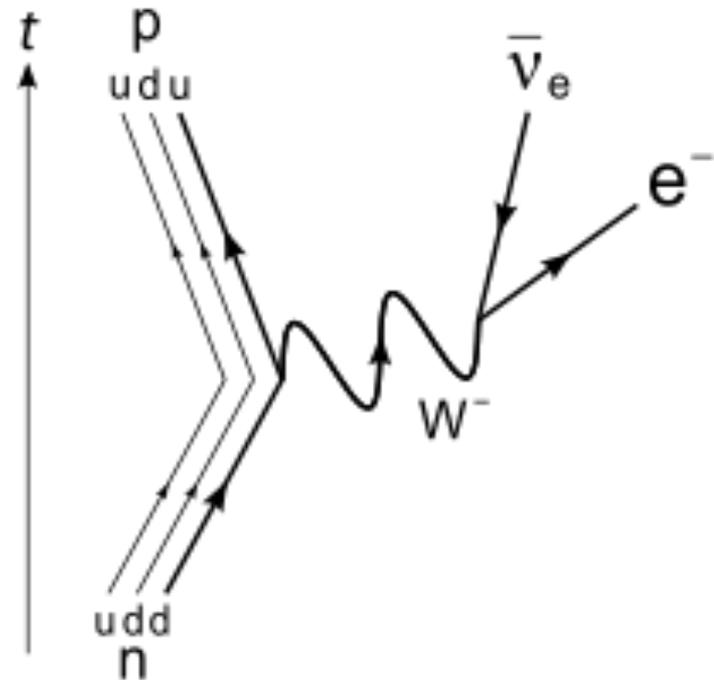
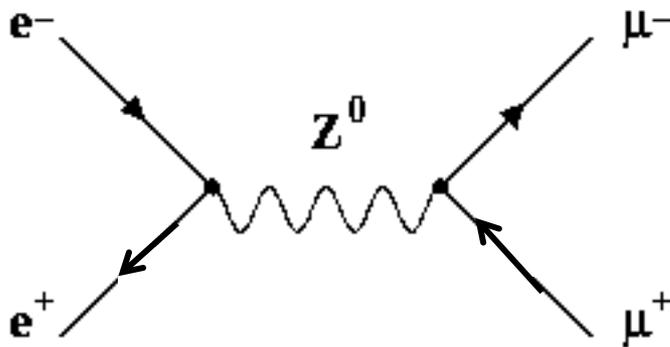


# Interazioni deboli

Il modello standard predice inoltre:

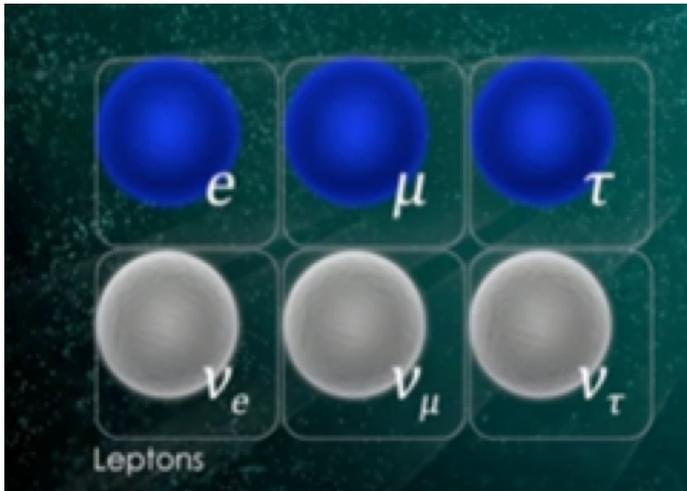
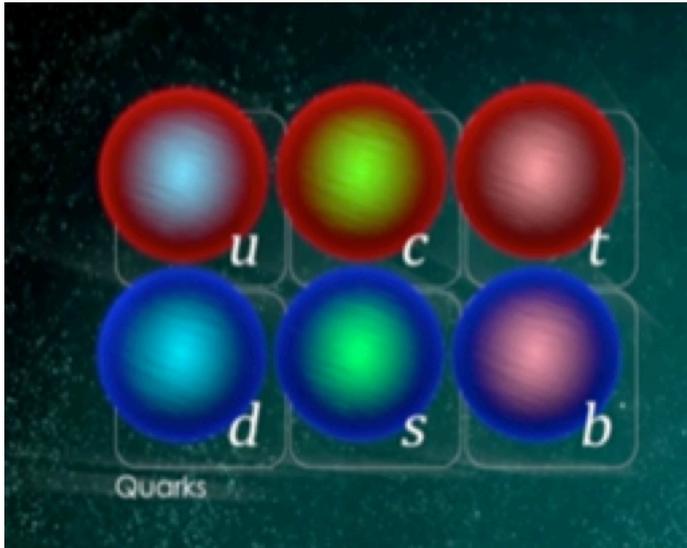
una interazione NEUTRA DEBOLE – mediata dal bosone Z

una interazione CARICA DEBOLE – mediata dai bosoni  $W^+$  e  $W^-$



Per poter senza dubbio capire se l'interazione e' DEBOLE e non Elettromagnetica, come si puo' fare?

# Le Particelle e le loro interazioni



## Quark:

Interagiscono in modo:  
Elettromagnetico,  
Forte  
Debole

## Leptoni carichi (e, mu, tau) :

Interagiscono in modo:  
Elettromagnetico,  
Debole

## Neutrini:

Interagiscono solo in modo:  
Debole

# Scoperta correnti deboli, 1973

Nel 1973 l'esperimento Gargamelle al PS (Proton Synchrotron) del Cern scopre le interazioni di corrente debole neutra.

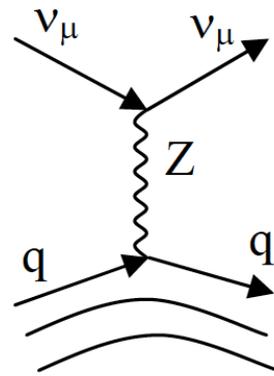
Nel 1970 erano disponibili al CERN fasci di neutrini (vd S.Gilardoni)

Neutrini e Anti-Neutrini incidenti su camera a bolle riempita con liquido pesante (Freon di densita'  $1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )

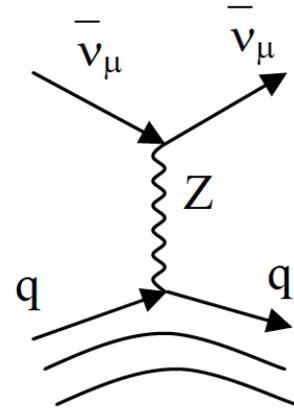
**NC**

$$\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \nu_\mu / \bar{\nu}_\mu + had$$

**Assenza di  $\mu^\pm$  nello stato finale**



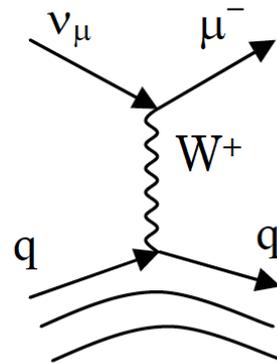
e



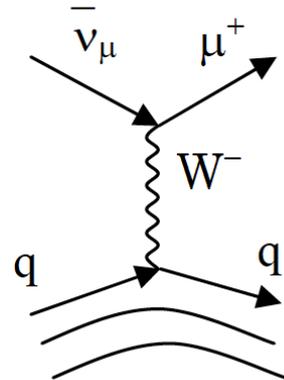
**CC**

$$\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \mu^- / \mu^+ + had$$

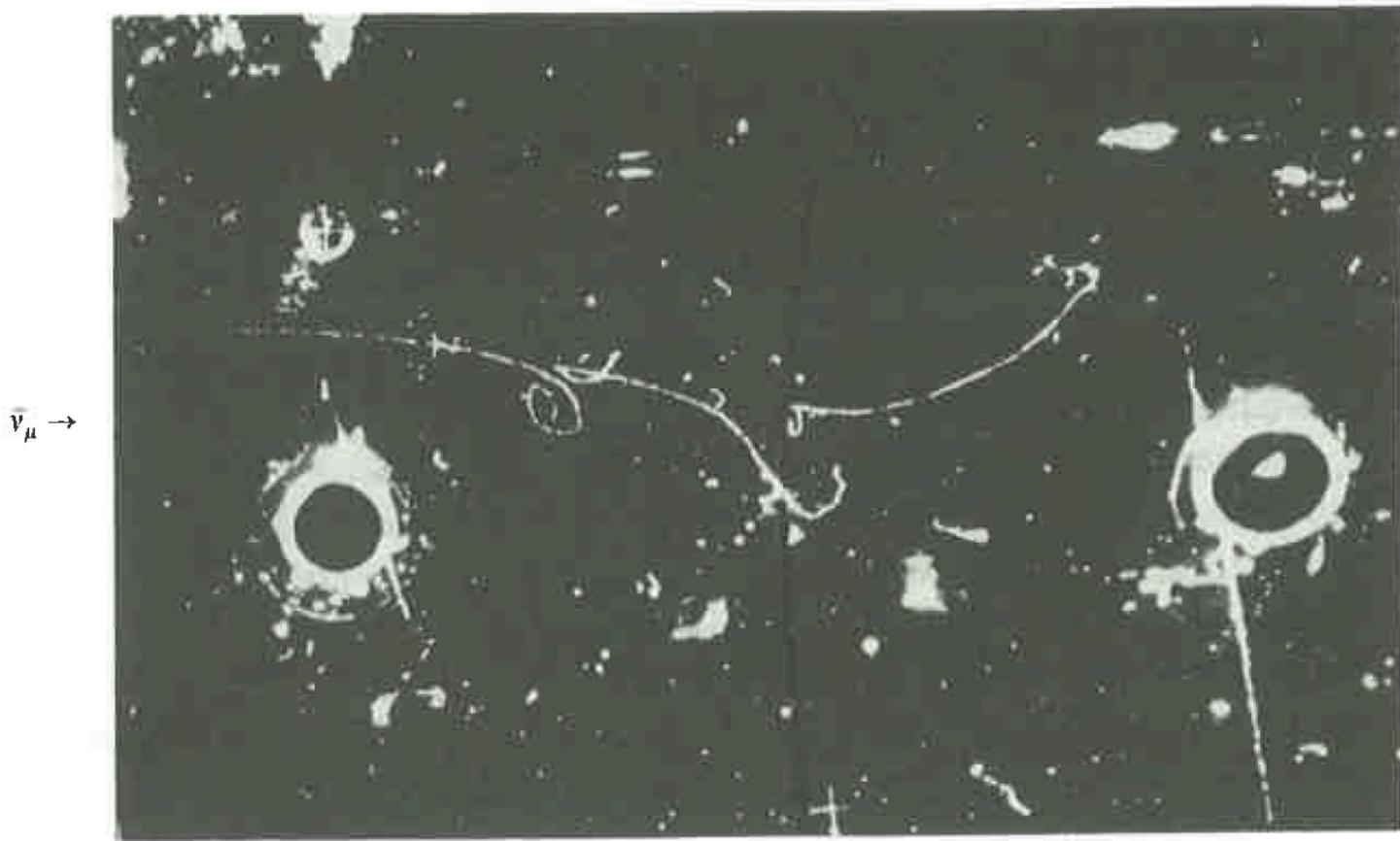
**Presenza di  $\mu^\pm$  nello stato finale**



e

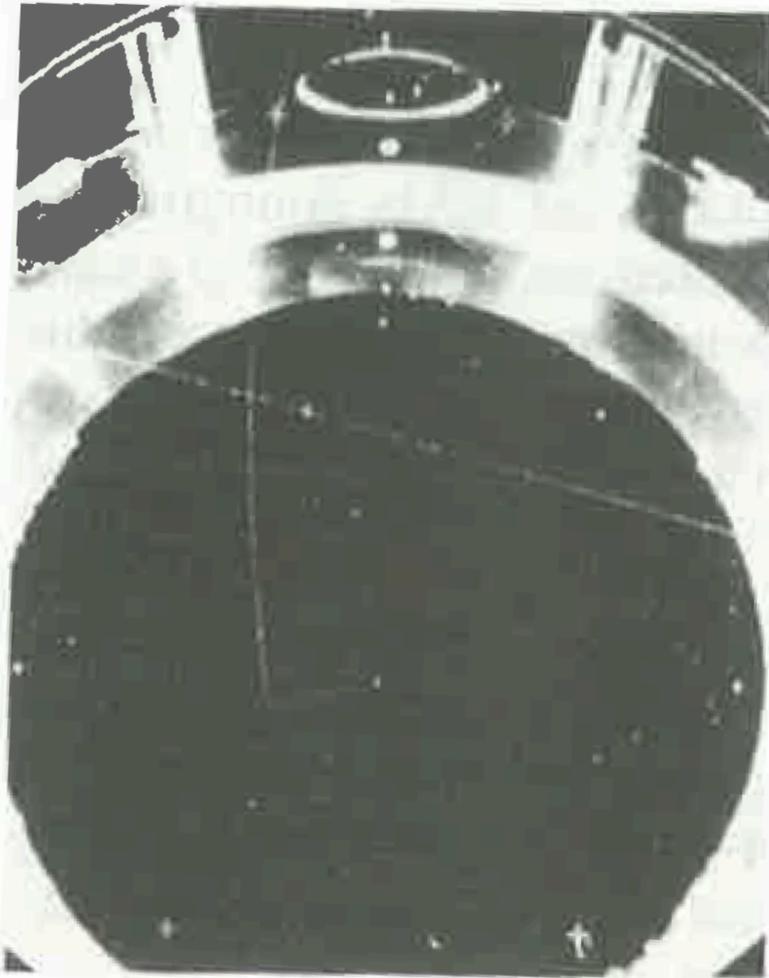


# Corrente neutra di anti-neutrini



**Figure 1.6** First example of weak neutral-current process  $\bar{\nu}_\mu + e \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e$  observed in heavy-liquid bubble chamber Gargamelle at CERN irradiated with a  $\bar{\nu}_\mu$  beam (Hasert *et al.*, 1973). A single electron of energy 400 MeV is projected at a small angle ( $1.5 \pm 1.5^\circ$ ) to the beam, and is identified by bremsstrahlung and pair production along the track (see Chapter 2). About  $10^9$   $\bar{\nu}_\mu$ 's traverse the chamber in each pulse and three such events were observed in 1.4 million pictures. (Courtesy CERN.)

# Interazione Carica: $\nu+n \rightarrow \mu+p$



**Figure 7.13** Early examples of “elastic” neutrino interactions observed in a heavy-liquid bubble chamber at CERN in 1963. (a) shows an event attributed to the reaction  $\nu_{\mu} + n \rightarrow p + \mu^{-}$ . The noninteracting muon passes out of the chamber, and the recoil proton comes to rest inside the chamber. (b) First neutrino interaction with a nucleon,  $\nu + n \rightarrow p + e^{-}$ .



(b)

(b) Event produced by interaction of an electron-neutrino  $\nu_e$ :  $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$ . The incident beam consists mostly of muon-neutrinos  $\nu_\mu$ , with a very small admixture of  $\nu_e$  ( $\sim \frac{1}{2}\%$ ) from the three-body decays in flight,  $K^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$ . The high-energy electron secondary is recognized by the characteristic shower it produces by the processes of bremsstrahlung and pair production. (Courtesy CERN.)



# I fasci di neutrini:

Un fascio di neutrini viene prodotto da un fascio di protoni che incide su un bersaglio producendo nello stato finale pioni e kaoni. Questi a loro volta decadono in una coppia di muone e neutrino. I pioni e i kaoni vengono selezionati in momento con magneti deflettori e poi mandati nel "tunnel di decadimento", dove ne decadrà una frazione che dipende dalla vita media della particella e dalla lunghezza del tunnel:

$N(t) = N(0) \exp(-t/\tau)$       numero di particelle di vita media  $\tau$  decadute dopo un tempo  $t$

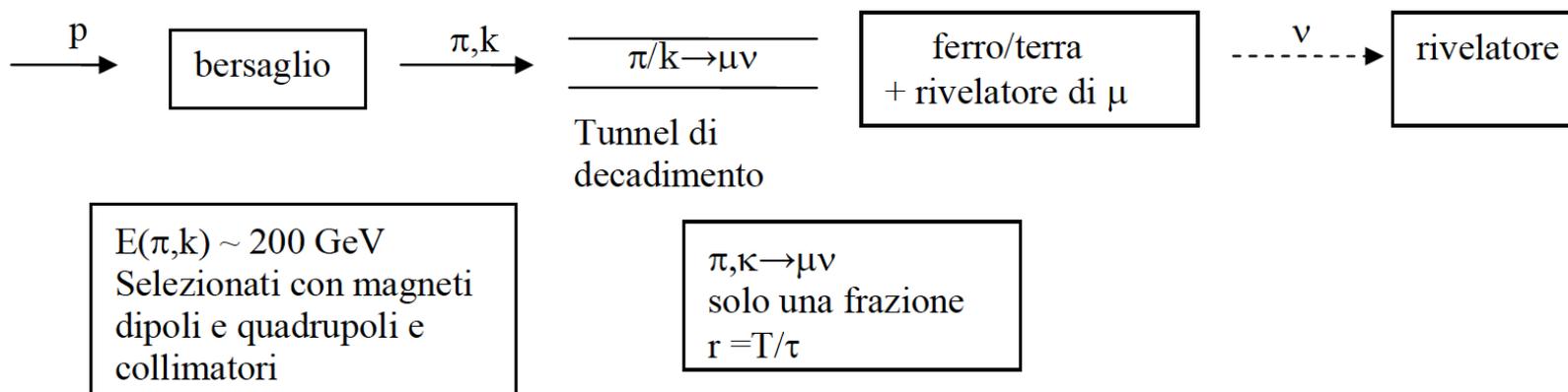
$S = \gamma\beta c\tau$       spazio percorso dalla particella di vita media  $\tau$  e velocità  $\beta$

$V =$  lunghezza del tunnel

$\Rightarrow r = V/S$  frazione di particelle decadute nel tunnel

Deviando o fermando tutte le particelle cariche prodotte si possono estrarre fasci di neutrini con dati intervalli di momento.

$p \rightarrow$  bersaglio  $\rightarrow \pi, k \rightarrow$  decadimento in  $\mu + \nu \rightarrow \nu$



L'energia del neutrino è correlata con la distanza del neutrino dal centro del fascio.

I fasci al PS avevano tipicamente  $E(\nu) = 50 \div 100 \text{ GeV}$  (pioni) ed  $E(\nu) = 150 \div 200 \text{ GeV}$  (kaoni).

Il fascio è essenzialmente di neutrini muoni ( $\nu_\mu$ ) con una contaminazione di  $10^{-4}$  di neutrini elettronici  $\nu_e$  ( $R(\nu_\mu/\nu_e) \sim (m_\mu/m_e)^2$ ).

# Intermezzo: scoperta del positrone

Vediamo le particelle sfruttando i meccanismi con cui interagiscono con la materia  
– Esempio: le particelle cariche ionizzano la materia al loro passaggio



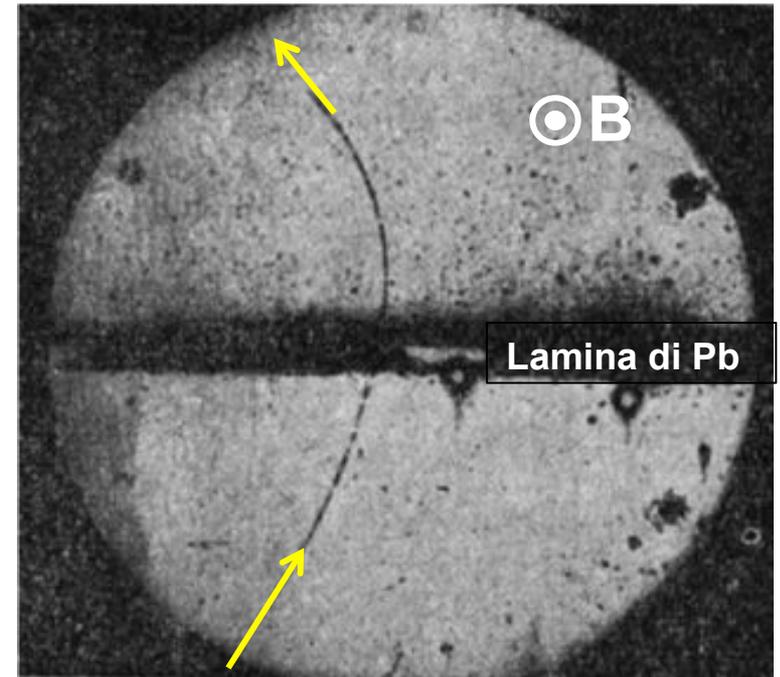
**Camera a nebbia** (Wilson, 1911; premio Nobel 1927):  
Camera riempita di vapore saturo che condensa a seguito della ionizzazione, rendendo visibile la traccia

## Scoperta del positrone ( $e^+$ )

(Andersen, 1932; premio Nobel 1936):

Osservando *raggi cosmici* attraverso una camera a nebbia immersa in un campo magnetico che ne curva la traiettoria, con una lastra di piombo per assorbire parte dell'energia

(1928 Dirac introduced the anti-matter)





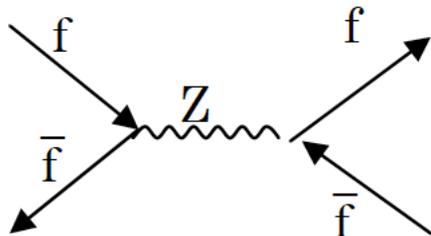
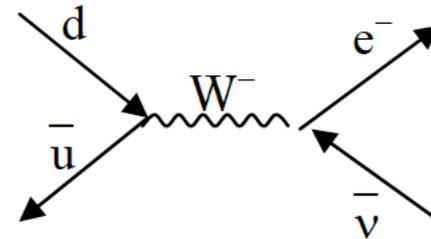
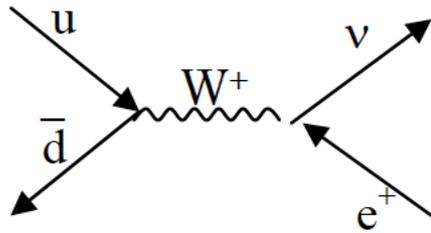
# Scoperta W e Z: 1983

La misura di  $\sin^2\theta_W$  da parte di Gargamelle (confermata poi da altri esperimenti con neutrini) permise la stima delle masse dei bosoni W e Z:

Per  $\sin^2\theta_W \sim 0.23$ :  $m_W = 80 \text{ GeV}/c^2$   $m_Z = 92 \text{ GeV}/c^2$

Per produrre  $W^\pm \rightarrow \sqrt{s(ff)} \cong 100 \text{ GeV}$  (dove i fermioni possono essere:  $u\bar{d}, d\bar{u}, e\bar{\nu}, \bar{e}\nu$ )

Per produrre Z  $\rightarrow \sqrt{s(ff)} \cong 100 \text{ GeV}$  (dove i fermioni possono essere:  $u\bar{u}, d\bar{d}, e\bar{e}$ )



# L'idea di Rubbia

Per produrre un bosone W o Z, considerando che ci sono 3 quark dentro un protone, si devono accelerare protoni e farli scontrare con antiprotoni raggiungendo energie nel centro di massa (protone - antiprotone) di :

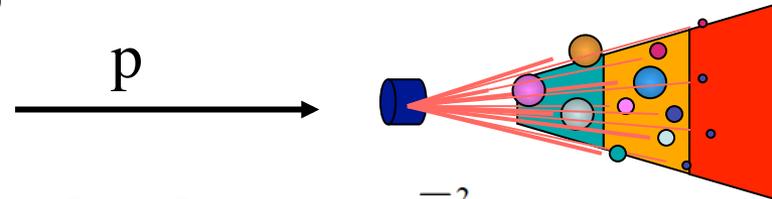
$$\sqrt{S_{p\bar{p}}} = 400 \div 600 \text{ GeV}$$

Gli acceleratori al CERN alla fine degli anni 70 non raggiungevano tali energie:

Il Super-proto-Sincrotrone - SpS - di raggio 1100 m raggiungeva

$$E_{\text{max}}(\text{protone}) = 400 \text{ GeV}$$

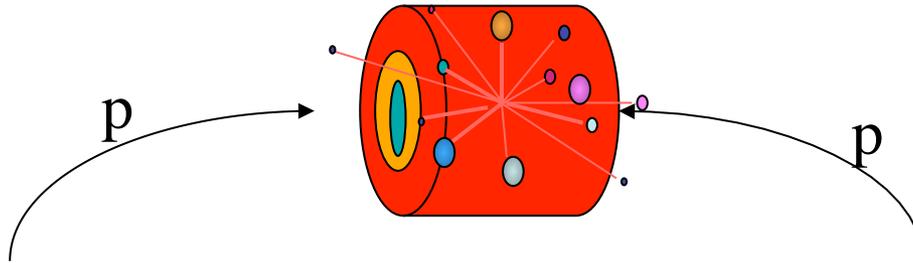
E funzionava come acceleratore su bersaglio fisso



$$\begin{aligned}(\sqrt{s})^2 &= (p_1 + p_2)^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 = E_1^2 + m_2^2 + 2E_1m_2 - \vec{p}_1^2 = \\ &= m_1^2 + m_2^2 + 2E_1m_2 \\ &= 2m_p(E_1 + m_p) = 800 \quad \text{GeV} \\ \Rightarrow \quad \sqrt{s} &= 20 \div 30 \quad \text{GeV}\end{aligned}$$

# L'idea di Rubbia

L'idea di Rubbia fu quella di trasformare il SpS in SppS



Per l'  $Sp\bar{p}S$  :

$$(\sqrt{s})^2 = 4E_1^2 \Rightarrow \sqrt{s} = 800 \text{ GeV}$$

Sufficienti a produrre W e Z !

# Il premio Nobel

Il problema grosso era ottenere un **fascio di anti-protoni** sufficientemente intenso per poter produrre W e Z.

$$\text{Rate di interazione} = L \times \sigma = \frac{n_1 n_2 f_0}{\pi/4 \rho^2} \times \sigma$$

$n_1, n_2$  : numero di particelle per fasci,  
 $f_0$  : frequenza di rotazione,  
 $r$  : sezione trasversa del fascio ( $\sim 100$  mm))

$$\sigma \cdot BR(p\bar{p} \rightarrow W + X \rightarrow e\nu + X) = 0.5 \times 10^{-33} \text{ cm}^2$$

$$\text{Rate} = \frac{n_1 n_2 f_0}{\pi/4 (0.01)^2 \text{ cm}^2} \times 0.5 \times 10^{-33} \text{ cm}^2 = n_1 n_2 f_0 \times 10^{-29} \text{ s}^{-1}.$$

Ovvero bisognava ottenere  $n_1, n_2$  ed  $f$  molto grandi per compensare  $\sigma \times BR$ .

# Il premio Nobel

Il fascio regolare di protoni del SpS poteva essere usato per creare anti-protoni, che venivano catturati e accumulati. Gli anti-protoni rientravano poi nel Sp̄pS ma in direzione opposta ai protoni.

Van der Meer inventa un modo (lo "stochastic cooling") per comprimere il fascio di antiprotoni di modo da farlo diventare denso a sufficienza (→ Simone!)

Nel 1978 fu deciso l' Sp̄pS

Nel 1981 Sp̄pS inizio' i lavori.

Nel 1982 i due esperimenti (UA1 e UA2) all'Sp̄pS iniziarono a prendere dati.

Nel 1983 UA1 scopre il W (seguiti, dopo pochi giorni, da UA2).

→ **Rubbia e Van der Meer prendono il premio Nobel.**

# Primo test di consistenza

La scoperta del bosone Z seguì rapidamente quella del W.

Nel run successivo l'aumento l'energia nel centro di massa da

540 GeV a 630 GeV, fondamentali per produrre un bosone Z a riposo, (considerando che il bosone Z ha una massa di circa 10 GeV più alta del bosone W e considerando 3 quark per protone).

$$\rightarrow \quad \mathbf{M_W = 80.5 \pm 0.5 \text{ GeV}/c^2} \quad \quad \mathbf{M_Z = 93 \pm 2.9 \text{ GeV}/c^2}$$

Un primo test del modello standard era dunque possibile:

$$M_W^2 = M_Z^2 \cos^2 \theta_W \quad \Rightarrow \quad \sin^2 \theta_W = 0.220 \pm 0.009$$

In accordo con gli esperimenti con neutrini.

Inoltre:

$$\rho = \frac{M_W^2}{M_Z^2 \cos^2 \theta_W} = 1.000 \pm 0.036$$

compatibile con il modello standard di Glashow Salam e Weinberg.

# L'origine di LEP

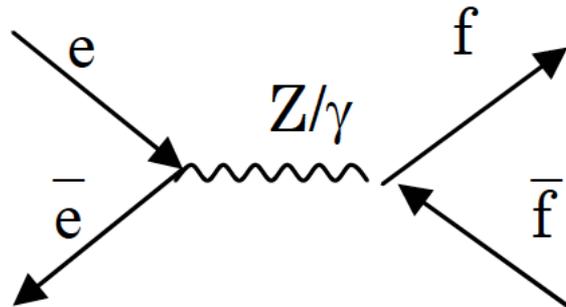
Dopo la scoperta dei bosoni W e Z e la misura della loro massa a qualche percento agli esperimenti UA1 e UA2, l'idea di misurare con precisione le caratteristiche dei due bosoni come test stringente del Modello Standard divenne quasi una "necessita".

Il modo migliore per studiare con precisione le caratteristiche dei due bosoni di gauge e' di produrli ad un collider elettroni / positroni.

**Perche' e+e-?**

$$e^+ e^- \rightarrow Z \rightarrow f \bar{f}$$

**la semplicita' dello stato iniziale si trasmette allo stato finale:**

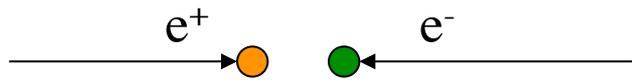


f = e, mu, tau, quark

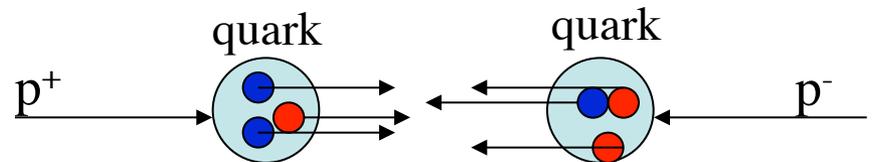
# Perche' e+e- ?

La Z viene prodotta in risonanza (secondo una Breit e Wigner) nell'urto elettrone/positrone e non e' accompagnata da altre particelle. Per cui nello stato finale ci saranno solo i prodotti di decadimento della Z

Al contrario in urti protone/anti-protone  $p\bar{p} \rightarrow Z + X$



Urto "pulito",  $E = E(e^+) + E(e^-)$



Urto "complesso",  $E < 1/3(E(p^+) + E(p^-))$

solo due dei quark producono la Z mentre gli altri quark e gluoni interagiscono e producono particelle nello stato finale. La Z e' creata assieme ad altre particelle. In tal caso solo gli stati finali in cui la Z decade leptonicamente sono studiabili con facilità, in quanto si riesce a distinguere il segnale dal fondo. Gli stati finali in cui la Z decade adronicamente sono difficilmente distinguibili dal fondo adronico non risonante.

# Perché $e^+e^-$ ?

Inoltre in un urto elettrone/positrone l'energia dello stato iniziale

$\sqrt{s(e^+e^-)}$  e' nota con precisione

mentre l'energia dell'urto tra due quark dei protoni  $\sqrt{s(q\bar{q})}$   
non e' misurabile, ma si conosce solo in media e tramite le  
funzioni di struttura.

L'idea originale di un collisionatore  
di elettroni e positroni fu di

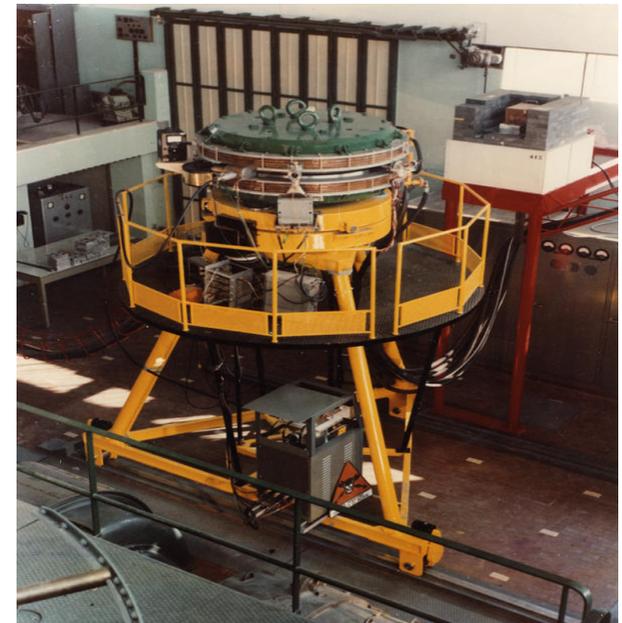
**Bruno Touschek** (Frascati)

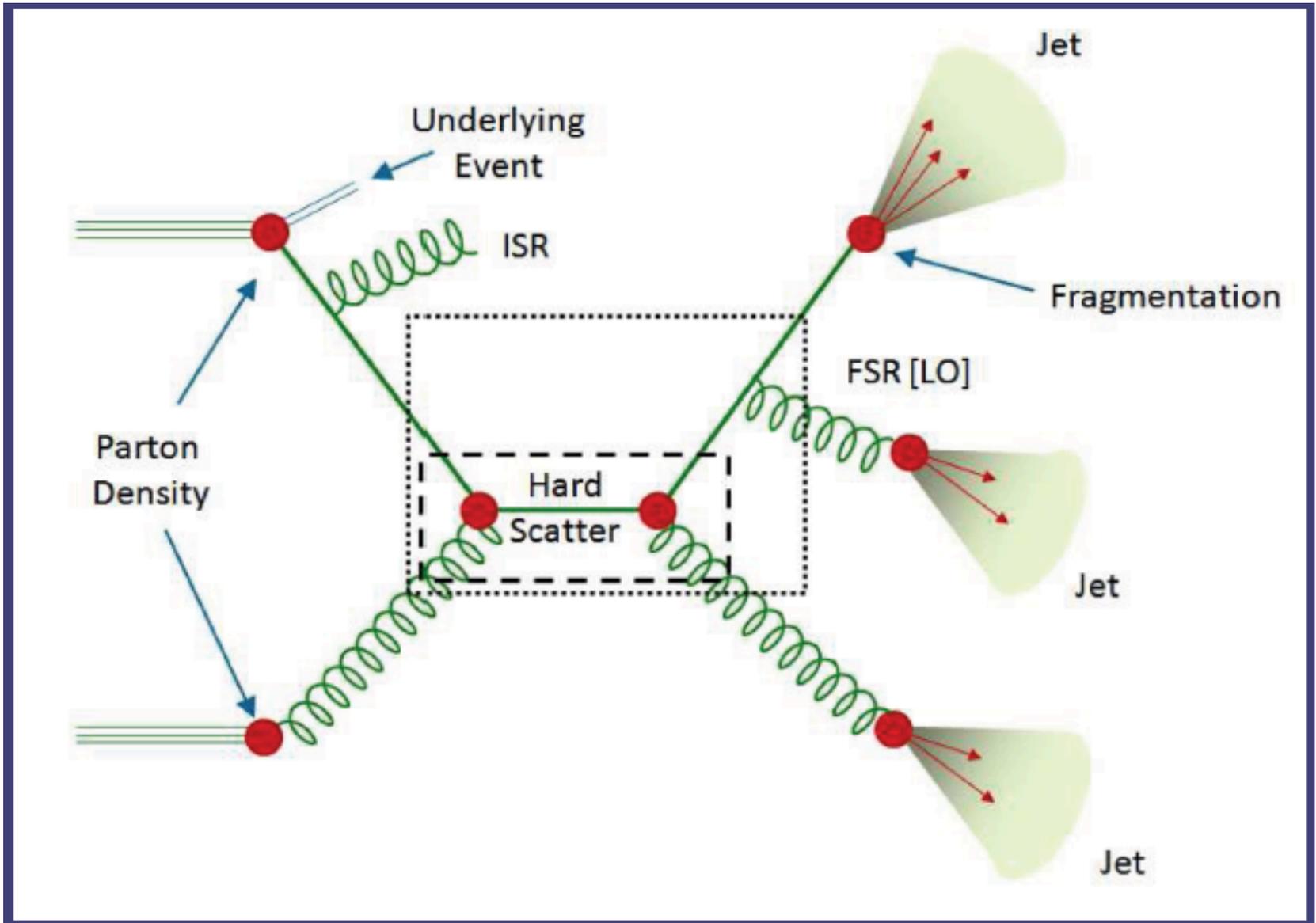
Il primo anello  $e^+e^-$  fu **ADA**

(dal nome della sua zia preferita di B.T!)  
a Frascati nel 1961:

**Raggio di 65 cm,  $E(e) = 0.250$  GeV**

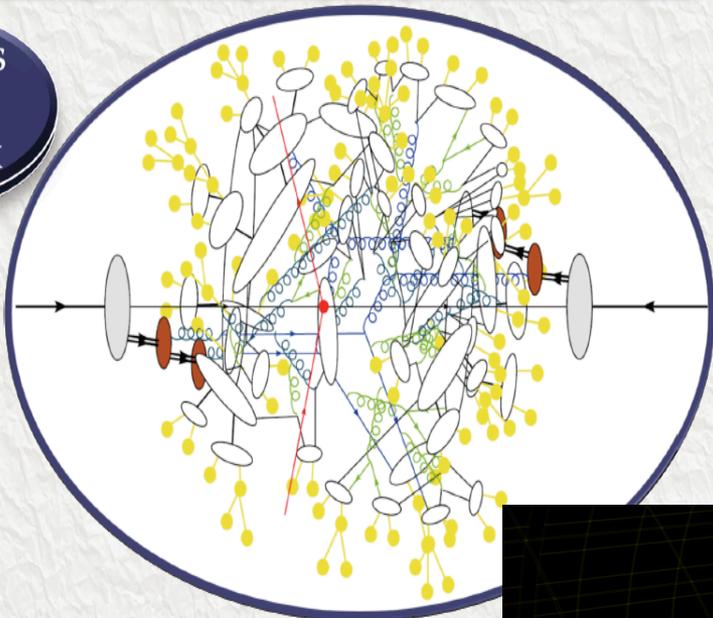
AdA = Anello di Accumulazione



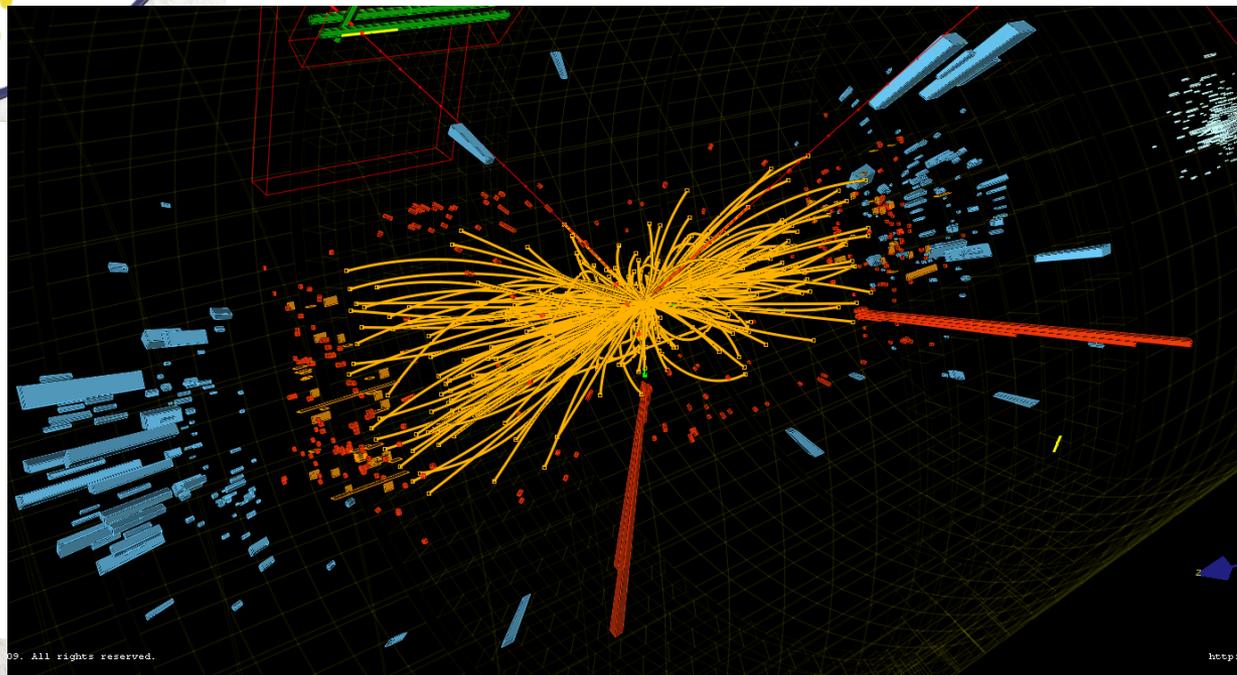


# La realta' e piu' complessa

Reality is  
more  
complex



La comprensione della “QCD”  
(Quanto Cromo Dinamica. i.e.  
interazione tra quark)  
e' importante per  
-l'interpretazione dei dati  
-studi di precisione  
-ricerca di nuove particelle



Fu dunque proposto un nuovo acceleratore di elettroni e positroni per studiare con precisione il W e la Z, determinare il numero di famiglie di leptoni, cercare il top .... → misurare con precisione i parametri del modello standard:

## **LEP: Large Electron Positron collider**

### **Perché Large ?**

Si vuole andare ad alta energia:

~100 GeV (i.e. 50 GeV per fascio) per produrre la Z (LEP1)

~200 GeV (i.e. 100 GeV per fascio) per produrre 2 W (LEP2)

e dunque il raggio dell'anello deve essere molto grande, perché gli elettroni e i positroni irradiano energia se curvati in un campo magnetico (radiazione di sincrotrone):

La potenza persa per radiazione di sincrotrone va come

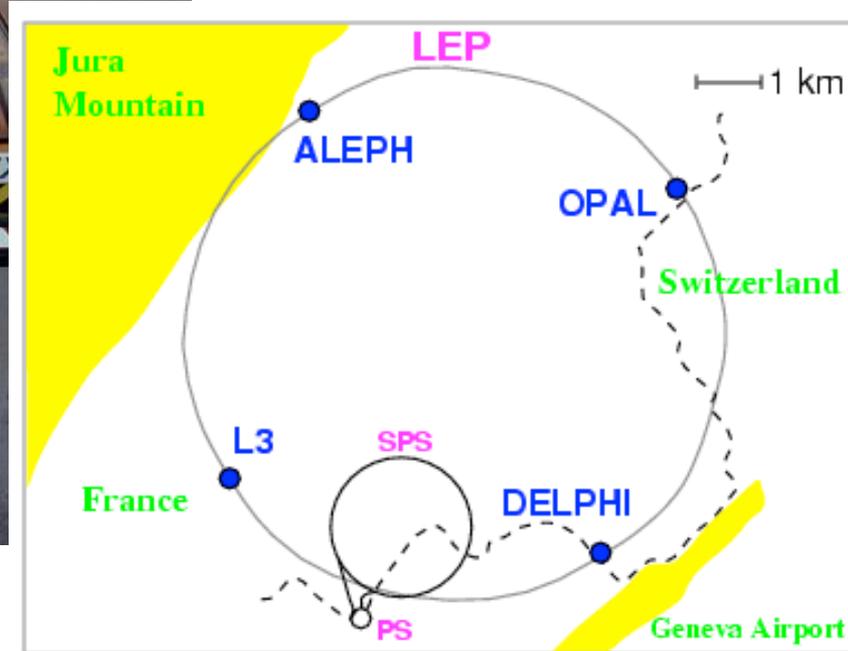
l'energia della particella accelerata alla 4 potenza  $\sim E^4$

come l'inverso del raggio della macchina al quadrato  $\sim 1/r^2$ .

LEP1 P~30 MeV  
LEP2 P~2.5 GeV



**LEP**



## Large Electron Positron collider

anello di 27 Km di circonferenza, 100 m sotto terra

1983: inizio scavi - più grande lavoro di ingegneria civile europeo

agosto 1989: prima interazione a  $E=91$  GeV

1995 - 2000:  $E=130 - 209$  GeV

11 anni di costruzione  
12 anni di presa dati  
~350 x 4 articoli di fisica !

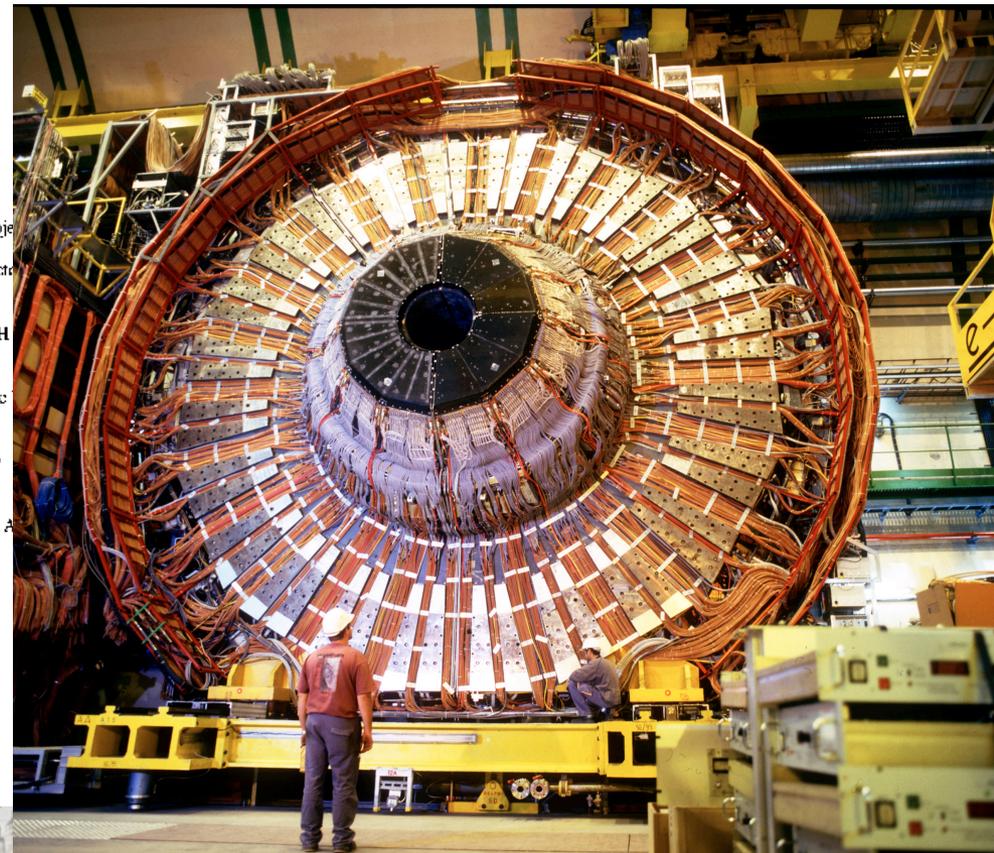
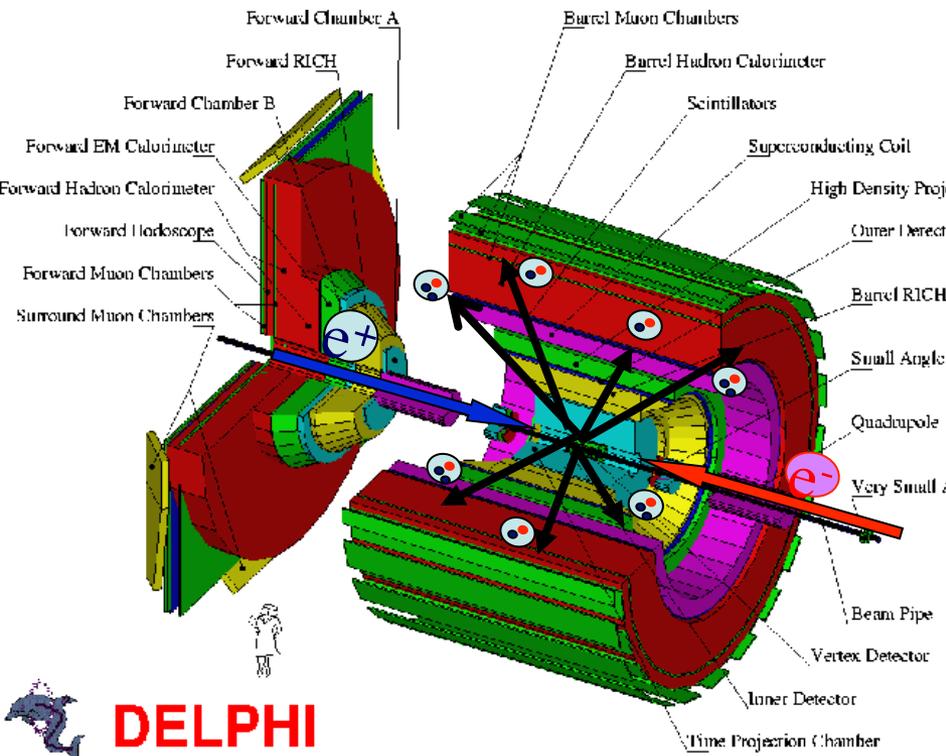
Molti italiani coinvolti sull'acceleratore LEP: E.Picasso direttore LEP

## 4 grandi esperimenti: ALEPH, DELPHI, L3 e OPAL

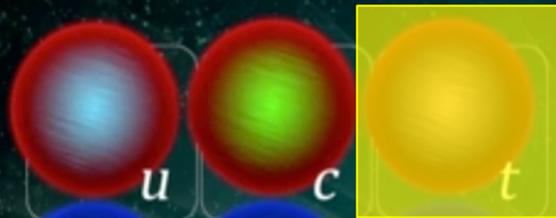
Capi esperimento Italiani: U.Amaldi, A.Michelini, L.Foa, L.Rolandi, T.Camporesi,  
R.Tenchini + 2 premi nobel: S.Ting e J.Steinberger.

Responsabili della fisica Italiani: S.Gentile, C.Mariotti, S.Mele, G.Rolandi, R.Tenchini

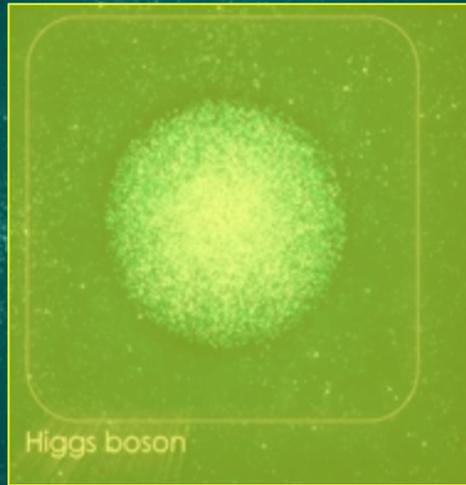
Per la **teoria** del Modello Standard: dominanza di **teorici** italiani



# All'epoca di LEP



Quarks

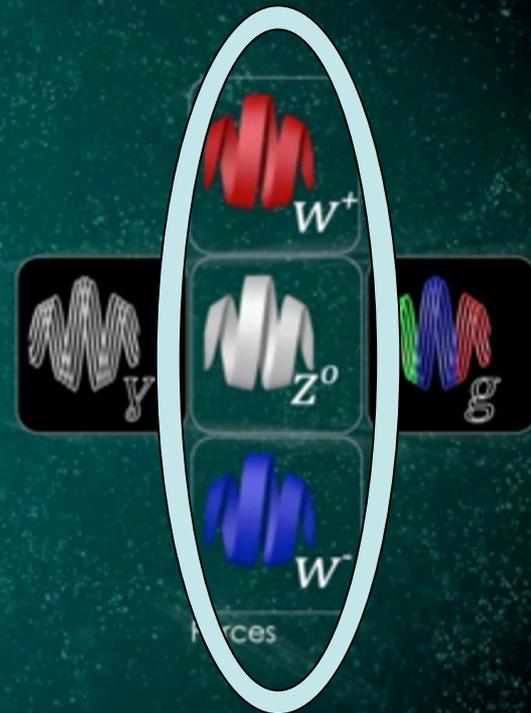


Higgs boson



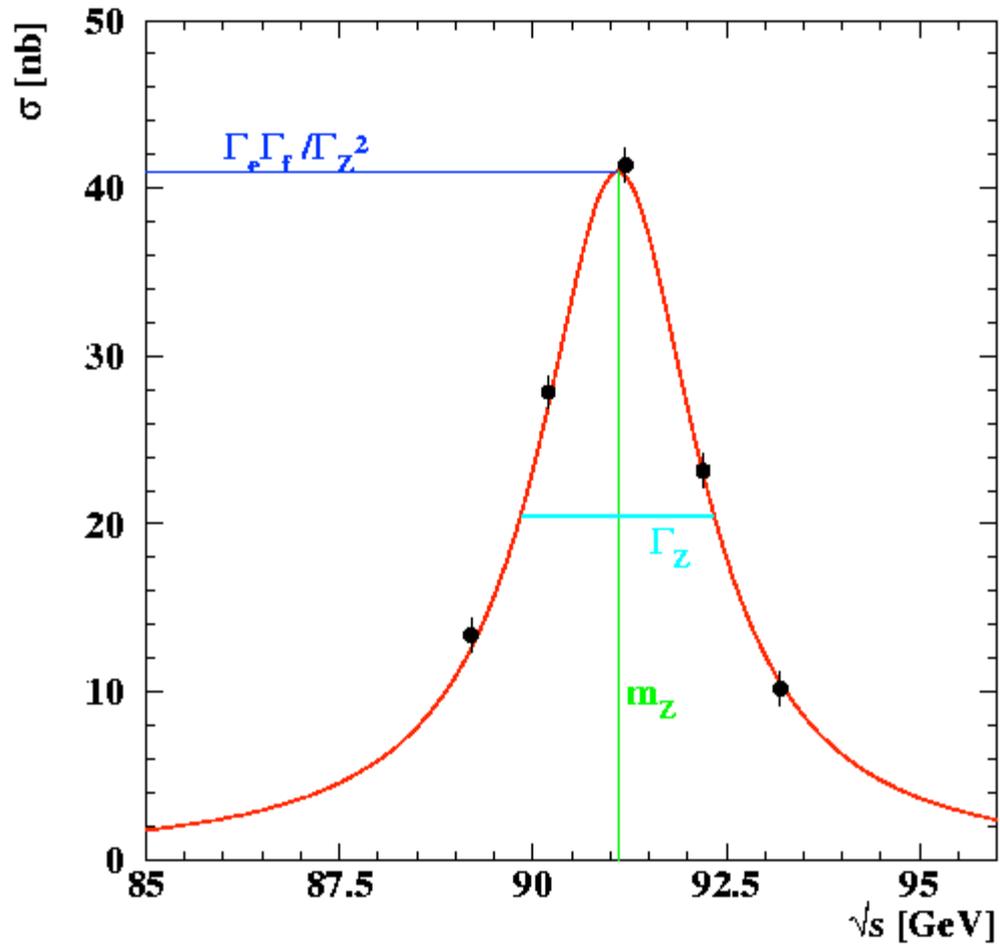
Leptons

Appena scoperti a UA1/UA2



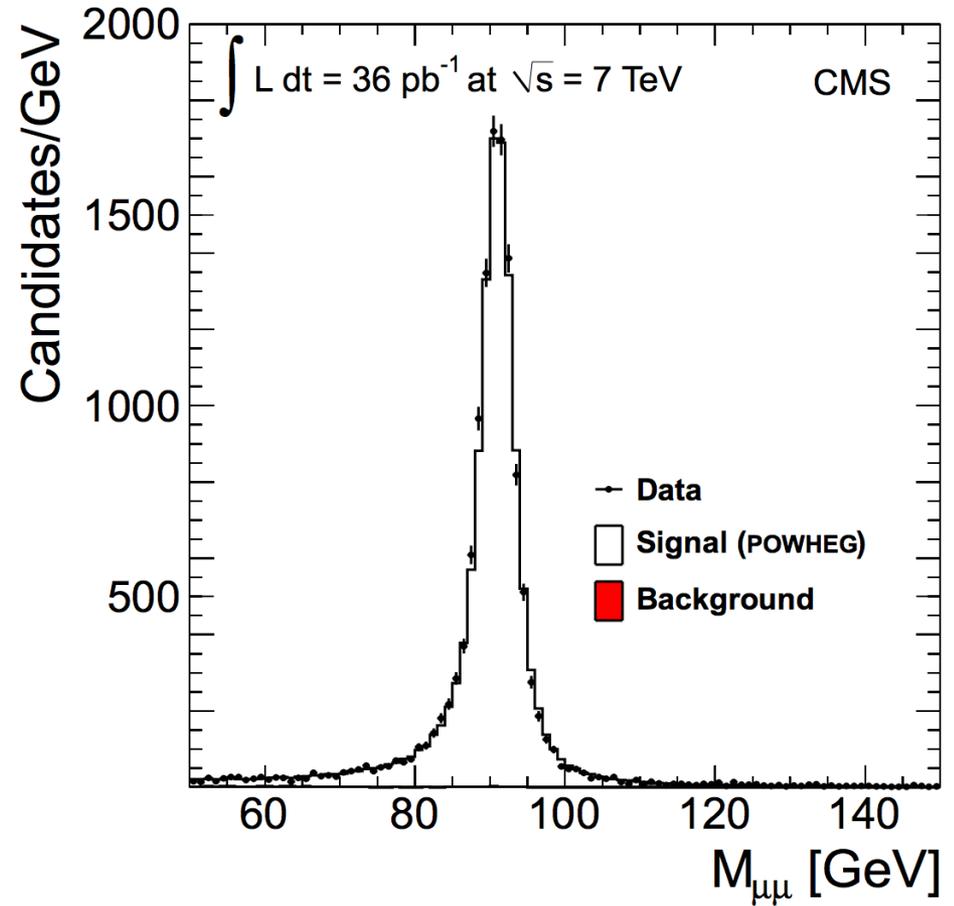
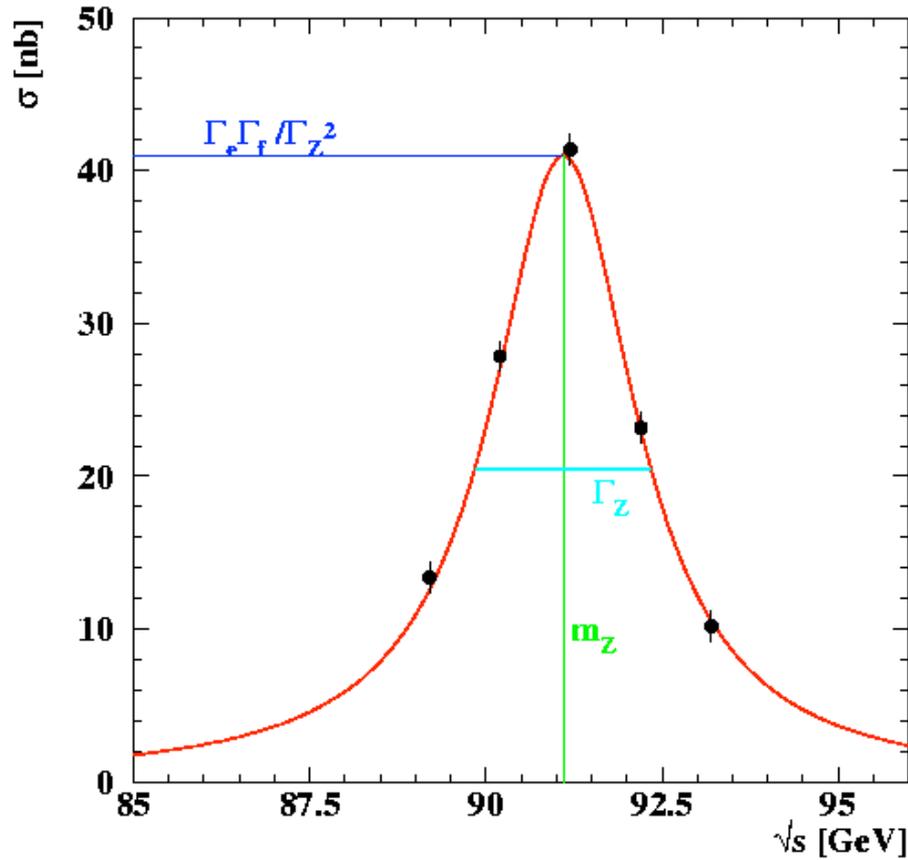
# La fisica di precisione

## La LINE-SHAPE della Z

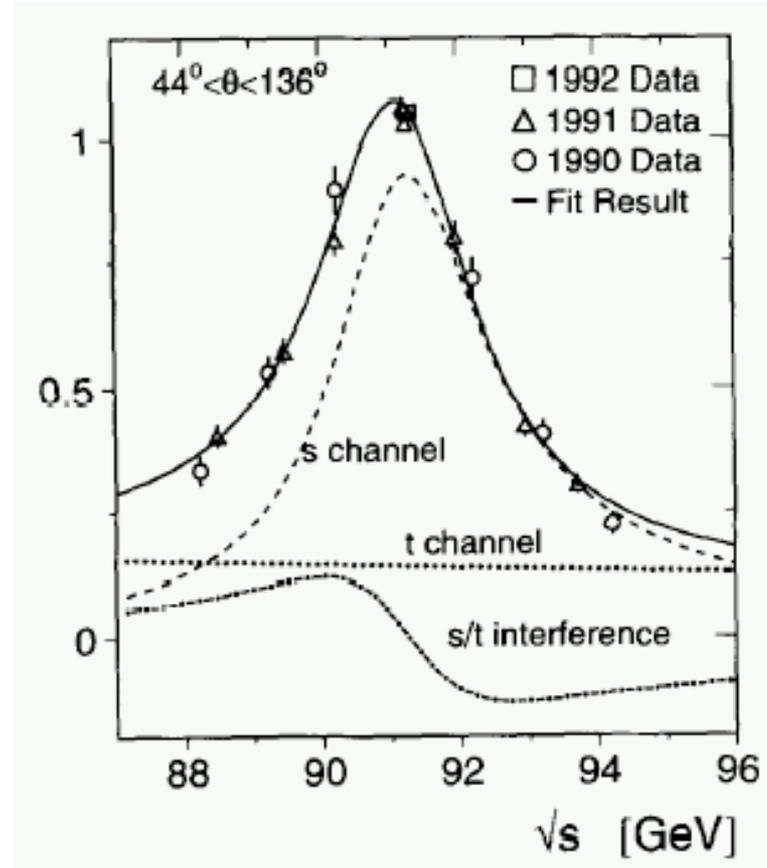
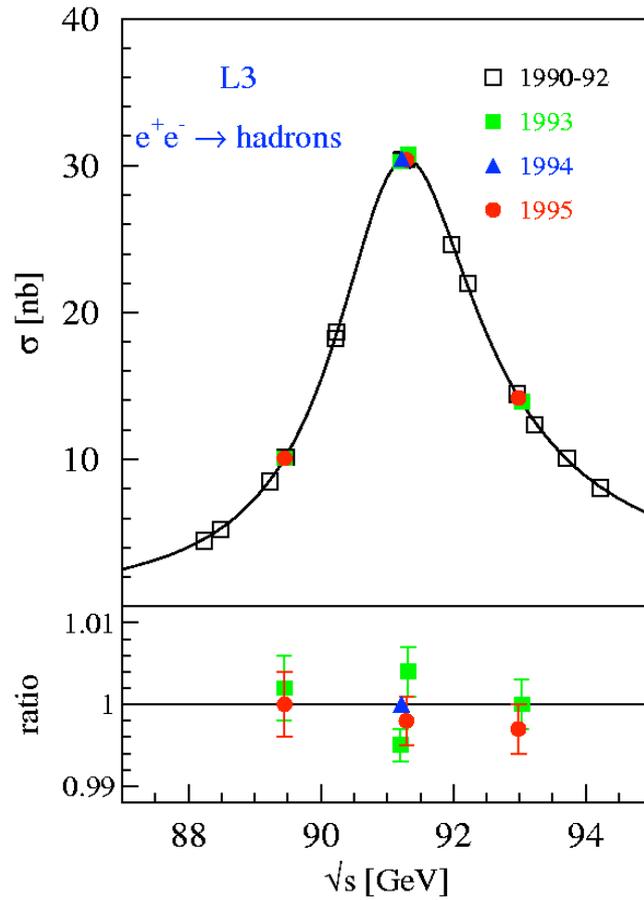


# La fisica di precisione

e+e- vs pp / LEP vs LHC



# Misure di precisione



# Line-shape

Per determinare la "line-shape" del bosone Z si misurano sezioni d'urto al variare dell'energia del centro di massa e per stati finali selezionati:

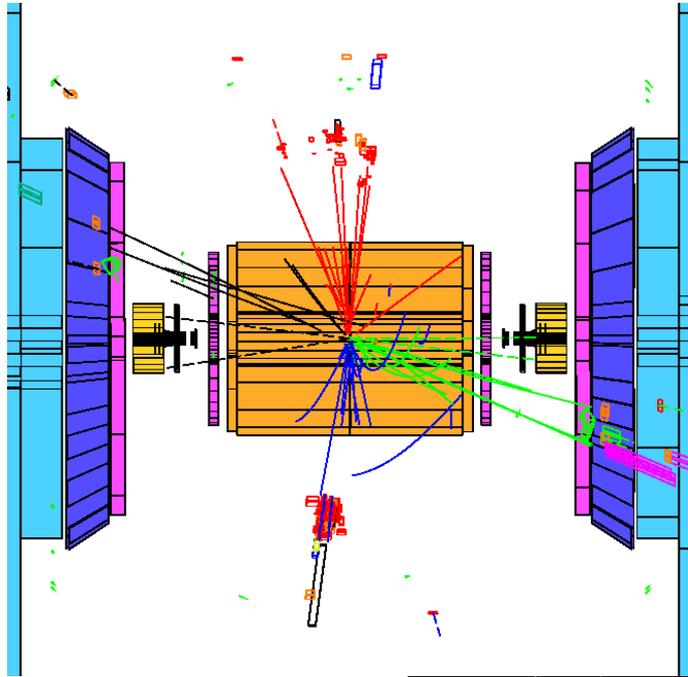
$$\sigma = (\text{Ndati} - \text{Nfondo}) / \varepsilon \times \text{Luminosita}' \quad \text{vs} \quad \text{Ecm}$$

Sperimentalmente significa:

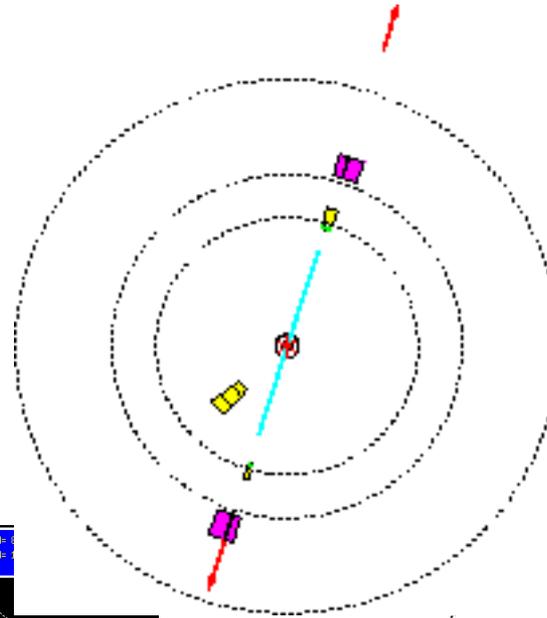
- contare gli eventi del tipo interessato (Ndati),
- determinare le efficienze  $\varepsilon$  dell'apparato per la rivelazione di tali eventi
- determinare gli eventi di fondo (Nfondo)
- misurare la Luminosita'
- misurare l'energia dei fasci.

Per raggiungere **precisioni di frazioni del per-mille** sui parametri del bosone Z, bisogna raggiungere tali precisioni sia sullo stato iniziale  $e^+e^-$  (Ecm e Luminosita') sia sullo stato finale  $f^+f^-$ .

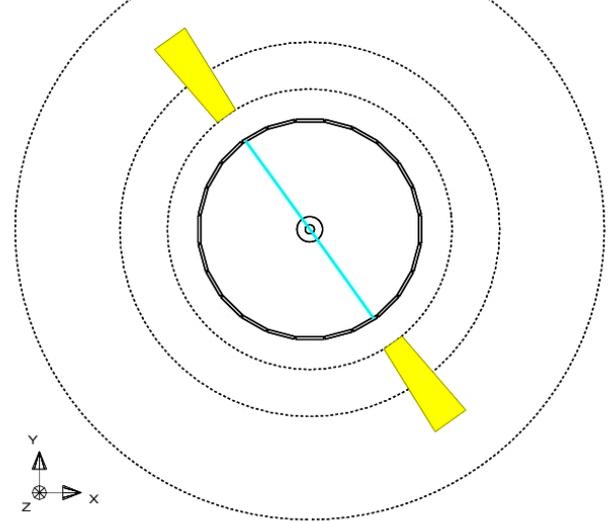
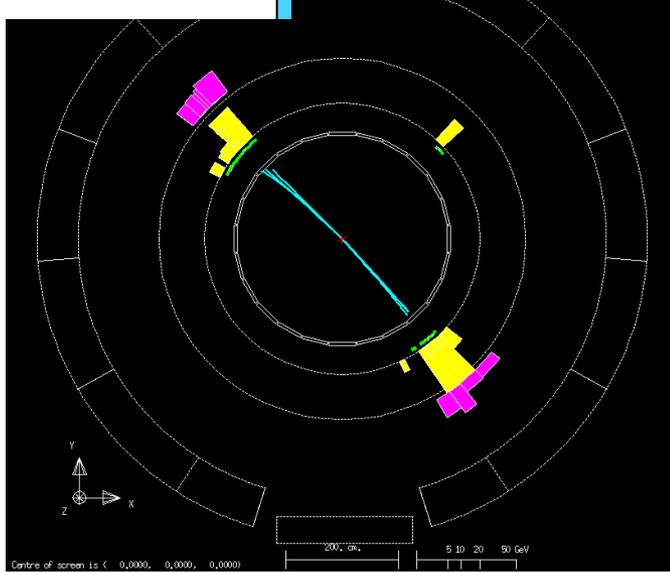
# Semplicitá stato iniziale → semplicitá stato finale



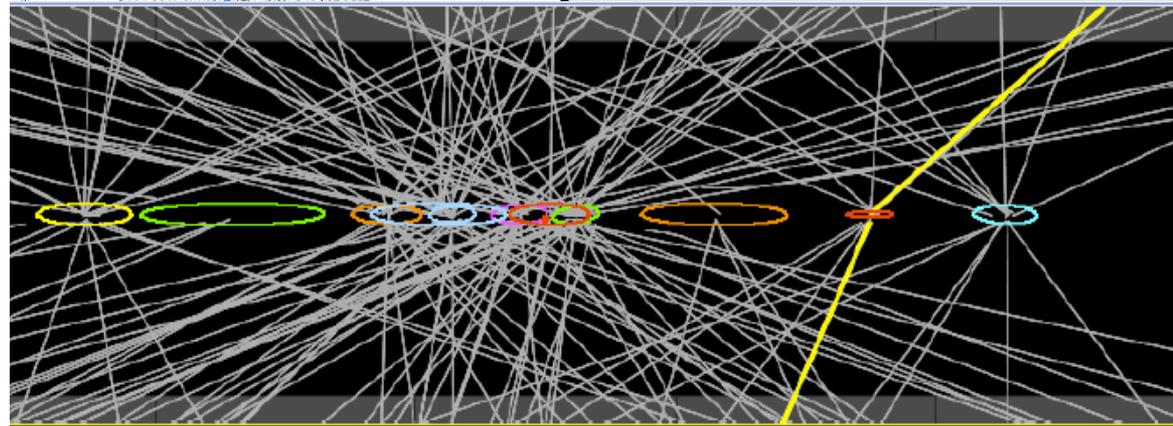
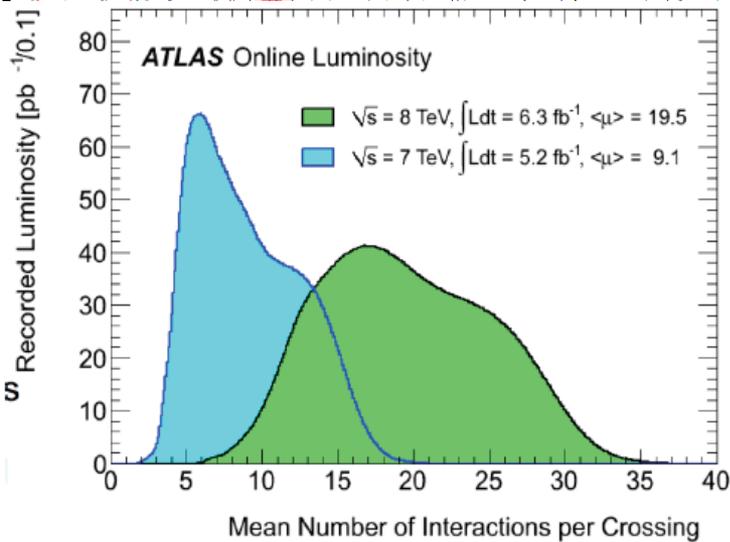
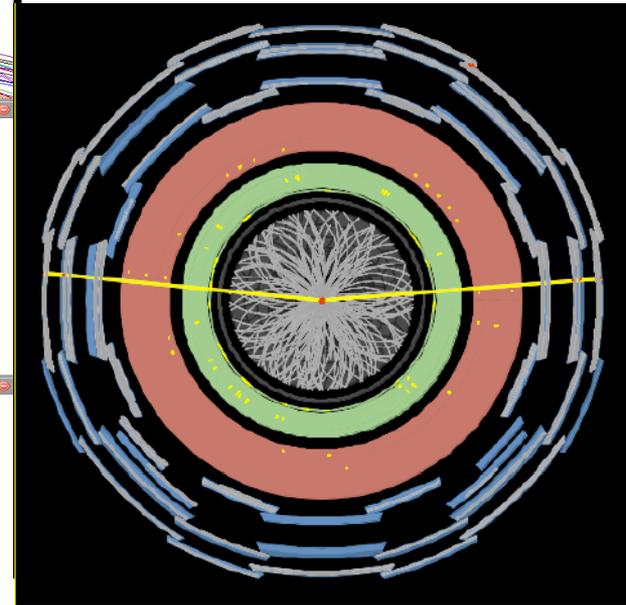
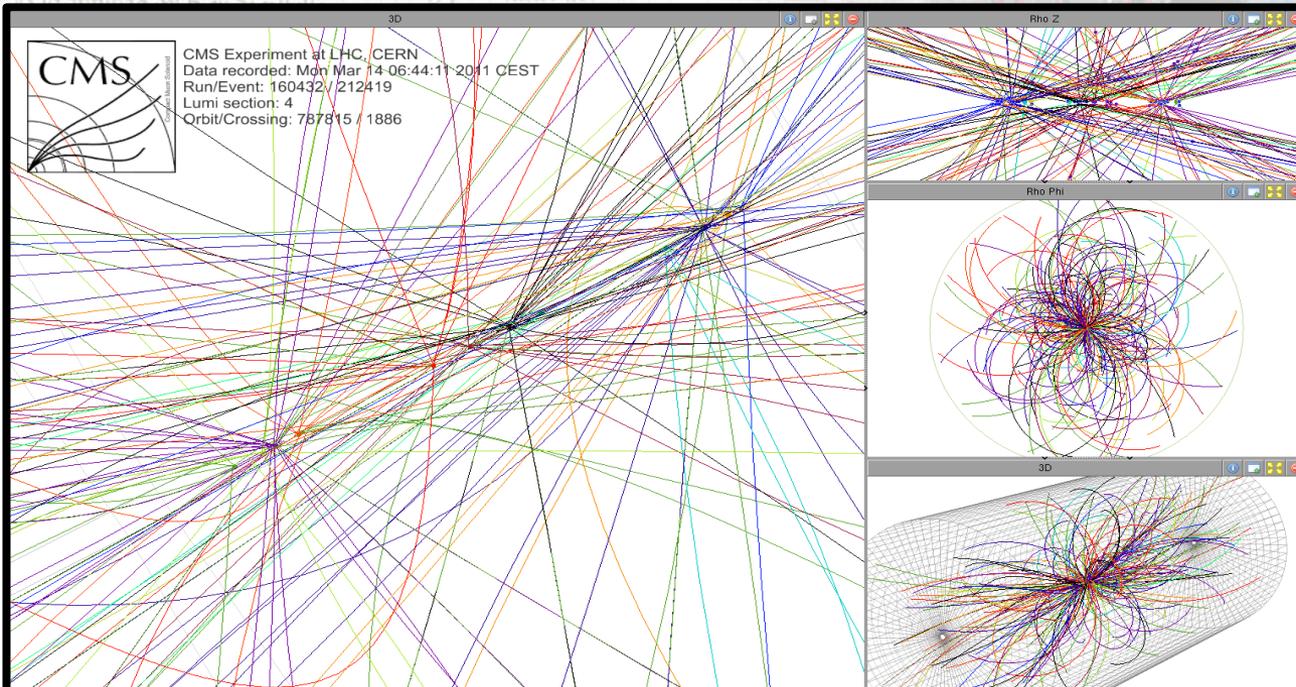
```
9 SumE= 33.27 Ecal(N= 18 SumE= 40.61 Hcal(N=
18. 0.50) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N=
0) 0.00
```



```
N= 2 SumE= 95.6 Ecal(N= 2 SumE= 90.7
.13) Hcal(N= 2 SumE= .5) Muon(N= 0)
```



# $Z \rightarrow \mu\mu$ at LHC



$Z \rightarrow \mu\mu$  event with 11 primary vertices

# Misura dell'energia dei fasci

L'equazione che determina l'energia dei fasci ad un collider e'

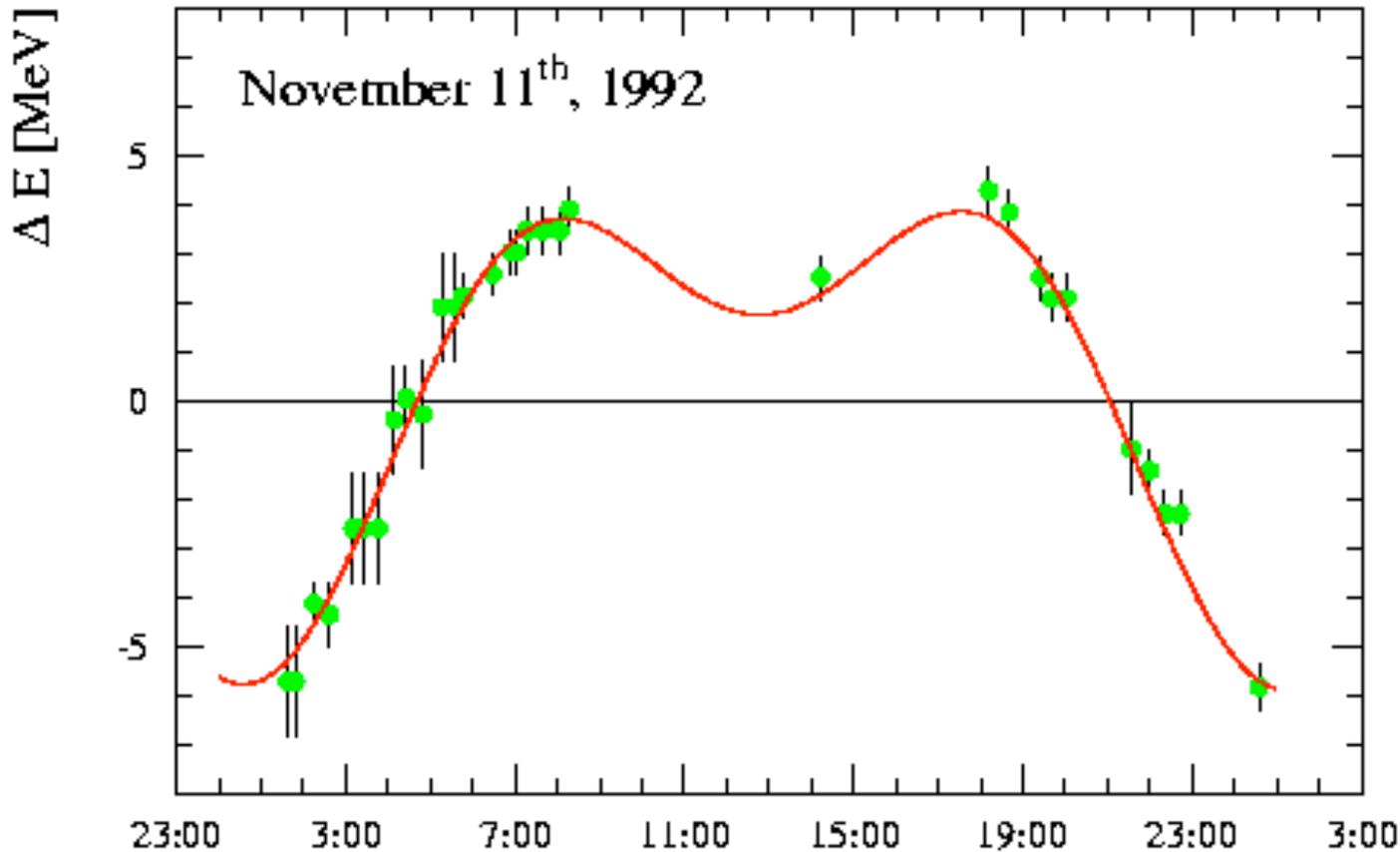
$$E_{beam} = \oint B \cdot dl$$

Non e' pero' banale misurare con precisioni inferiori al per-mille il campo magnetico integrale e il percorso totale fatto dalla particella. Il metodo usato per raggiungere tali precisioni e' quello della "Depolarizzazione Risonante".

Questa misura avviene in run speciali della macchina, ovvero ad un dato tempo  $t_0$ . Quello che si vuole veramente e' conoscere l'energia del fascio durante i run di fisica, quelli in cui si prendono dati, ovvero ad un tempo  $t_1$ . Bisogna dunque correlare la misura dell'energia del fascio a tempo  $t_0$  con quella al tempo  $t_1$ .

Per correlare  $E(t_0)$  con  $E(t_1)$  bisogna conoscere come variano il campo integrato  $\mathbf{B}$  e il cammino totale  $\mathbf{L} = \oint dl$  dal tempo  $t_0$  al tempo  $t_1$ .

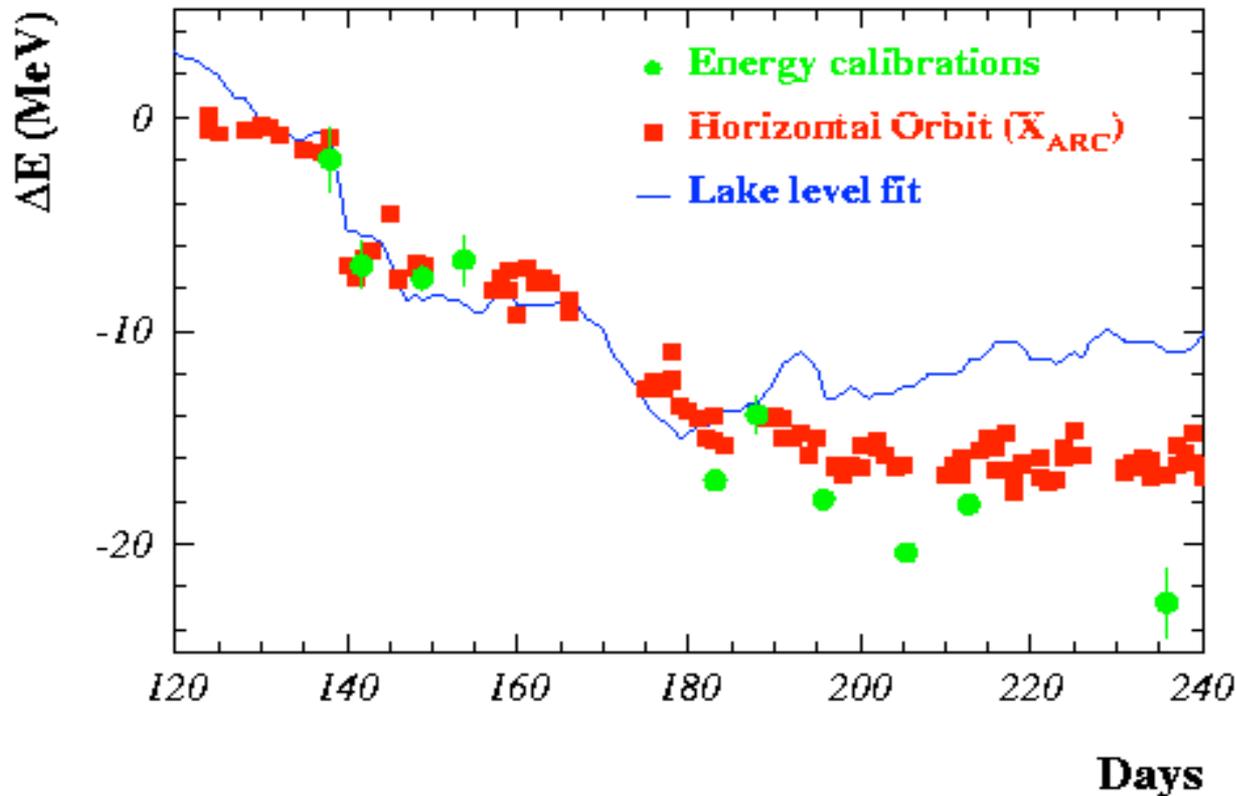
# Effetti di marea



La figura mostra come l'energia del fascio varia durante un giorno intero, a causa delle maree dovute alla luna. A Ginevra il livello del terreno varia fino ad un massimo di 25 cm (i.e. un cambio locale del raggio terrestre di  $4 \times 10^{-8}$ ). L'orbita di LEP viene modificata di meno di 1 mm (lo spessore di un capello!), e l'energia del fascio subisce una variazione di circa 10 MeV.

# Quanto piove?

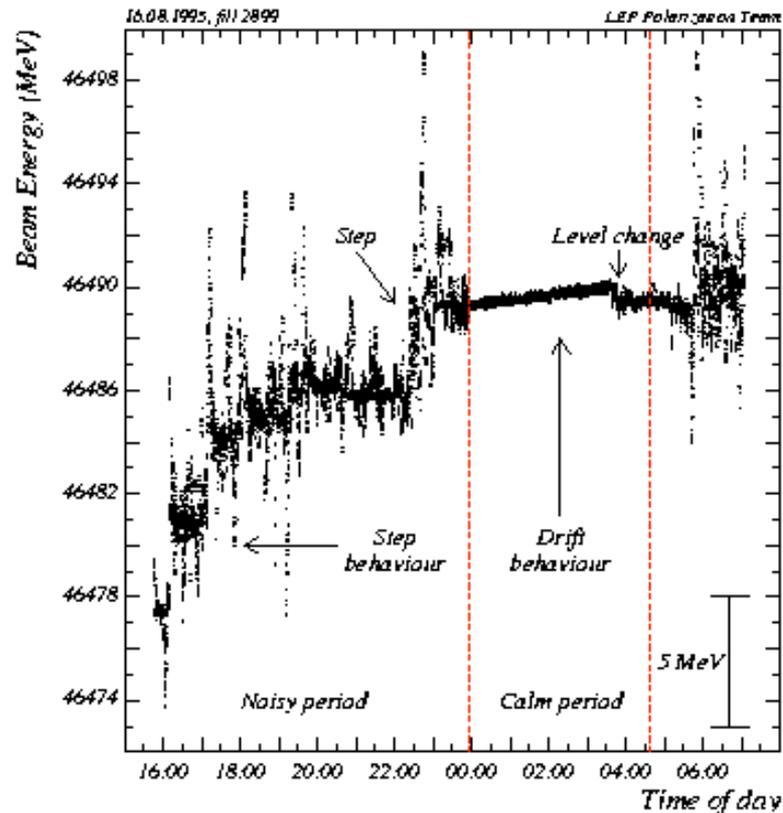
Effetti dovuti alla falda freatica sul Jura e alla quantita' di acqua nel lago. Le variazioni di pressione dovute alle variazioni della massa dell'acqua o nel Jura o nel lago modificano la forma dell'anello e dunque  $\Rightarrow$  variazione di L



La figura mostra come il livello dell'acqua del lago Lemano influenza la forma dell'anello, ovvero il percorso totale delle particelle e dunque la loro energia. La misura e' stata possibile grazie al comune di Ginevra che, manovrando le dighe, ha permesso di aumentare e abbassare l'acqua del lago in modo controllato

# E qualche sorpresa

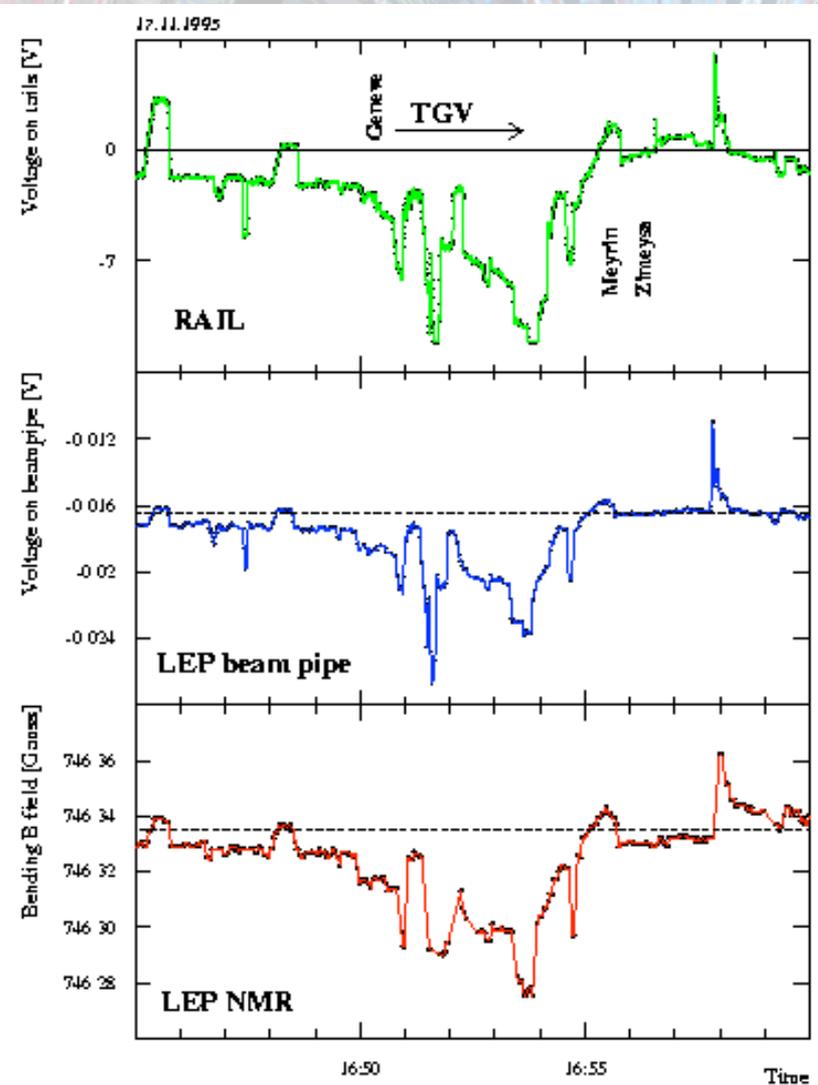
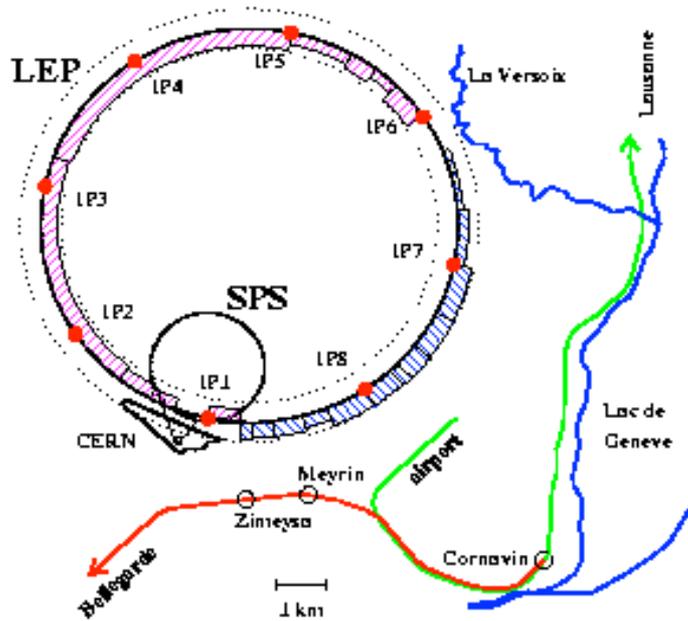
## Behaviour of LEP NMR



La figura mostra l'andamento dell'energia in funzione dell'ora. Questo andamento era ripetuto con regolarità ogni giorno: aumento dell'energia durante la sera e energia costante durante la notte. Le misure sono state fatte grazie alle sonde NMR poste lungo l'acceleratore, ovvero l'aumento di energia era dovuto ad una variazione del campo magnetico  $B$  della macchina.

# II TGV

## Vacuum Chamber Current Correlation



La spiegazione di questa variazione periodica di  $\sim 20$  MeV viene dalla linea dei treni TGV Francia-Svizzera: lungo le rotaie della vecchia tratta una frazione della corrente non ritorna completamente sulle rotaie, ma viene dispersa nel terreno. Questa corrente vaga nel terreno finché non incontra il tunnel del LEP, ottimo conduttore, e poi riesce dal tunnel quando passa nel fiume "La Versoix". Misurando le variazioni di tensione lungo la linea dei treni e lungo la beam pipe di LEP e le variazioni delle sonde NMR si può notare una correlazione perfetta con i passaggi dei treni TGV (Nella notte, ovvero tra le ore 00:00 e le 04:00 non passano treni e si misura un'energia costante.)

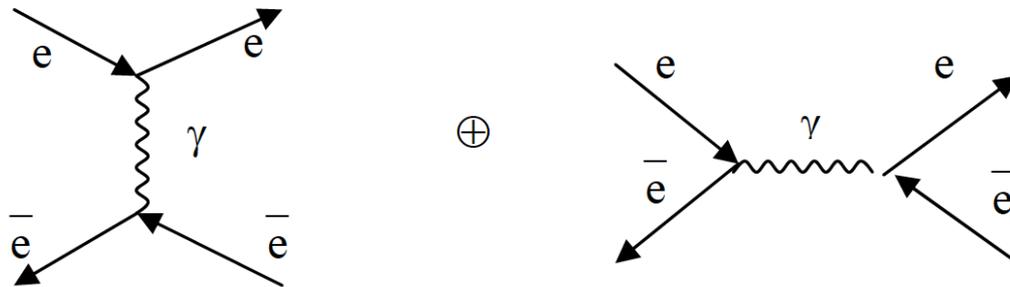
# Luminosità

In teoria si può misurare la luminosità dai parametri della macchina, in pratica, il modo più preciso per misurare la luminosità dei fasci è proprio usare la relazione:

$$\sigma = N_{segnale} / Lum \quad \Rightarrow \quad Lum = N_{segnale} / \sigma$$

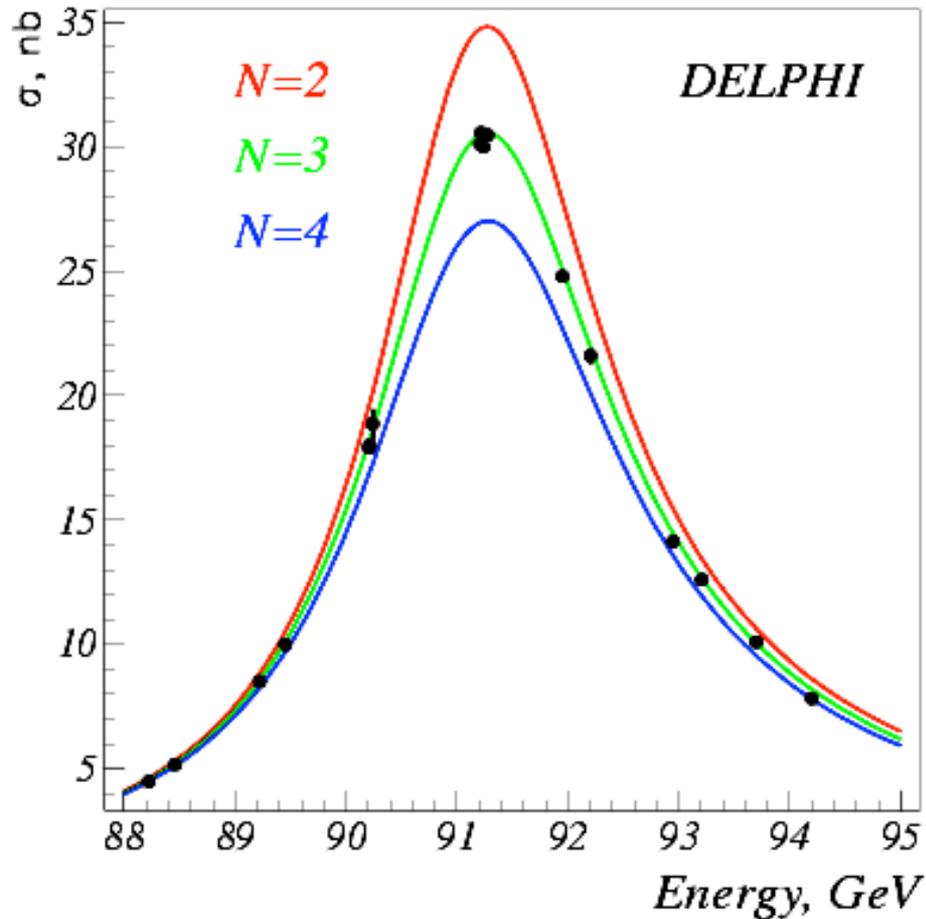
dove si seleziona un processo fisico la cui sezione d'urto è molto ben nota teoricamente. Misurando il numero di eventi nel rivelatore dovuti a questo dato processo fisico si ottiene di conseguenza la luminosità.

Il processo molto ben noto teoricamente, è un processo di QED, ovvero il Bhabha scattering:



Si raggiunsero errori sulla luminosità di circa  $0.5 \times 10^{-3}$ .

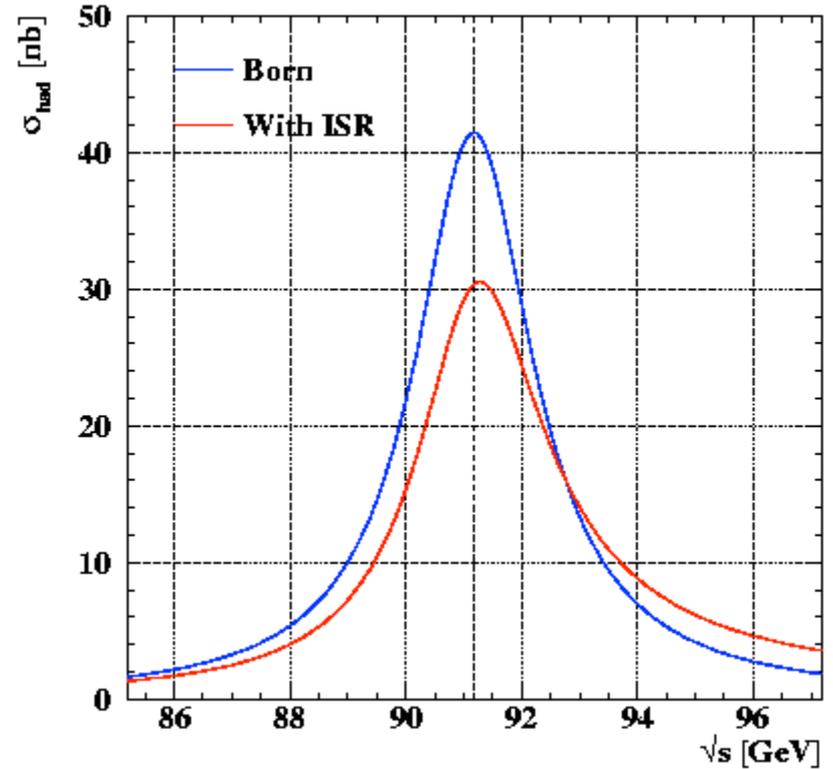
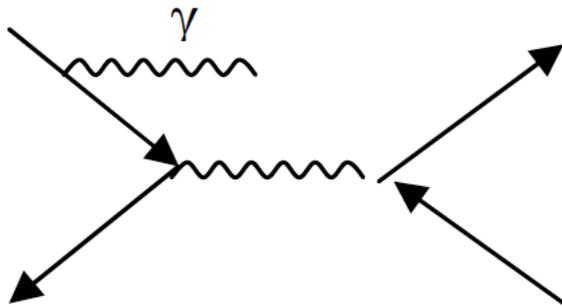
# Perché così precisi?



$$N(\nu) = 2.9841 \pm 0.0083$$

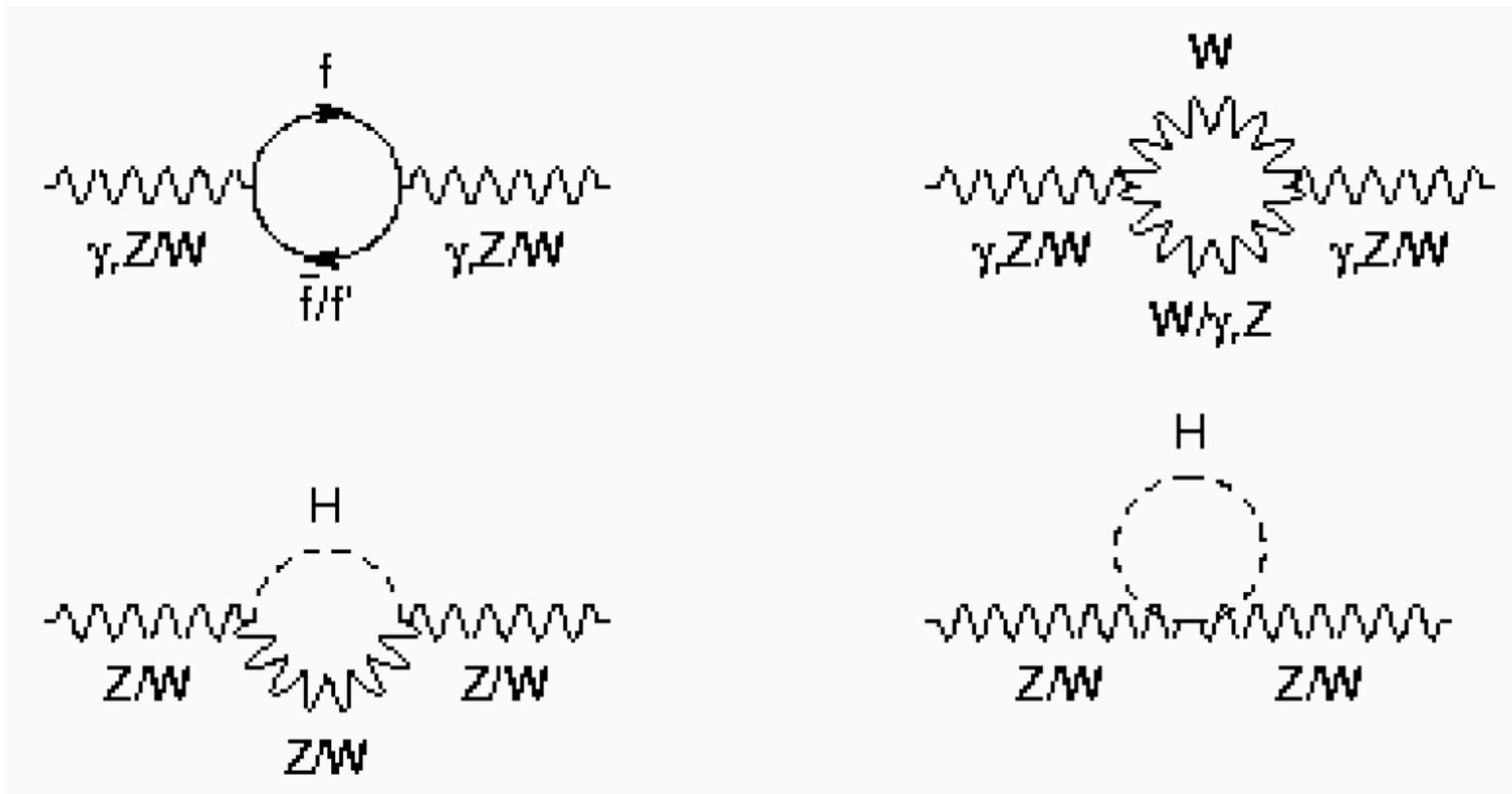
*Il numero di neutrini e' 3 → il numero di famiglie di leptoni nel nostro universo e' 3.*  
Se ci fossero solo 2 o 4 o piu' neutrini, la larghezza totale della risonanza del bosone Z sarebbe piu' stretta o piu' larga di quello che effettivamente misuriamo.  
Prima di LEP si misurava  $N(\nu) = 3.0 \pm 0.9$ , ovvero un risultato 2 ordini di grandezza meno preciso che permetteva molte ipotesi (il neutrino-tau  $\nu_\tau$  e' stato effettivamente "visto" da DONUT al Fermilab nel 2000)

# Correzioni radiative: QED



La "Breit e Wigner" della Z viene modificata dalle correzioni di QED: La linea blu e' la sezione d'urto di Born (simmetrica rispetto a  $M_Z$ ) mentre la linea rossa e' quello che ci si aspetta sperimentalmente, ovvero dove le correzioni di QED sono state correttamente tenute in conto.

# Correzioni radiative: ElettroDeboli



I diagrammi fondamentali di scambio di un fotone o di una Z (o W) sono accompagnati al secondo ordine da diagrammi in cui i propagatori sono modificati dalle correzioni radiative elettrodeboli dovute a "loop" bosonici e fermionici.

I primissimi calcoli di correzioni radiative deboli sono stati fatti dal Prof. Giampiero Passarino (Torino) e da Martinus Veltman (premio Nobel).

# Correzioni radiative

A causa delle correzioni radiative elettro-deboli le espressioni che relano tra loro le costanti fondamentali del MS cambiano. Per esempio:

$$\rho = \frac{M_W^2}{M_Z^2 \cos^2 \theta_W} \quad \rightarrow \quad \bar{\rho} = 1 + \Delta\rho \quad \Delta\rho = f(\sin^2 \theta_W, G_F, m_t^2, \log m_H)$$

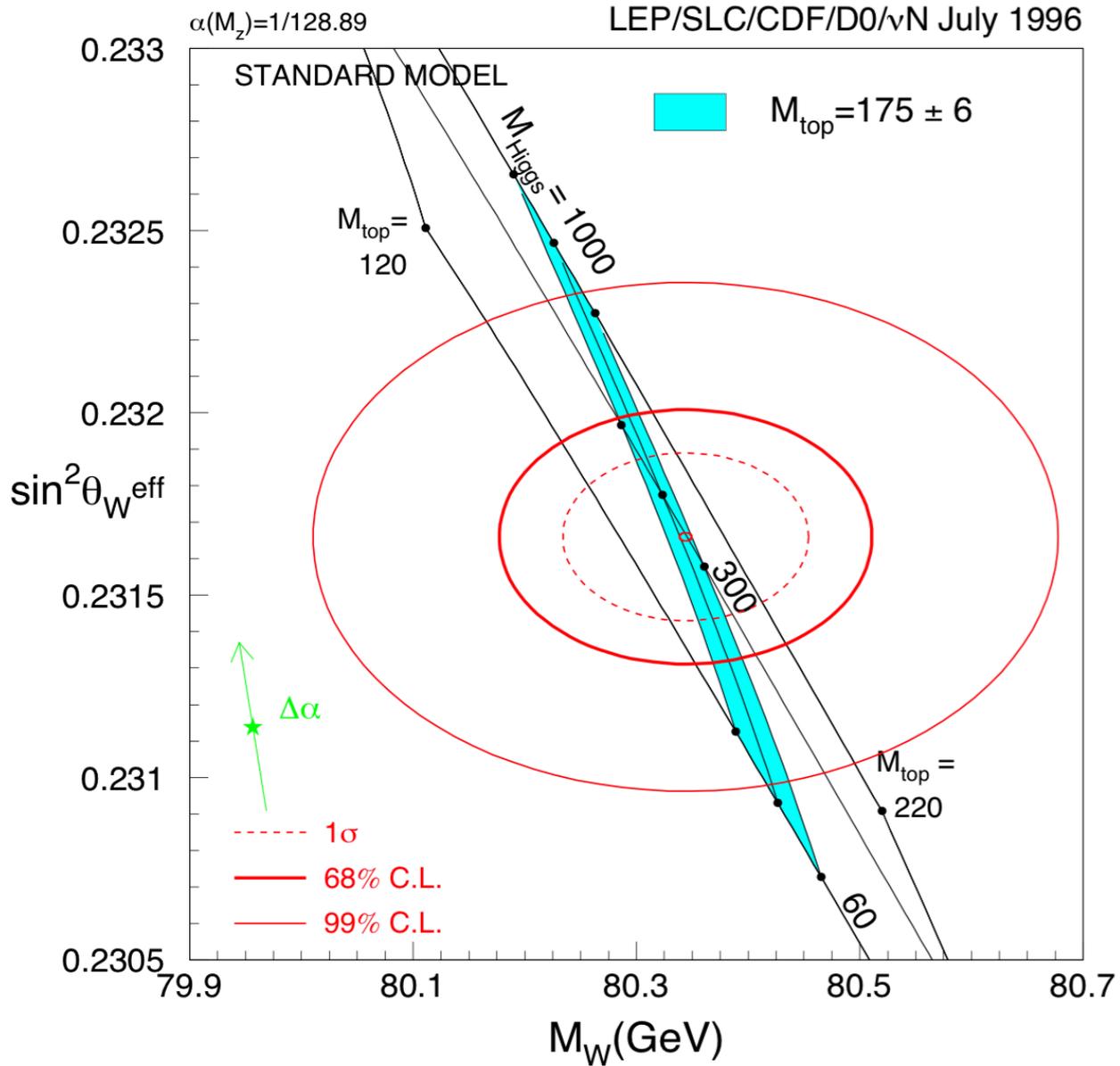
Ovvero le correzioni radiative dipendono dal quadrato della massa del quark top e dal logaritmo della massa dell'Higgs, di conseguenza si ha una forte dipendenza dalla massa del top, ma una debole dalla massa dell'Higgs.

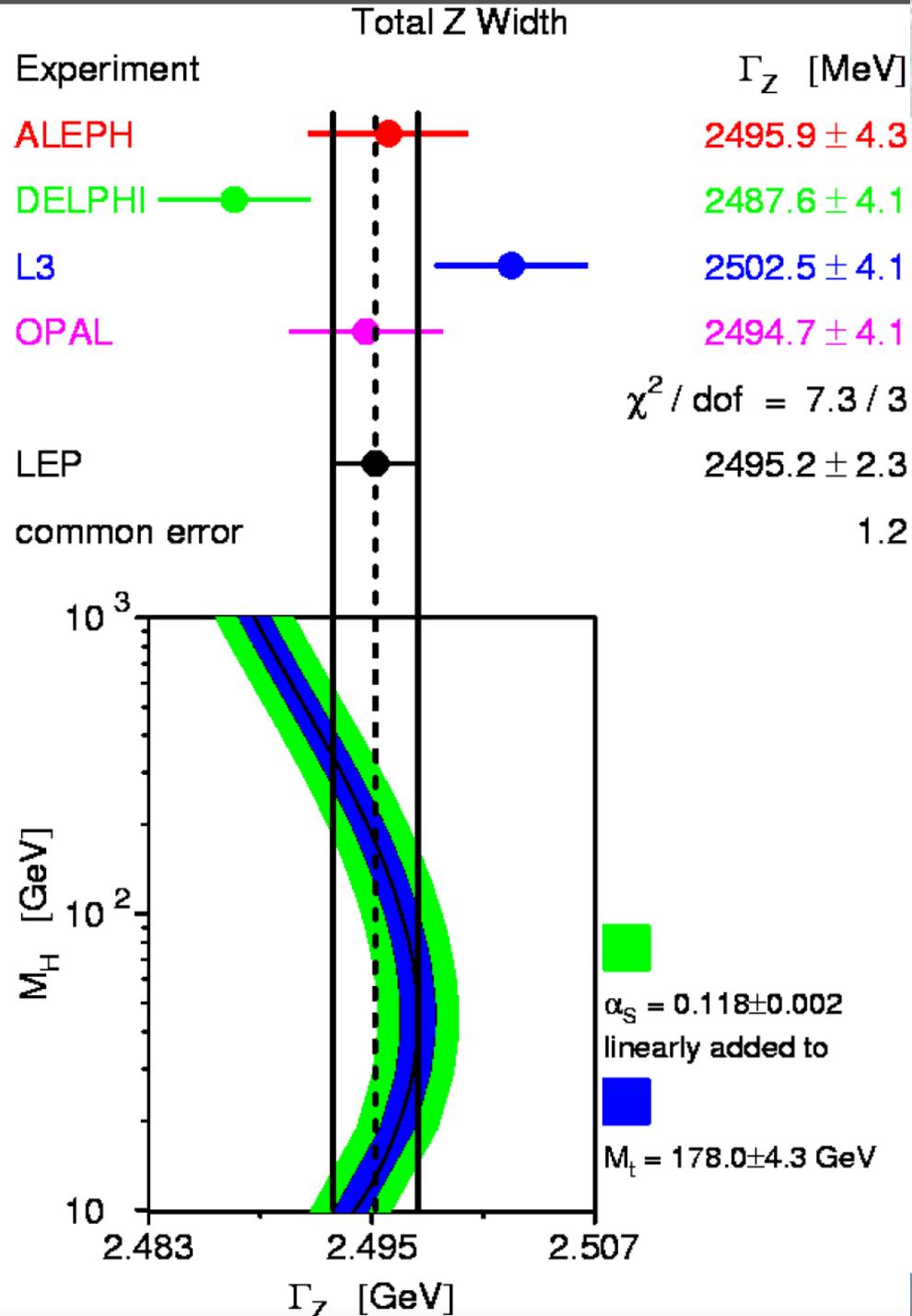
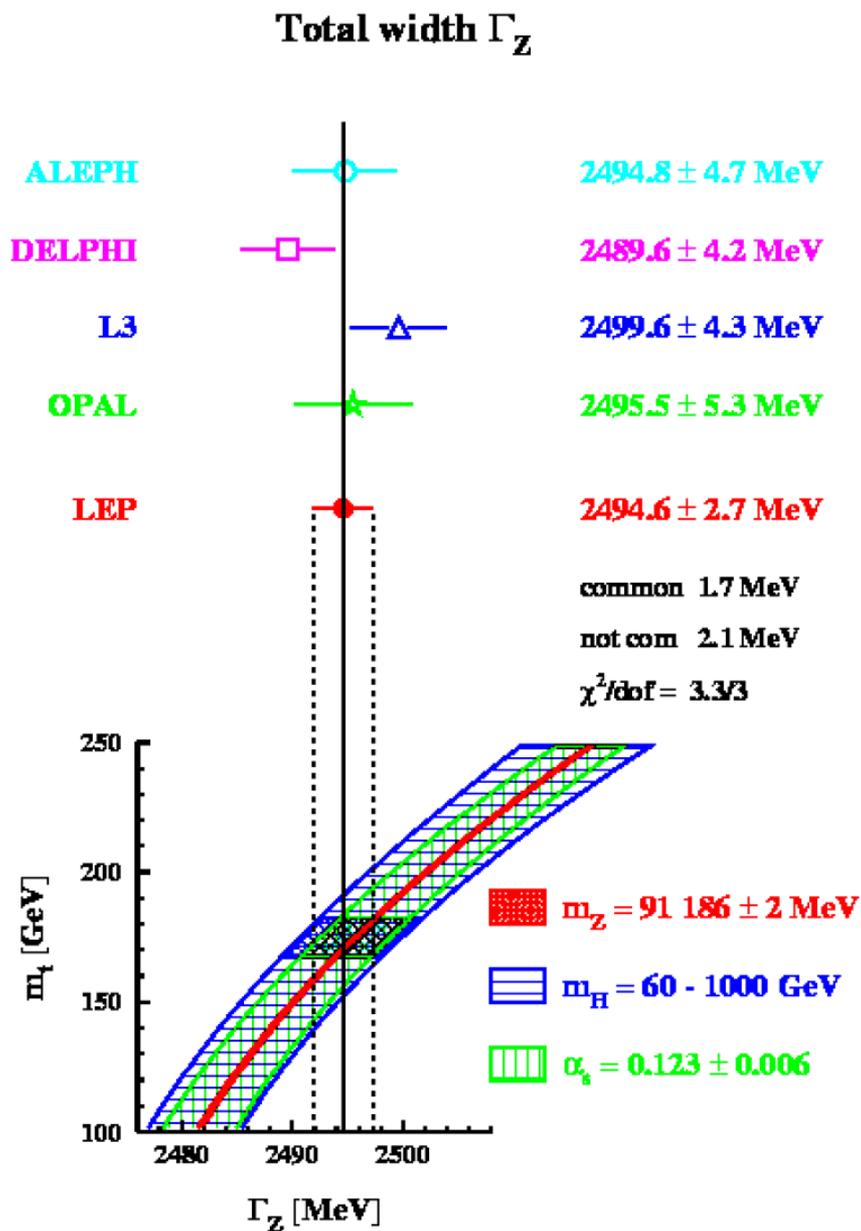
**Confrontando le misure sperimentali delle variabili di precisione con le previsioni del Modello Standard si puo' determinare in modo indiretto la massa del top, e mettere limiti alla massa dell'Higgs.**

## Qualcosa di nuovo dei loop?

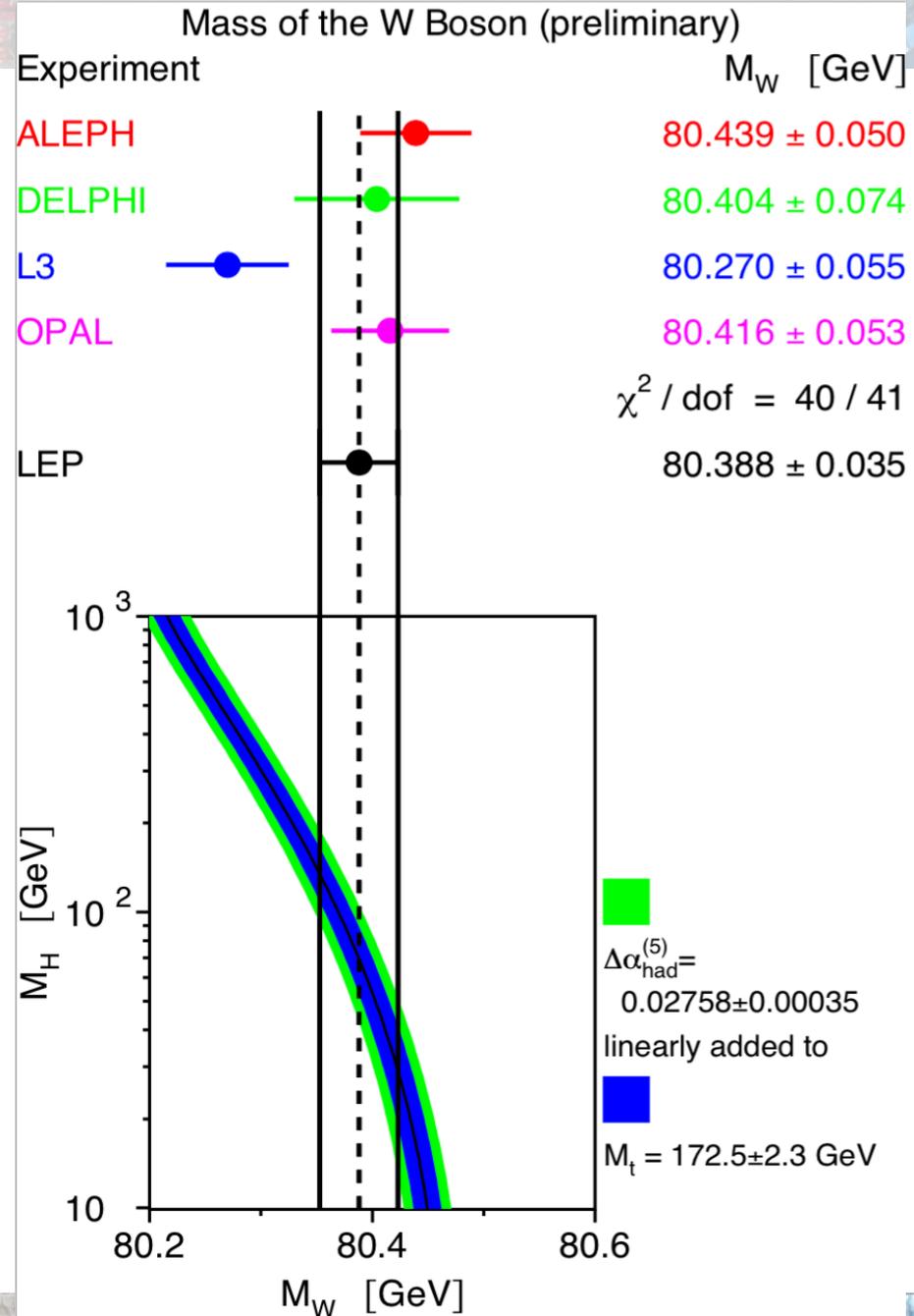
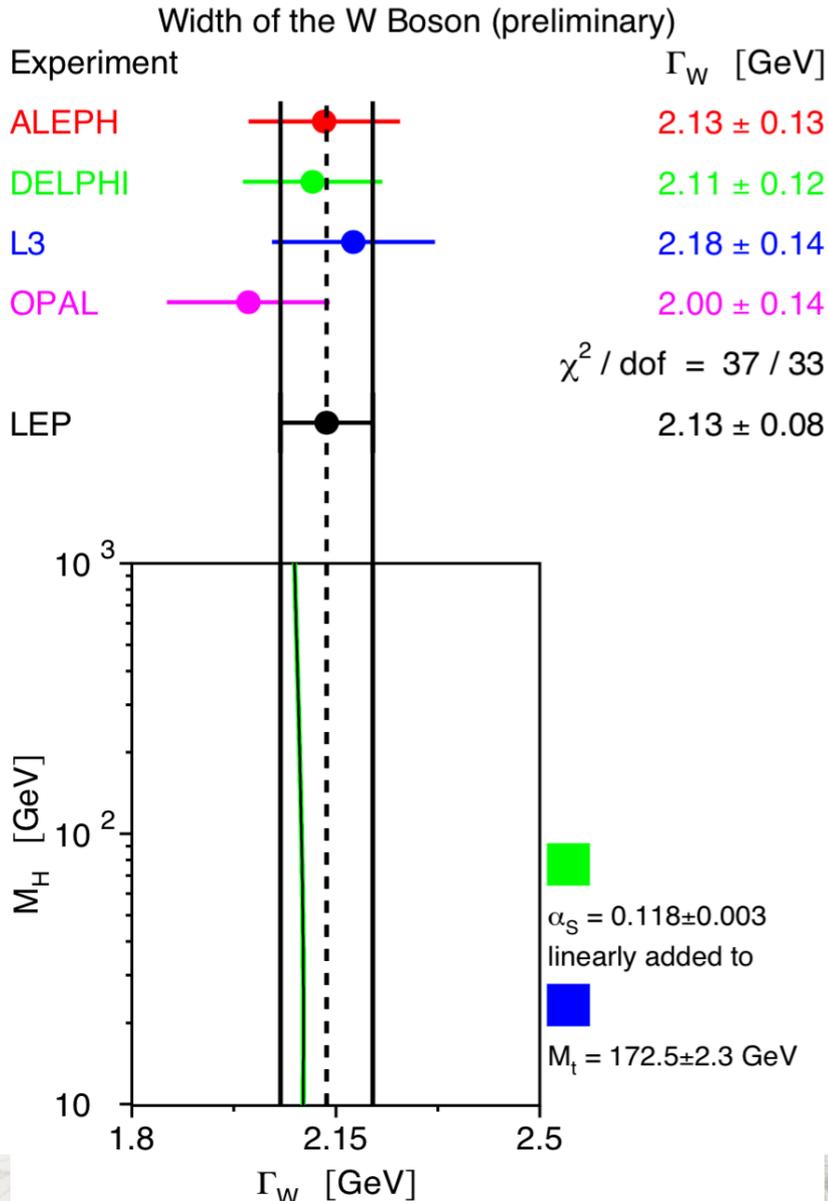
Le correzioni radiative elettrodeboli sono importantissime non solo per ottenere risultati di precisione, ma anche per ottenere informazioni su quello che non si produce direttamente a LEP.

# Top e Higgs

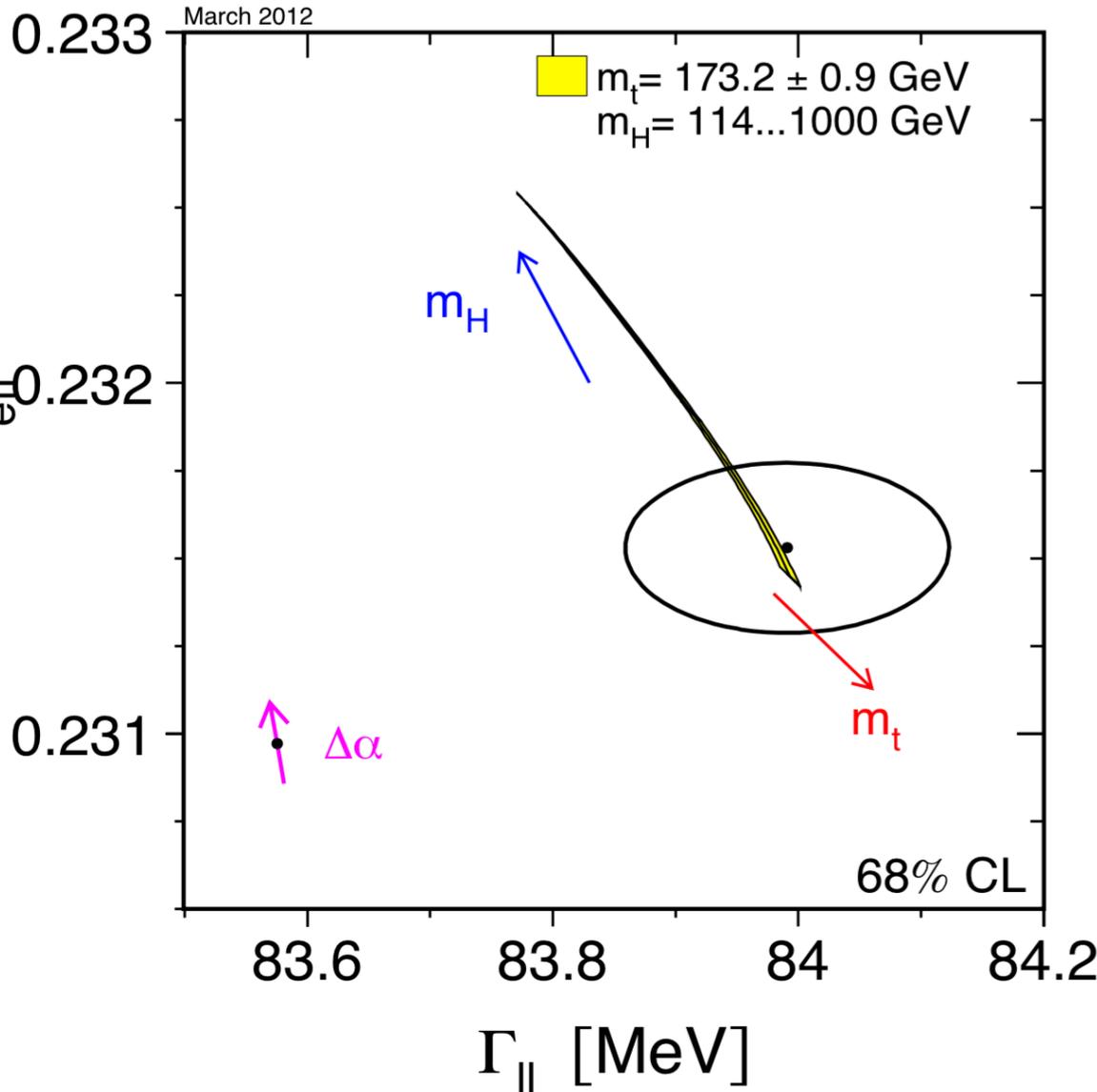




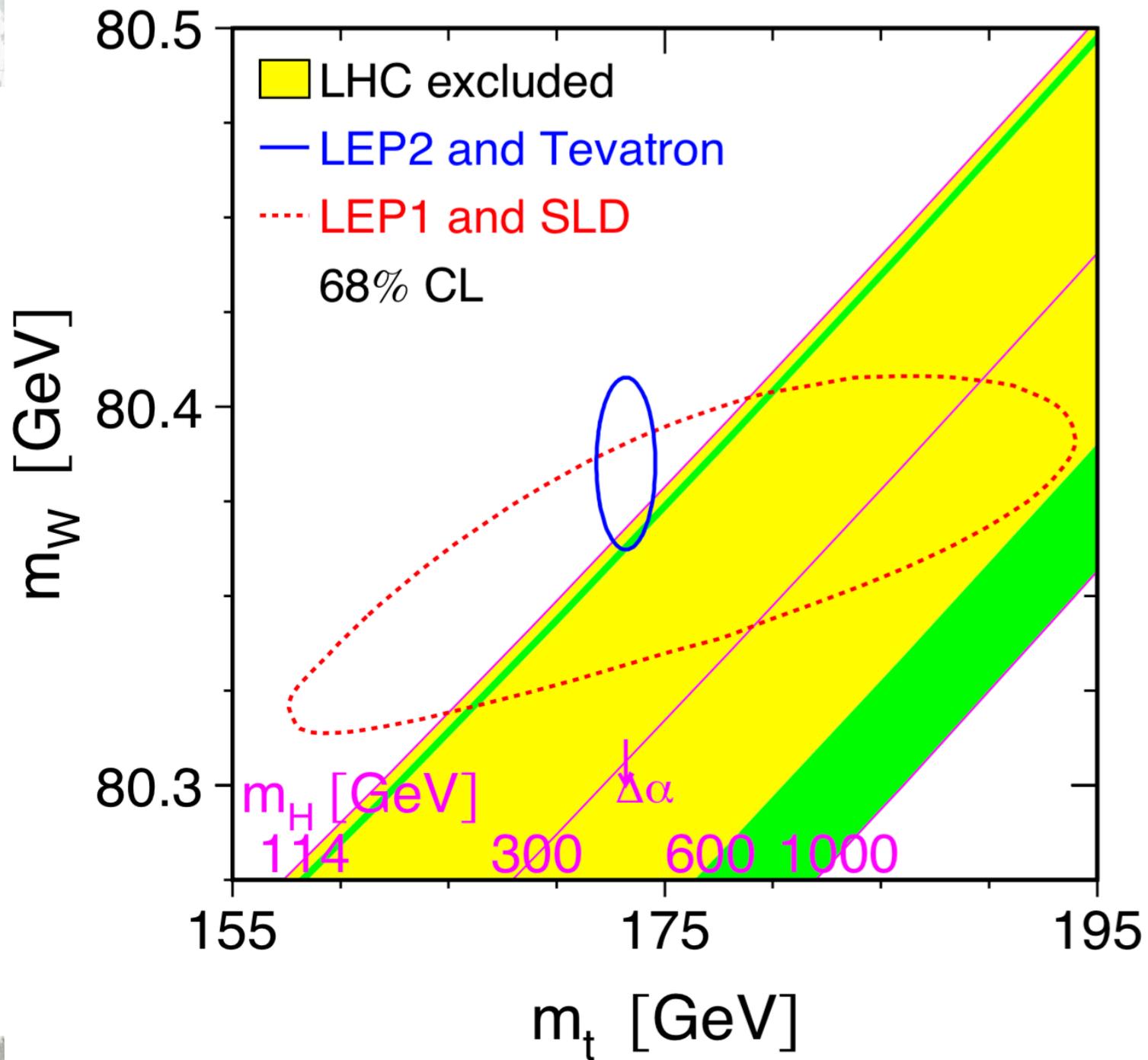
# Dopo la scoperta del top

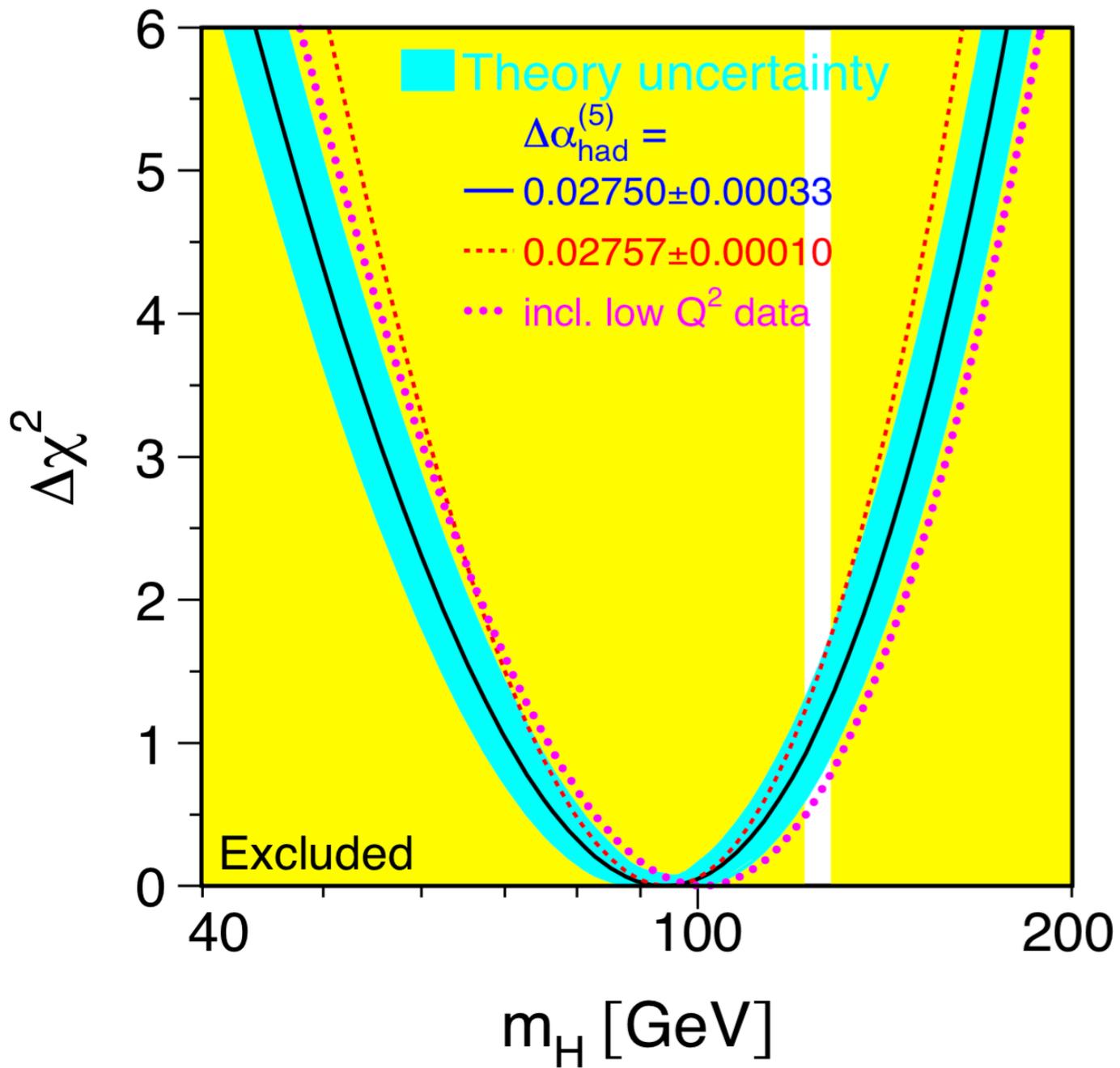


# La fine di LEP

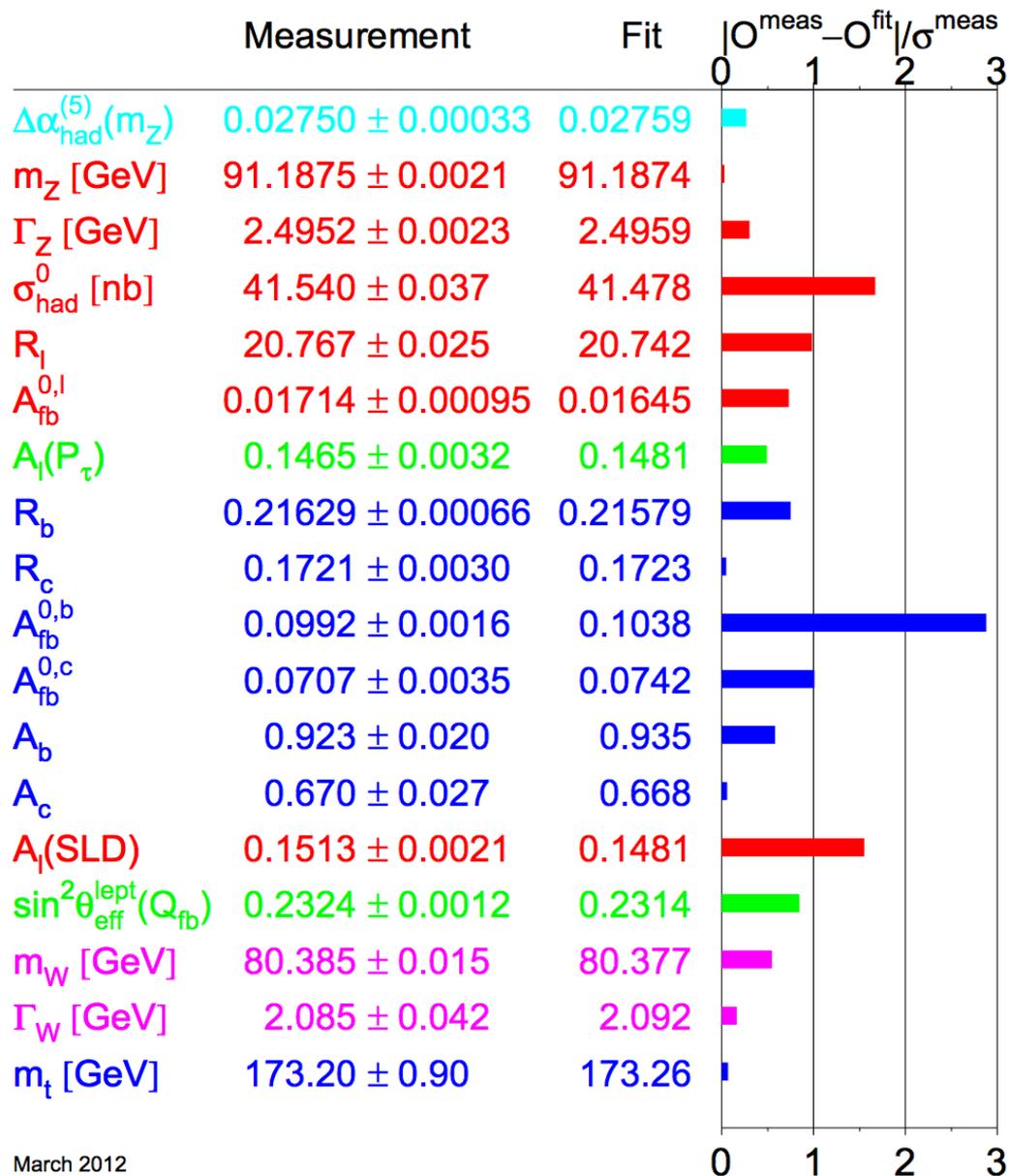


Il valore centrale è al centro del cerchio, il cerchio rappresenta il 68% del livello di confidenza. Il risultato sperimentale può essere paragonato con le predizioni del Modello Standard. In figura le predizioni del Modello Standard sono mostrate con dei vettori. Innanzi tutto il vettore più a sinistra (in magenta) rappresenta il valore del MS in assenza delle correzioni radiative elettrodeboli, e l'estensione della freccia, rappresenta quanto questo valore potrebbe cambiare al variare della costante di accoppiamento elettromagnetica  $a_{\text{em}}$ . Gli altri 3 vettori (blu, rosso e verde) sono le predizioni del MS tenendo in conto le correzioni radiative elettrodeboli, e variando le quantità poco note o non note, come la massa del top ( $m_{\text{top}} = 174.3 \pm 5.1 \text{ GeV}$ ), la costante di accoppiamento forte ( $a_s = 0.118 \pm 0.002$ ) e la massa dell'Higgs ( $m_H = 300 + 700 - 186 \text{ GeV}$ )





# Fisica di LEP



Precisioni raggiunte di meglio del per-mille su moltissime quantità fisiche

$\alpha_{\text{em}}$	$3.1 \times 10^{-4}$	700ppm
$M(Z)$	$2 \times 10^{-5}$	23ppm
$G_F$	$8.6 \times 10^{-6}$	9 ppm
$\alpha_s$	$2.3 \times 10^{-2}$	

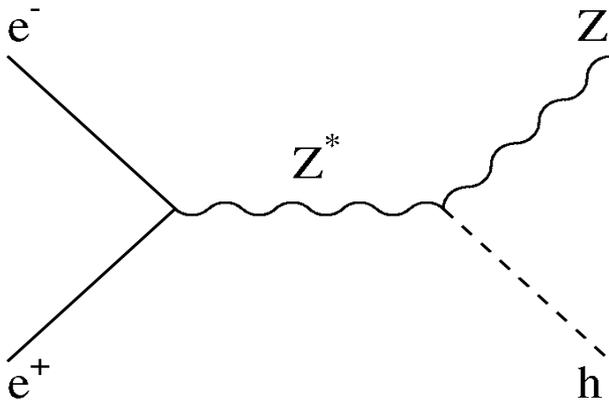
# Higgs a LEP

I dati sperimentali testano il SM al livello del **per mille**

L'esistenza dell'Higgs e' ben supportata dai dati sulle correzioni radiative

Il bosone di Higgs non e' pero' scoperto

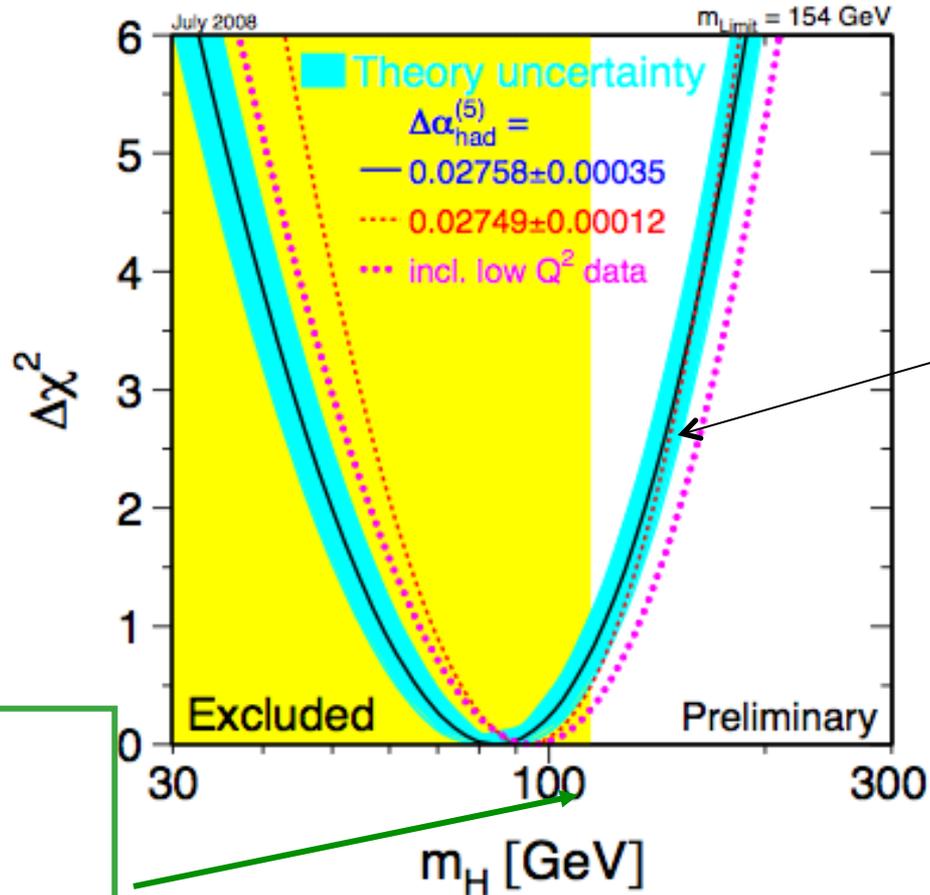
LEP sarebbe ideale per la "pulizia" e semplicita' dello stato finale, ma puo' scoprire l'higgs solo se:



$$m(\text{Higgs}) < E_{\text{cm}} - M_Z$$

# Limite da LEP

**LEP** Expected to exclude:  $m_H < 115.3$   
Excluded:  $m_H < 114.4$  GeV



$m(H) \leq 152 \text{ GeV}/c^2$   
at 95% CL

EW precision  
measurements

$$m(H) = 94^{+29}_{-24} \text{ GeV}/c^2$$

Mentre un collider elettrone-positrone permette di eseguire misure di precisione in quanto sono note con alta precisione l'energia del centro di massa ( $\sim 10^{-5}$ ), la luminosita' ( $\sim 0.01\%$ ) e si ha un altissimo segnale su fondo dato che "la semplicita' dello stato iniziale si trasmette allo stato finale";

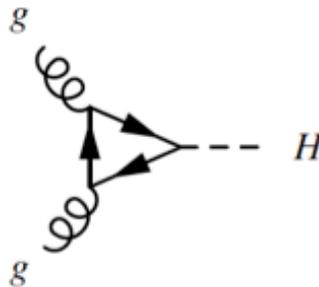
una macchina adronica (protone-anti-protone o protone-protone) e' una macchina da "scoperta": l'energia nel centro di massa dell'urto fondamentale tra quark o gluoni varia per vari ordini di grandezza, e i processi disponibili sono moltissimi. Si possono raggiungere energie nel centro di massa molto superiori in quanto l'energia persa per radiazione di sincrotrone e' molto inferiore. Per contro e' piu' difficile fare misure di precisione perche' non e' noto con precisione lo stato iniziale: l'energia del singolo quark o gluone non e' nota evento per evento e si puo' avere piu' di una interazione fondamentale per urto.

# Perché LHC

LHC (Large Hadron Collider) e' una macchina studiata per raggiungere alte luminosita'. Per questo motivo si accelerano solo protoni, invece che protoni e anti-protoni, in quanto e' difficile accumulare anti-protoni a sufficienza per raggiungere alte luminosita'.

Si sono sviluppati metodi nuovi per avere un alto numero di bunch (se ne avranno 2832 per fascio) e dunque un intervallo tra collisioni molto corto: 25 ns. (→Simone)

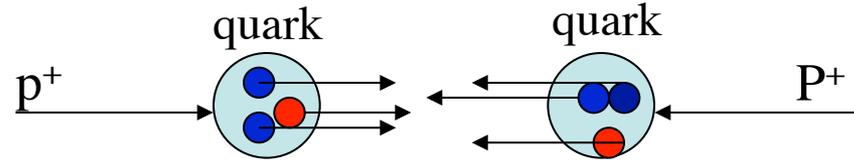
Protone -protone non e' penalizzante per la produzione dell'Higgs perche' il processo dominante di produzione di Higgs e' via la fusione (collisione) di 2 gluoni



## Higgs a LHC

Non conoscendo la massa dell'Higgs, conviene usare una macchina pp per poter avere a disposizione un range di energie e dunque di masse molto ampio: a LHC l'Higgs si sarebbe scoperto se la sua massa fosse stata tra i 100 GeV (esclusione di LEP) a 1000 GeV (limite teorico).

# Quanta energia ?



Collisione di protoni: interazione fra partoni ( $q, g$ )

- I partoni che interagiscono portano solo una frazione  $x$  dell'energia totale del protone:
- Abbiamo bisogno di collisioni di protoni a  **$\sim 6$  TeV** per raggiungere 1 TeV
- Vantaggio: scan di un ampissimo range di energia

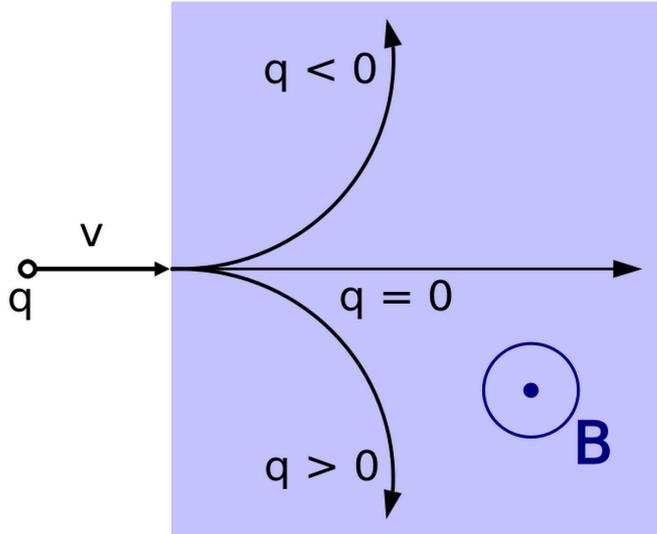
$$E < 1/3(E(p) + E(p))$$

LHC: Collisore di protoni da 14 TeV (7 TeV per fascio)

- $p = 0.3 \cdot B \cdot R \Rightarrow$   
il limite è il **campo magnetico necessario** per curvare  $p^+$  su traiettoria circolare di 27 km
- 1232 dipoli superconduttori ( $-271^\circ$ ), **8.3 T**
- $\sim 9300$  magneti in tutto
- Energia immagazzinata:  **$\sim 10$  GJ**

# Il campo magnetico

Il campo magnetico curva le **particelle cariche**:



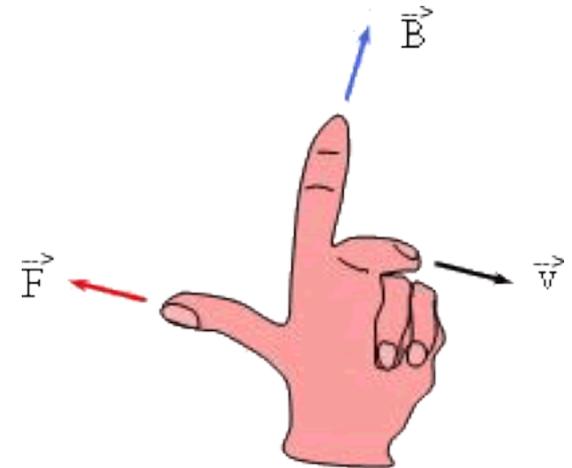
La forza di Lorentz

$$F = q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

$$\Rightarrow q \cdot B \cdot R = m \cdot v = |\vec{p}|$$

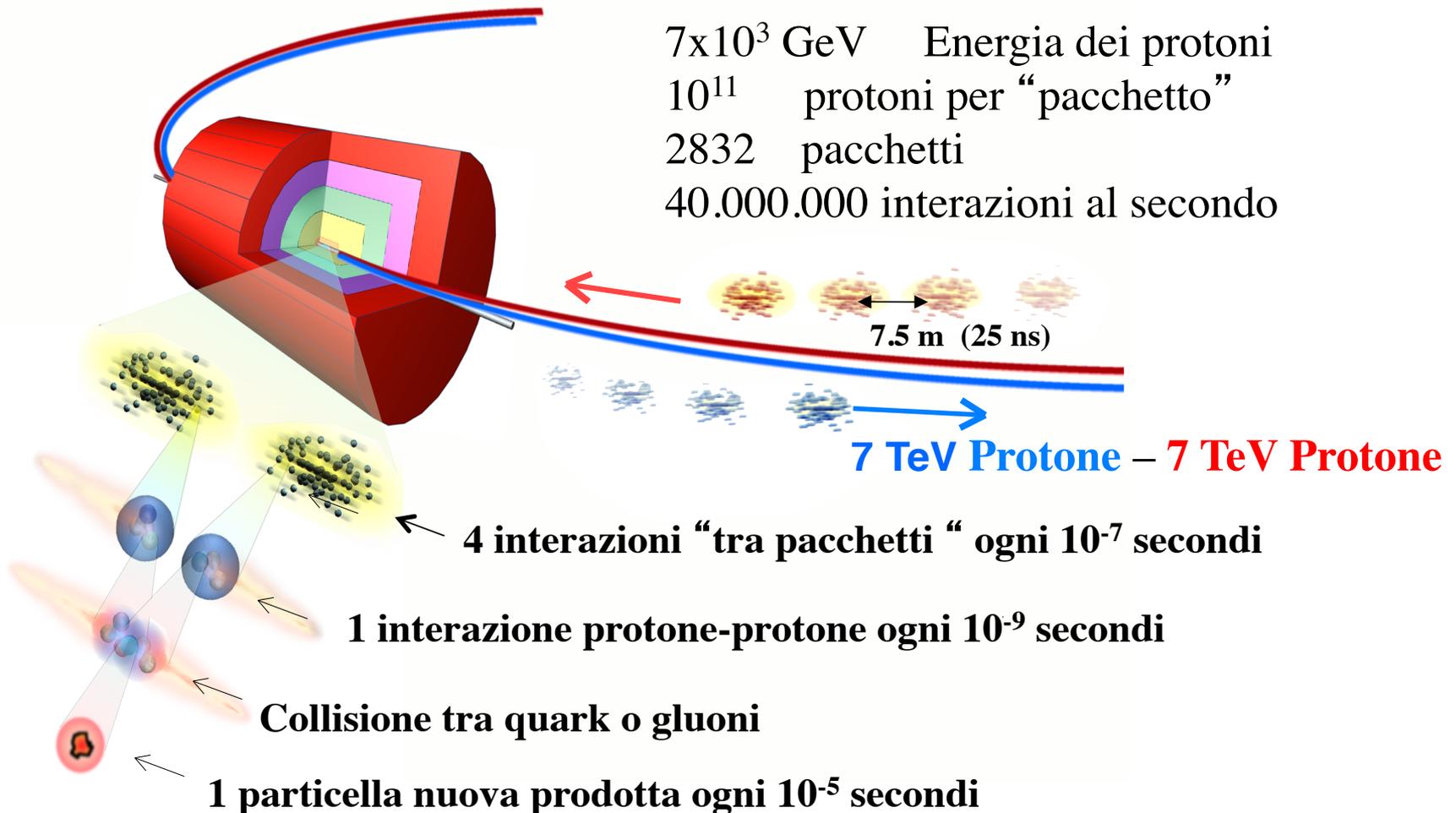
Un campo magnetico permette di:

- determinare la carica di una particella,
- dato  $R$  il raggio di curvatura ed  $m$ ,  
determini  $p$  (il momento)
- o noto il momento determini la massa



## 2008: Large Hadron Collider

Costruito nel tunnel di LEP / urti protoni - protoni

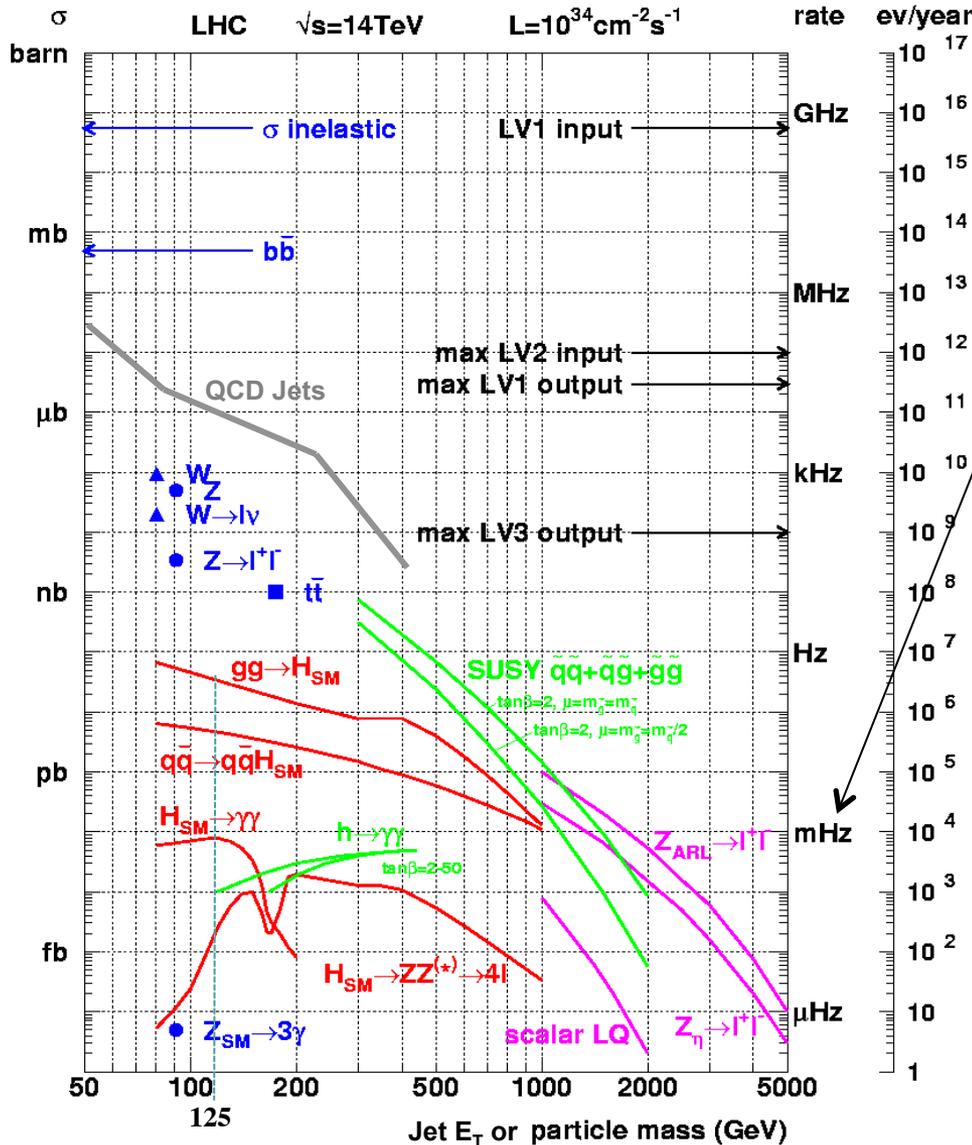


# Quante interazioni facciamo?

Sezioni d'urto  $\sigma$  (a 14 TeV):

La sezione d'urto e' la probabilita' che avvenga un certo evento, date le condizioni iniziali

12 ordini di grandezza



## Processi molto rari

$$R = \mathcal{L} \sigma$$

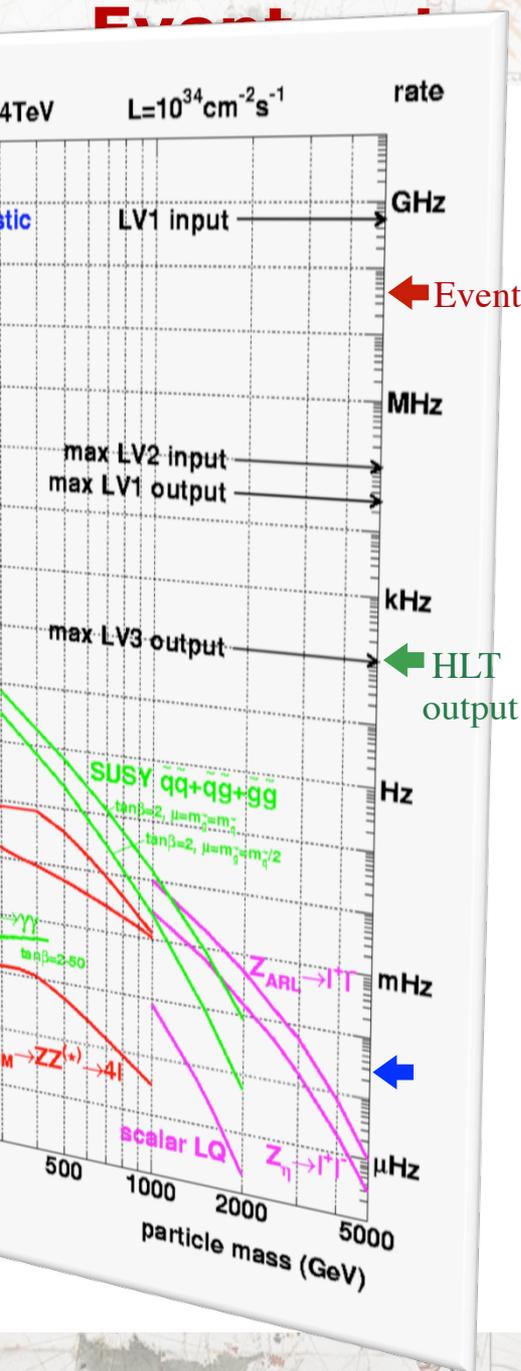
$$\mathcal{L} = f \frac{n_1 n_2}{A}$$

Numero di p nei fasci

Frequenza di collisione

Superficie in cui collidono

⇒ Si cerca la massima luminosità (L) possibile



Rate di collisioni: **40 (20) MHz**

ovvero ogni 50 (25) ns

Dimensione eventi  **$\sim 1$  Mbyte**

- Impossibile salvarli tutti!
- Band width limit  $\sim 100$  Gbyte/s

**TRIGGER:** Selezione in tempo reale

- Per ridurre rate a  $\sim 100$  Hz per scrittura
- A tutti gli effetti un'analisi di fisica degli eventi

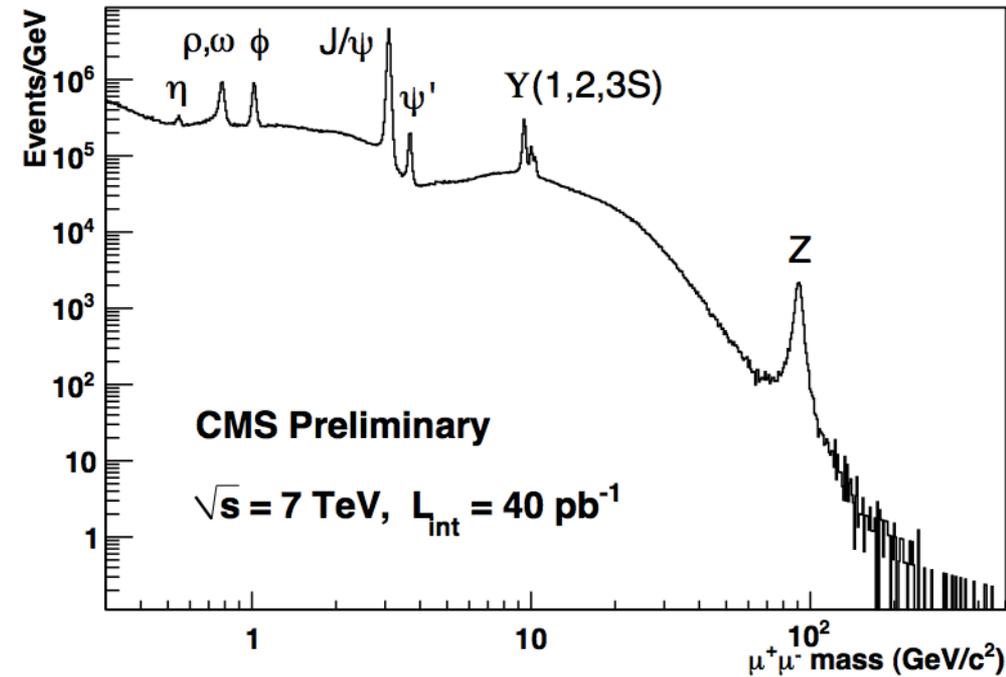
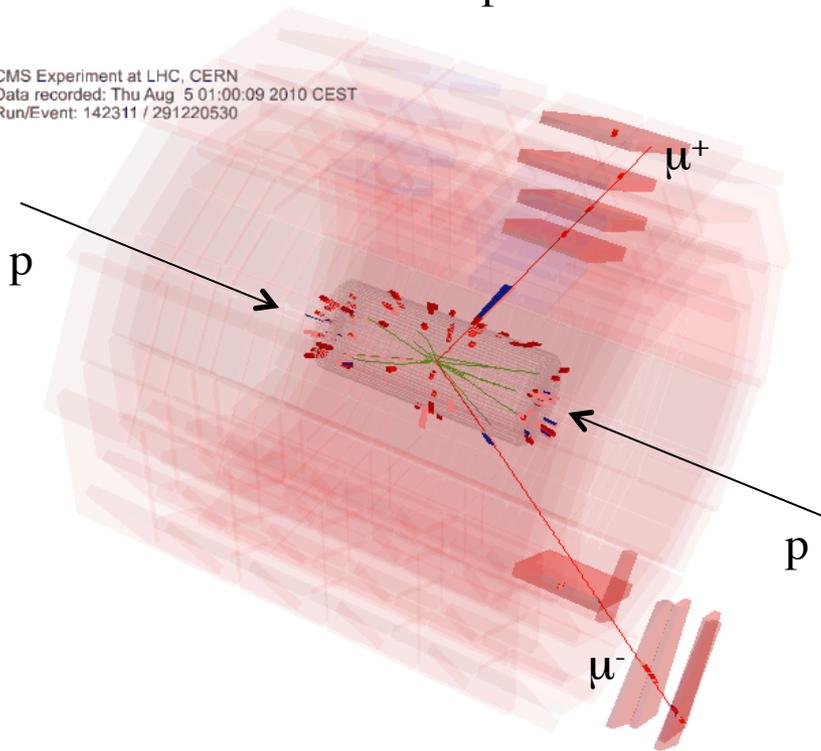
**Analisi off-line:** ulteriore selezione di 1 evento interessante ogni  $\sim 10^6$

## Le particelle "interessanti" decadono istantaneamente

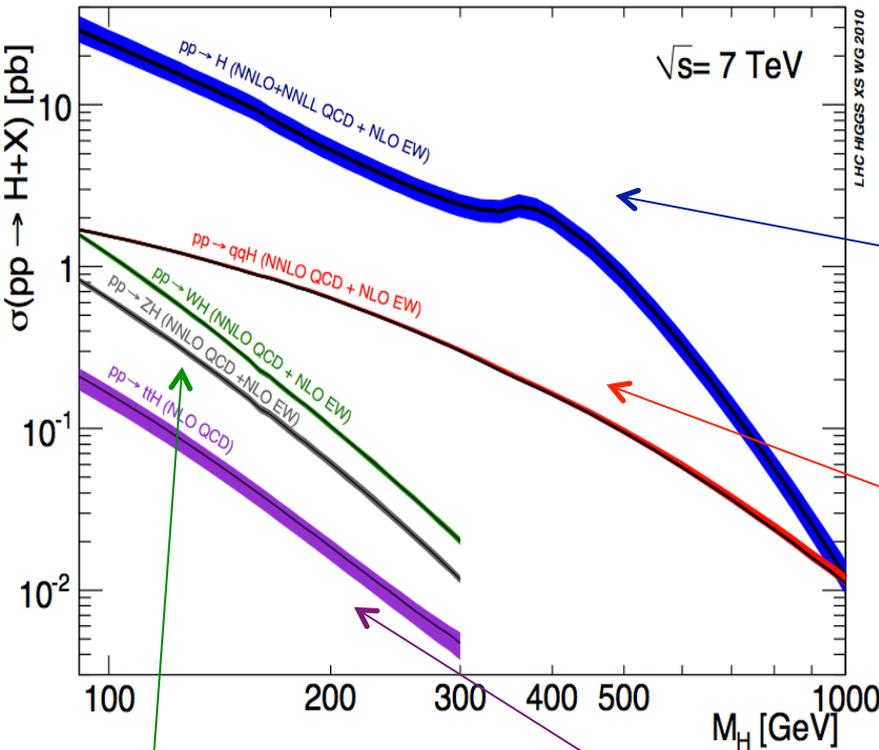
- Dobbiamo cercare i loro prodotti di decadimento
- Spesso in un fondo ("background") di eventi simili prodotti per es. da processi già noti

Esempio: **risonanze nello spettro  $\mu^+\mu^-$**  in collisioni pp

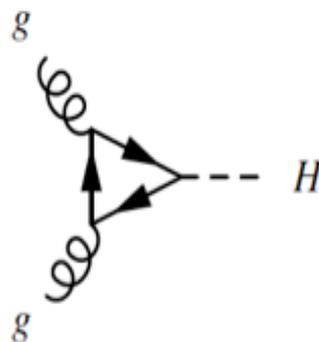
CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Thu Aug 5 01:00:09 2010 CEST  
Run/Event: 142311 / 291220530



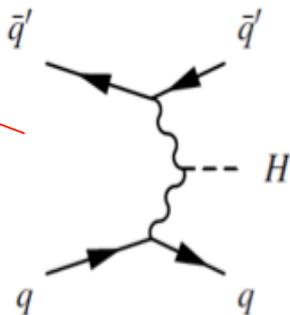
# Processi di produzione di Higgs at LHC



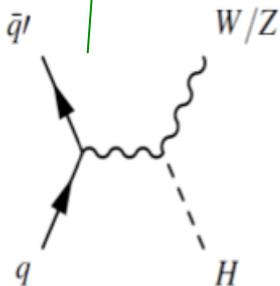
**ggF: Fusione di due gluoni**



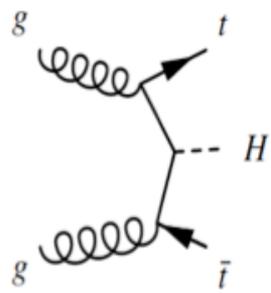
**qqH: fusione di WW o ZZ**



**WH: ZH: Higgs-strahlung**

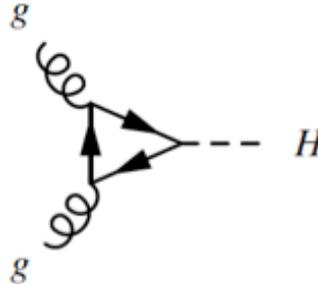


**ttH: fusione di due quark**



# Produzione e decadimenti del bosone di Higgs

Il bosone di Higgs puo' essere prodotto nella fusione di 2 dei gluoni che sono all'interno del protone:



Il bosone di Higgs non e' una particella stabile

Decade in particelle elementari piu' leggere

Gli "stati finali" sono molteplici; i piu' importanti sono:

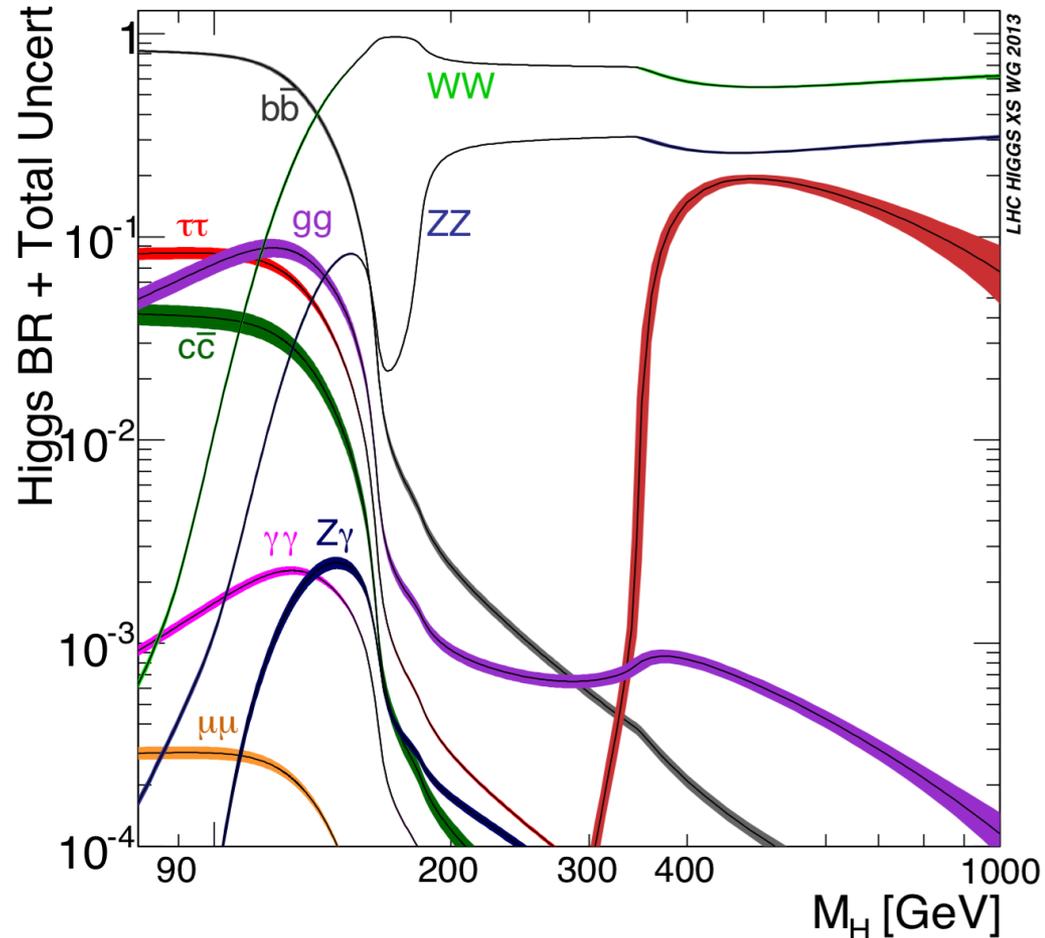
- $H \rightarrow$  due fotoni ( $H \rightarrow \gamma\gamma$ )
- $H \rightarrow$  quattro leptoni, per esempio quattro elettroni o quattro muoni ( $H \rightarrow 4l$ )



# Come decade l'Higgs

## 5 modi di decadimento studiati

	Exp Sig (CMS) @125.7	$\sigma_M/M$
• bb	2.6 $\sigma$	10%
• $\tau\tau$	3.9 $\sigma$	10-20%
• WW	5.4 $\sigma$	16%
• ZZ	6.3 $\sigma$	1-2%
• $\gamma\gamma$	5.3 $\sigma$	1-2%
• ricerche in $Z\gamma, \mu\mu$		



# Produzione e decadimenti del bosone di Higgs

La produzione e gli “stati finali” sono previsti con accuratezza dalla teoria

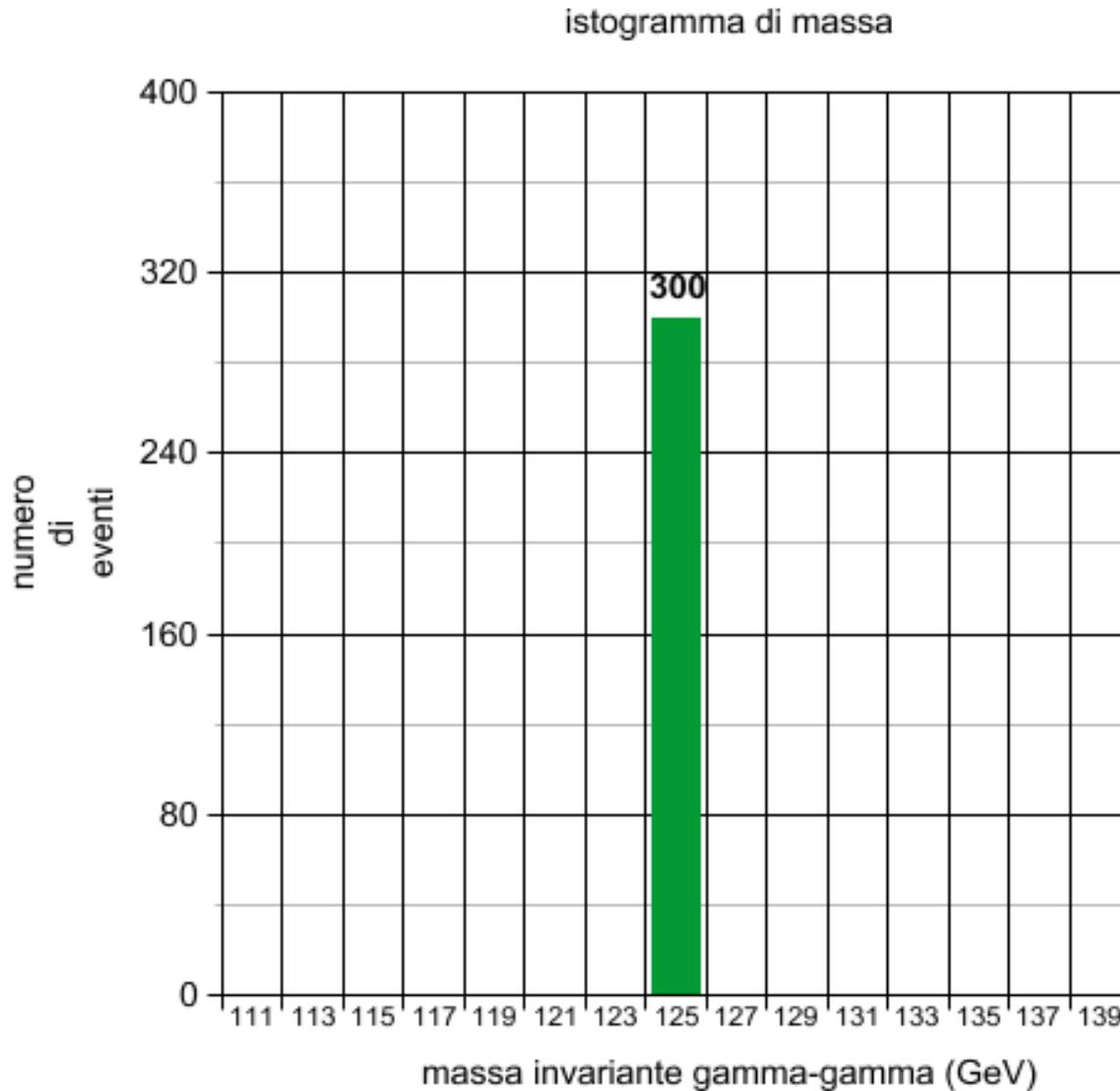
**La teoria non fornisce previsione sulla massa del bosone di Higgs**

Il bosone di Higgs, come tutte le particelle instabili, viene “ricostruito” partendo dai prodotti che ci aspettiamo dal suo decadimento

Nei rivelatori dobbiamo dunque poter ricostruire i prodotti di decadimento

e con una **precisione** tale (sul momento) da poterli distinguere dagli altri eventi non interessanti, e dominanti.

# Decadimento di una particella di massa 125 GeV



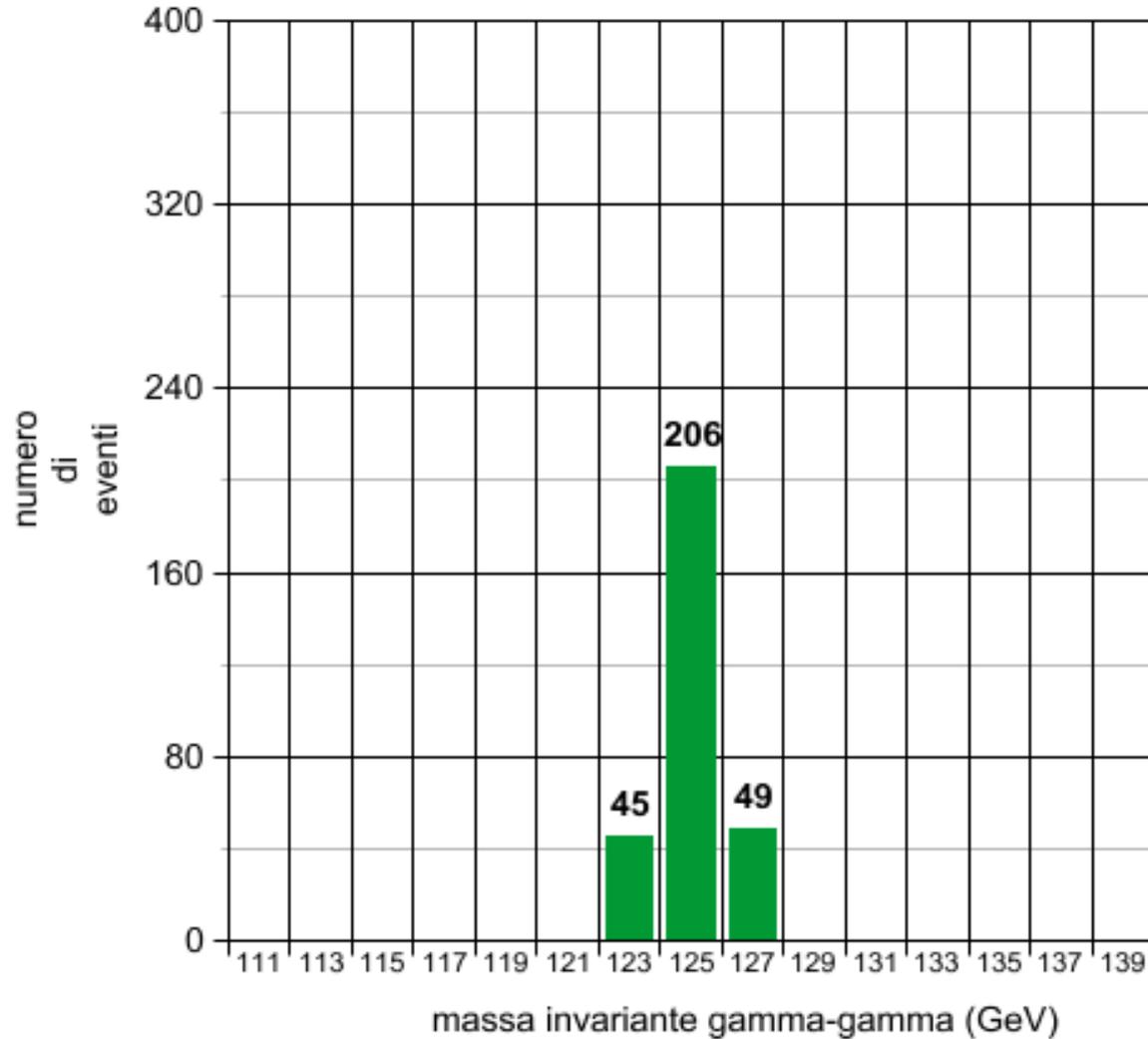
*Questa e' una simulazione*

$$\vec{p} = \left. \begin{array}{c} E \\ \left( \begin{array}{c} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{array} \right) \end{array} \right\} \left( \begin{array}{c} E \\ \vec{p} \end{array} \right)$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

# Decadimento di una particella di massa 125 GeV

istogramma di massa



*Questa e' una simulazione*

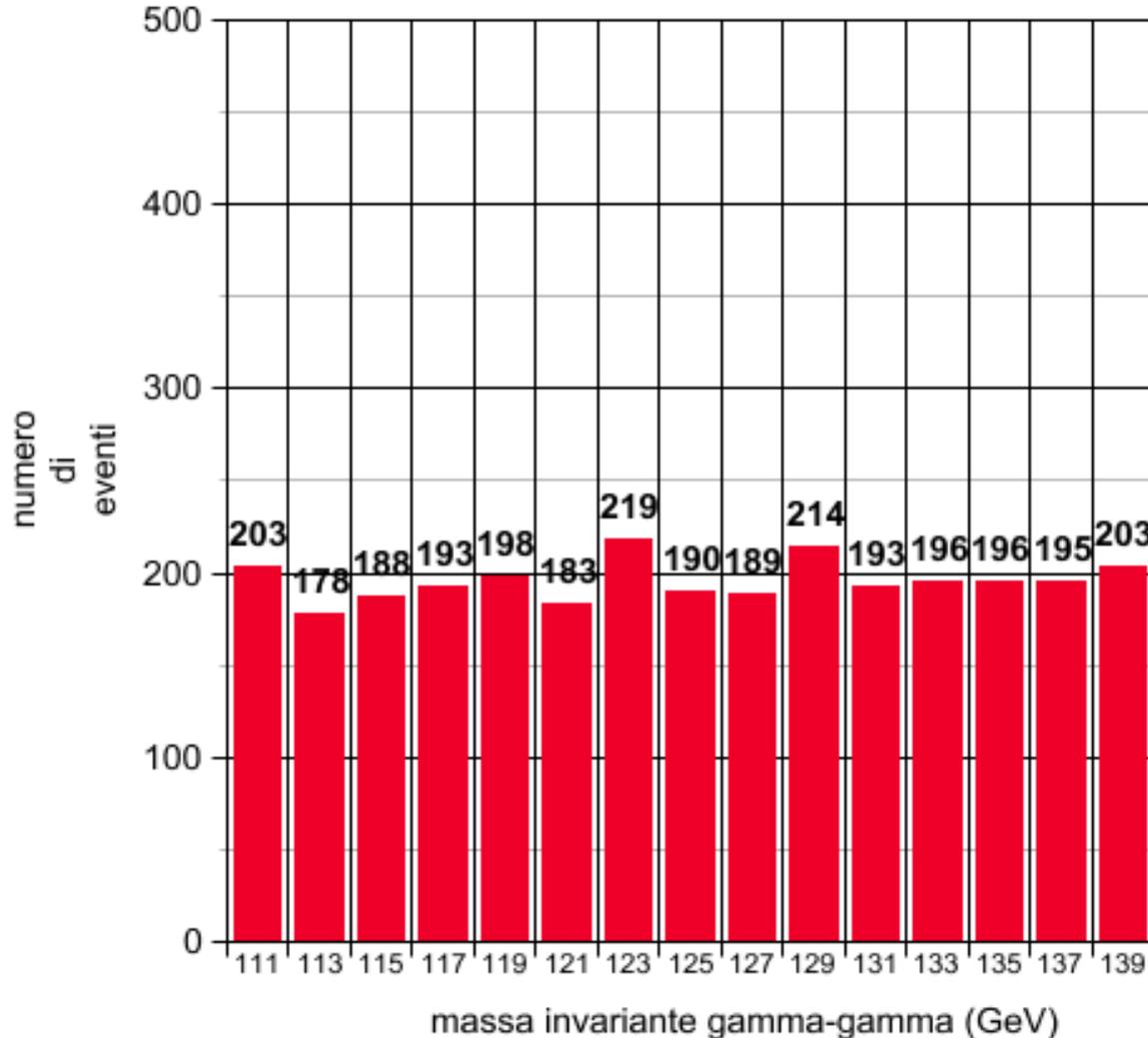
$$\vec{p} = \left. \begin{array}{c} E \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{array} \right\} \begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

# Il fondo

Massa di 2 fotoni non associati al decadimento di una particella

istogramma di massa

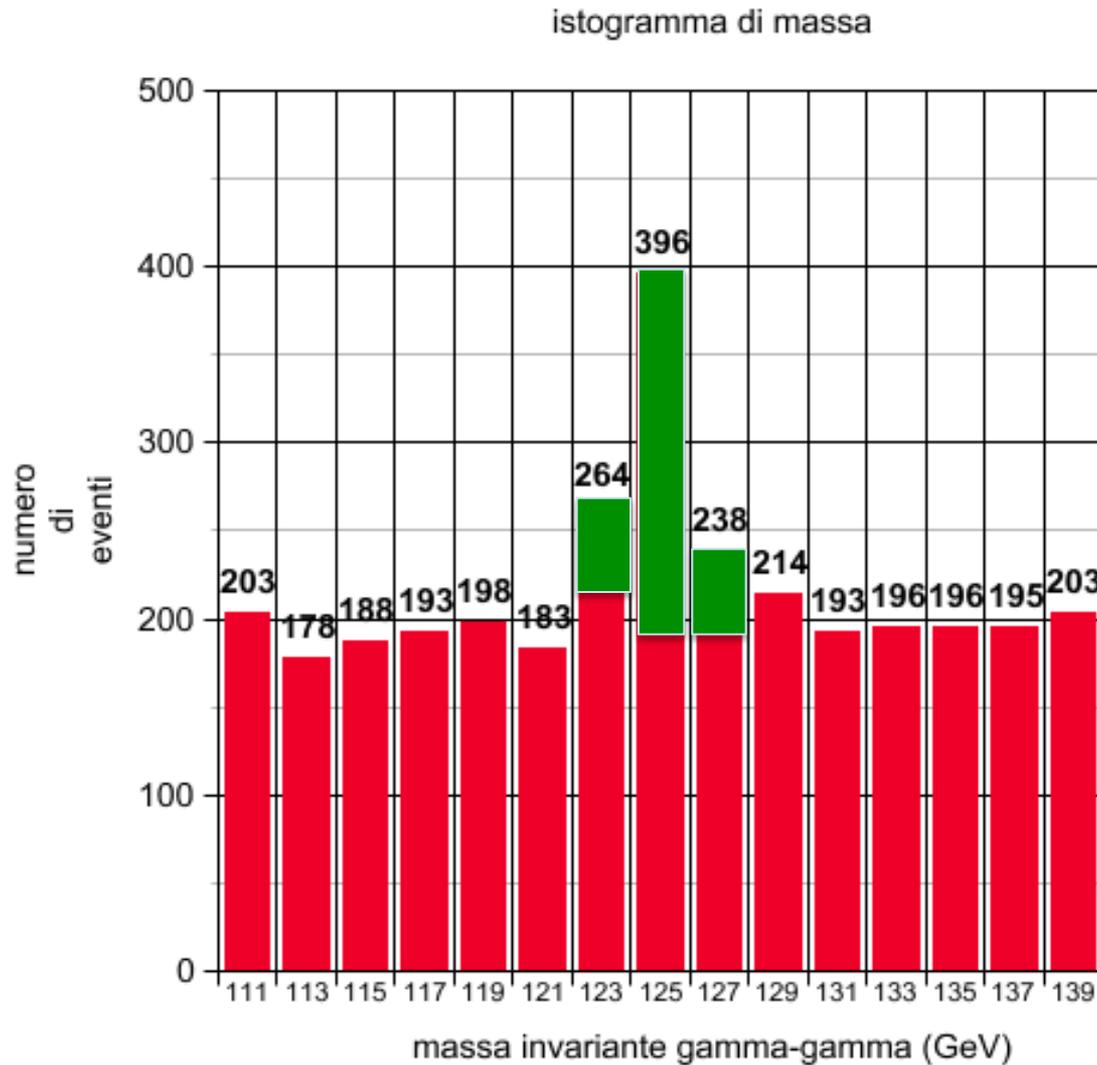


*Questa e' una simulazione*

$$\vec{p} = \left. \begin{array}{c} E \\ \left( \begin{array}{c} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{array} \right) \end{array} \right\} \left( \begin{array}{c} E \\ \vec{p} \end{array} \right)$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

# Fondo e Segnale



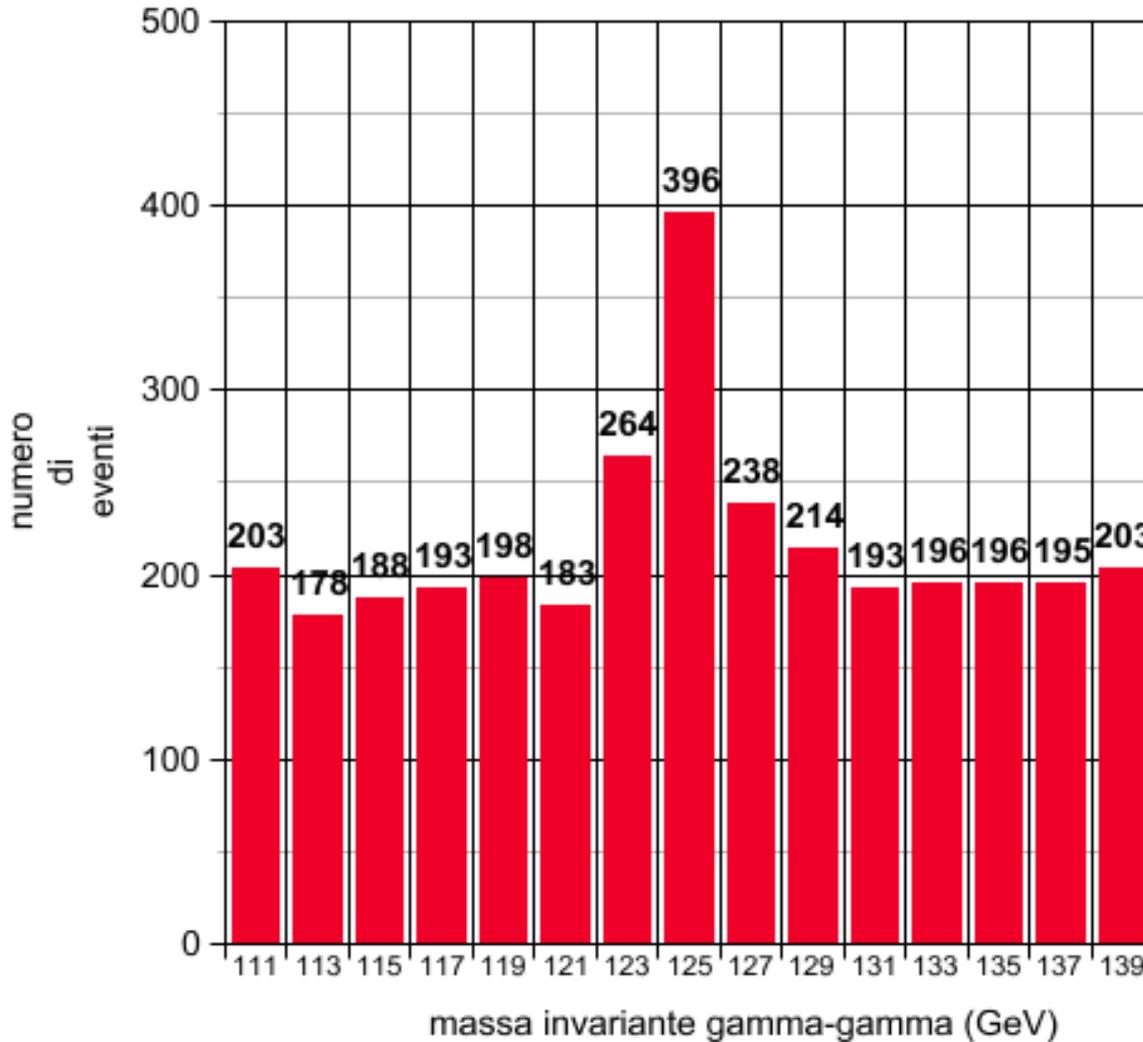
*Questa e' una simulazione*

$$\vec{p} = \left. \begin{array}{c} E \\ \left( \begin{array}{c} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{array} \right) \end{array} \right\} \left( \begin{array}{c} E \\ \vec{p} \end{array} \right)$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

# Fondo e Segnale

istogramma di massa



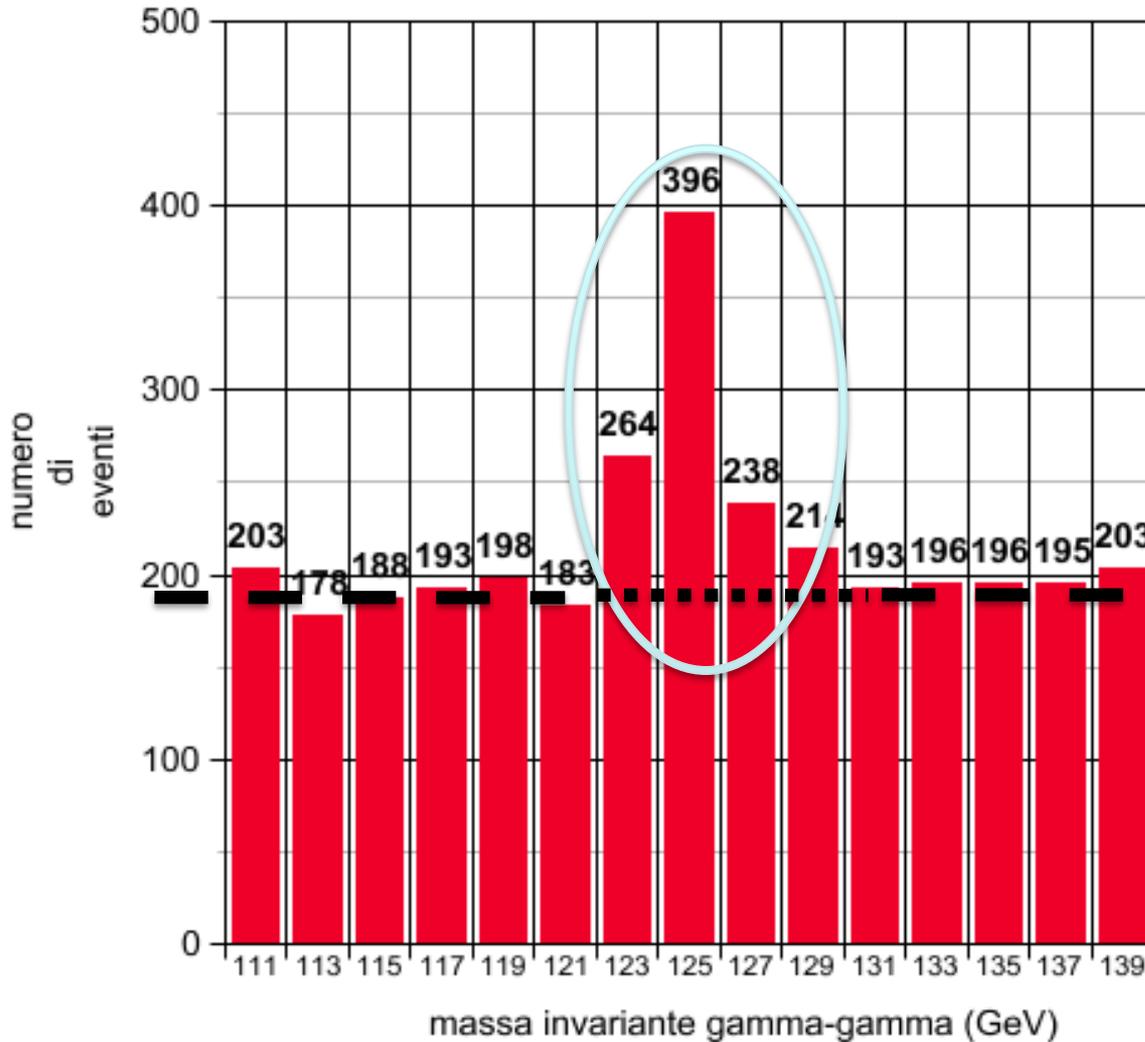
*Questa e' una simulazione*

$$\vec{p} = \left. \begin{array}{c} E \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{array} \right\} \begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

# Fondo e Segnale

istogramma di massa



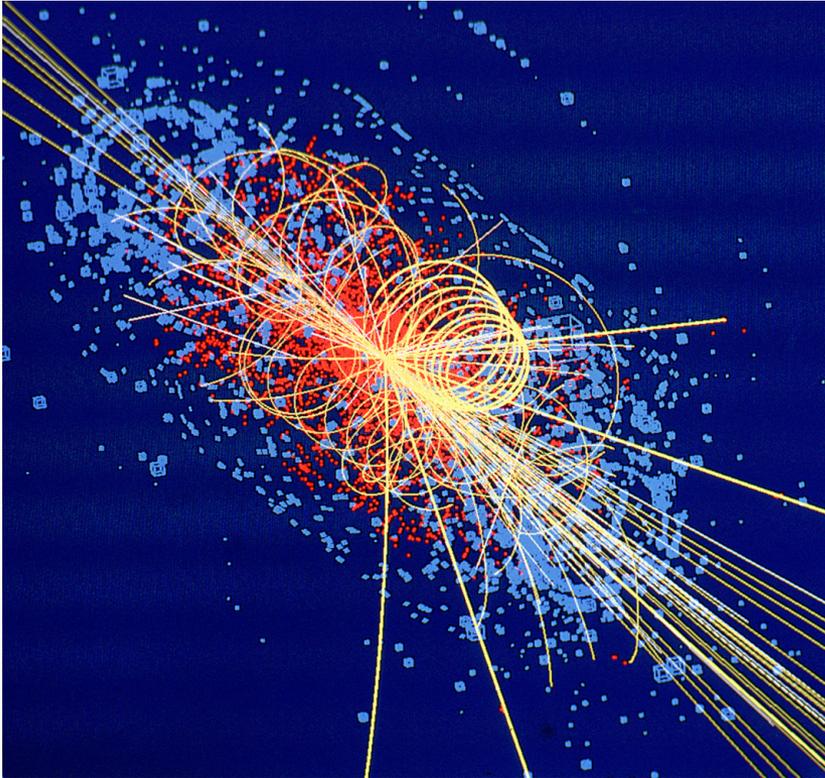
*Questa e' una simulazione*

$$\vec{p} = \left. \begin{array}{c} E \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{array} \right\} \begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

# Higgs in 4 leptoni

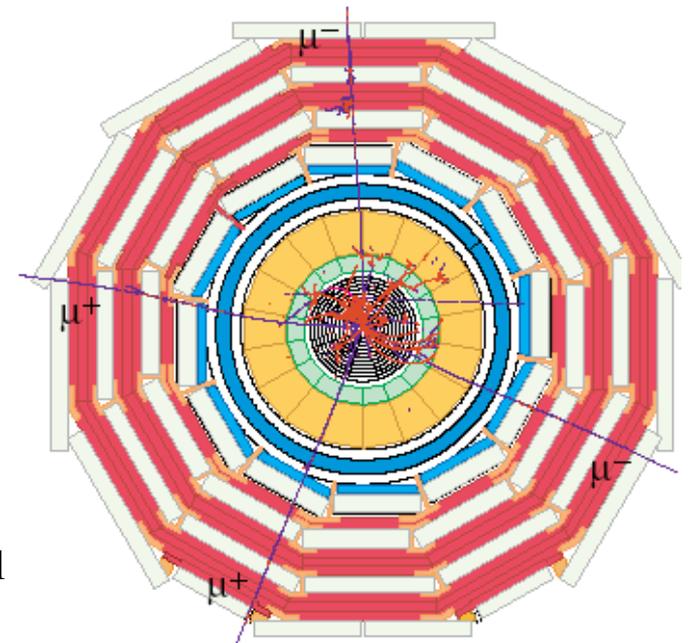
## Evento simulato di produzione di Higgs



L'evento è complesso perché lo stato iniziale è complesso: il protone è una particella composta da particelle elementari che interagiscono tra loro. Nello stato finale avremo centinaia di particelle prodotte + (forse!) quella di interesse.

Il protone è formato da quark e gluoni:  
2 gluoni interagiscono e producono Higgs  
gli altri quark e gluoni interagiscono producendo molte particelle:

$$pp \rightarrow H + X \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^- + X$$



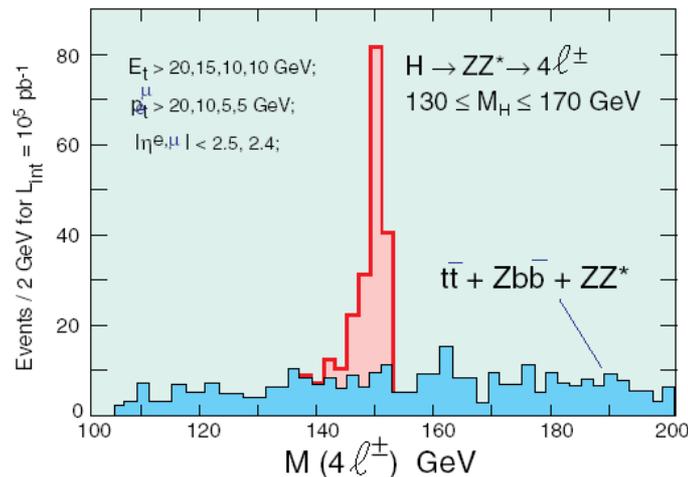
# Higgs in 4 leptoni

Uno dei possibili modi in cui l' Higgs puo' decadere e' in due bosoni Z che poi a loro volta decadono in 4 muoni.

Selezionando gli eventi che hanno almeno 4 muoni di **alto momento** si ricostruisce la massa della particella eventuale che e' decaduta nei 4 muoni:

$$M_H^2 = (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)^2$$

Dove p sono i "quadri-momenti" dei 4 muoni selezionati.



M(H) alta, i momenti delle particelle sono alti

→ Le tracce sono diritte

$$p = 0.3 \cdot B \cdot R$$

Avremo - se esiste - il picco del segnale e altri eventi di "fisica nota / Modello Standard" che si distribuiscono a vari valori di M(4-muoni)

## Alto momento trasverso

Particelle di alto momento trasverso provengono da particelle di alta massa:

Una relazione importante e' quella che c'e' tra  $M_X$  e  $p_T$ . Ad esempio per  $X \rightarrow 1,2$  si ha:

$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \theta = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2p_1p_2 \cos \theta$$

se si approssima  $m=0$  in quanto  $m \ll M_W$

$$= 2p_1p_2(1 - \cos \theta)$$

Se si suppone che la componente parallela lungo l'asse del fascio sia nulla,  $p_{//}=0$ , si ha:

$$M_X^2 = 2p_{T1}p_{T2}(1 - \cos \phi_{12})$$

Se  $X$  viene prodotto a riposo e dunque l'angolo  $\phi$  tra la particella 1 e 2 e' 180, si ha:

$$M_X^2 = 4p_{T1}^2 \quad \Rightarrow \quad p_T = \frac{M_X}{2}$$

Un oggetto pesante che decade produrrà delle particelle con un  $p_T$  dell'ordine di  $M/2$

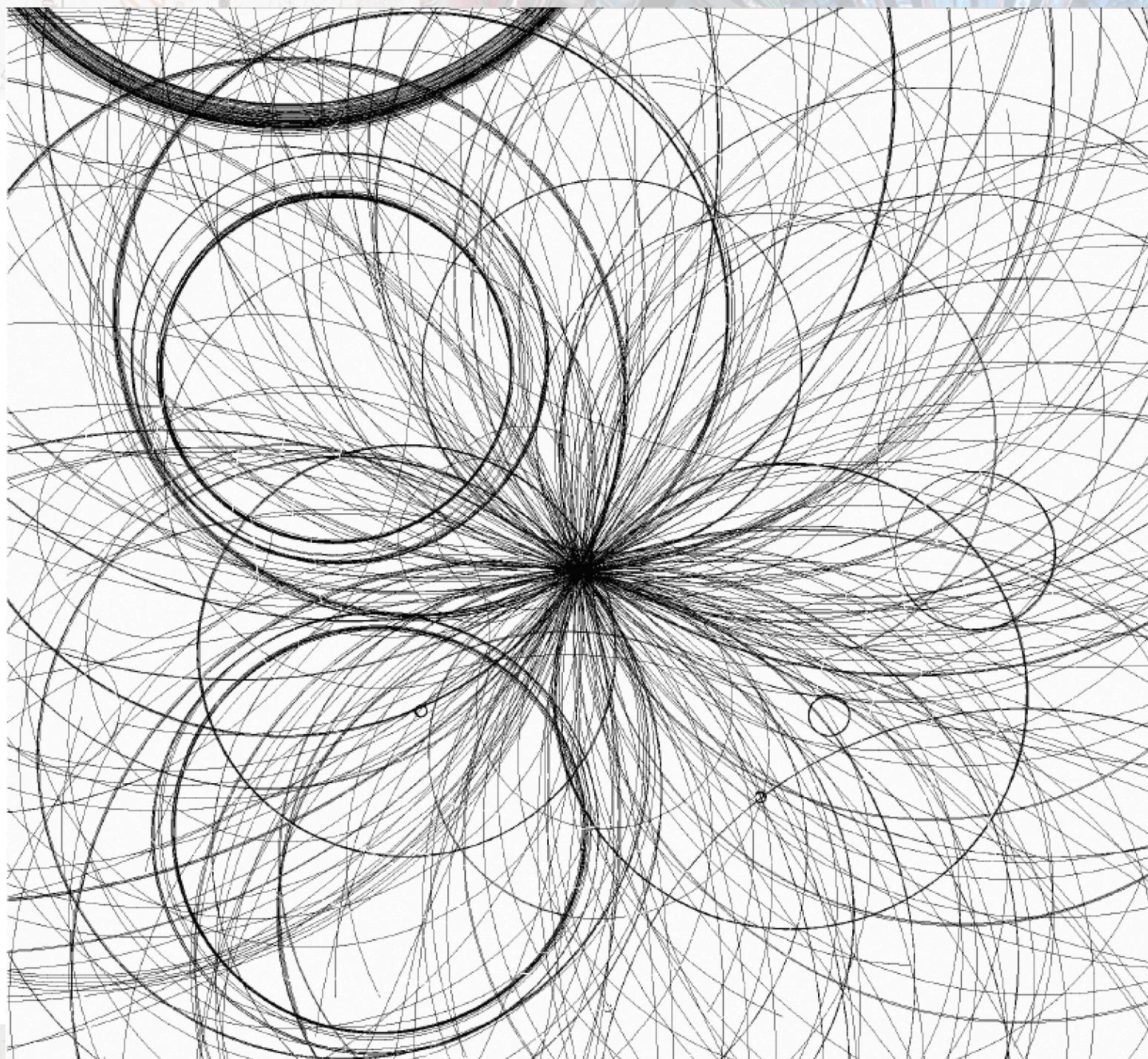
$$M(Z) = 90 \text{ GeV}, M(W) = 80 \text{ GeV}, M(H) = 125 \text{ GeV}$$

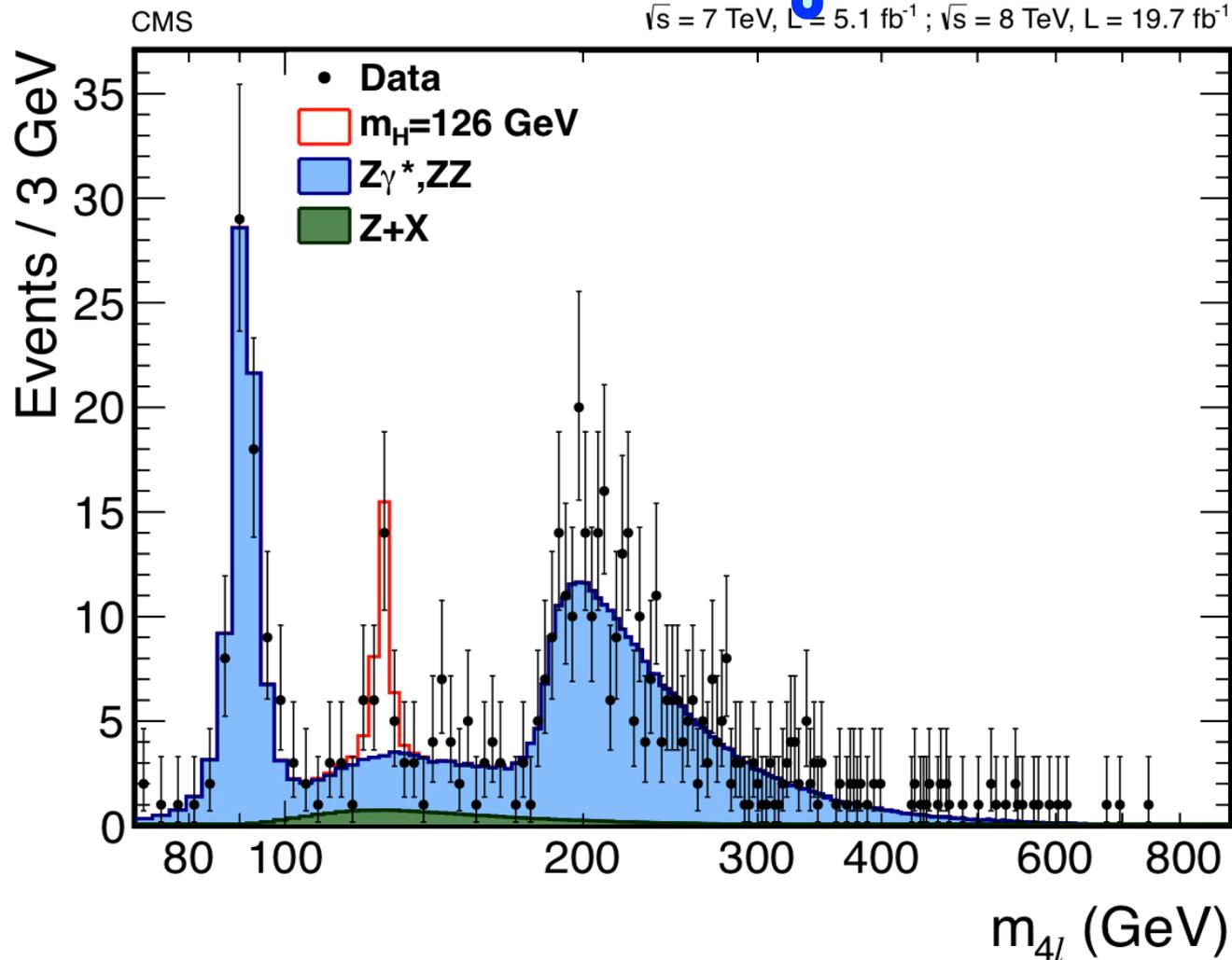
# Esercizio

18 collisioni pp  
sovrapposte a

$H \rightarrow 4$  muoni

Trova 4 tracce  
dritte





luglio 2012: E' stata scoperta una nuova particella, un bosone di Higgs  
La scoperta e' avvenuta prima del previsto data la buona comprensione  
dei rivelatori e la spettacolare performance dell'acceleratore.

# Il premio Nodel – ottobre 2013

## The Nobel Prize in Physics 2013

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2013 to

**François Englert**

Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium

**Peter W. Higgs**

University of Edinburgh, UK

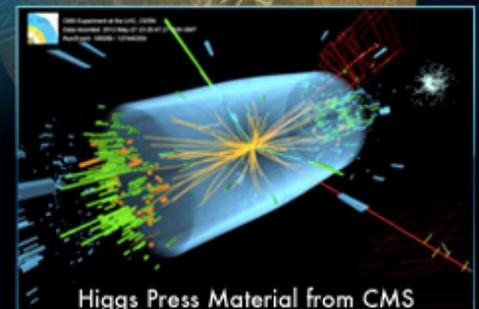
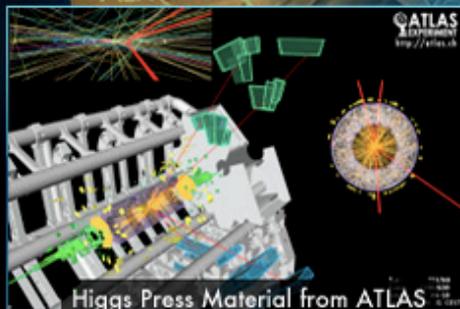
*“for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider”*

Congratulations to Professors

**François Englert & Peter Higgs**

for the

**2013 Nobel Prize in Physics**



## LHC: il programma futuro

Quello che abbiamo scoperto e' il bosone di Higgs del Modello Standard?

Se si, non ci aspettiamo dunque nient'altro?

Oppure e' il bosone di Higgs di uno dei modelli che introducono nuova fisica, per esempio la Supersimmetria, che prevede anche l'esistenza di particelle supersimmetriche.

Per capire questo bisogna misurare le caratteristiche del bosone con alta precisione

e in parallelo continuare a cercare altre particelle (altri bosoni, particelle supersimmetriche o particelle di modelli "esotici").

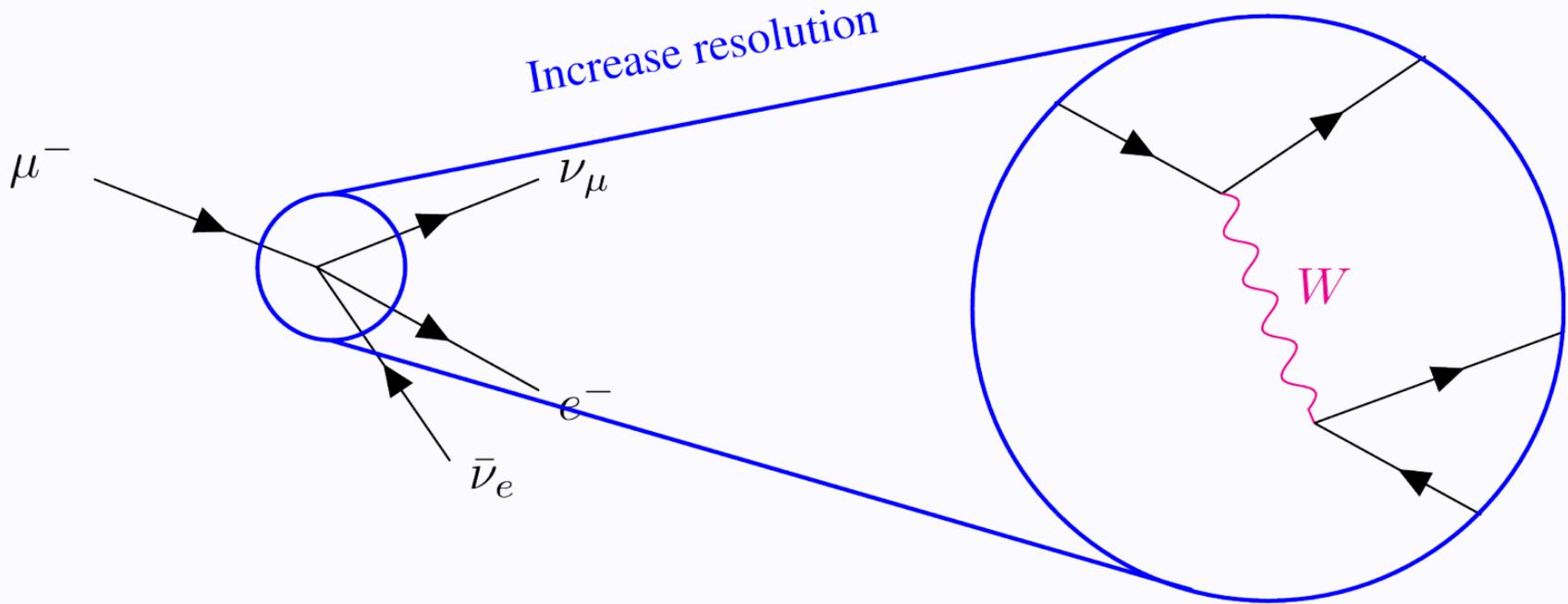
## Misure di precisione

Per fare misure di precisione avremo bisogno anche di **predizione teoriche molto precise** e dal confronto dei dati con la teoria capiremo se “manca” qualche cosa.

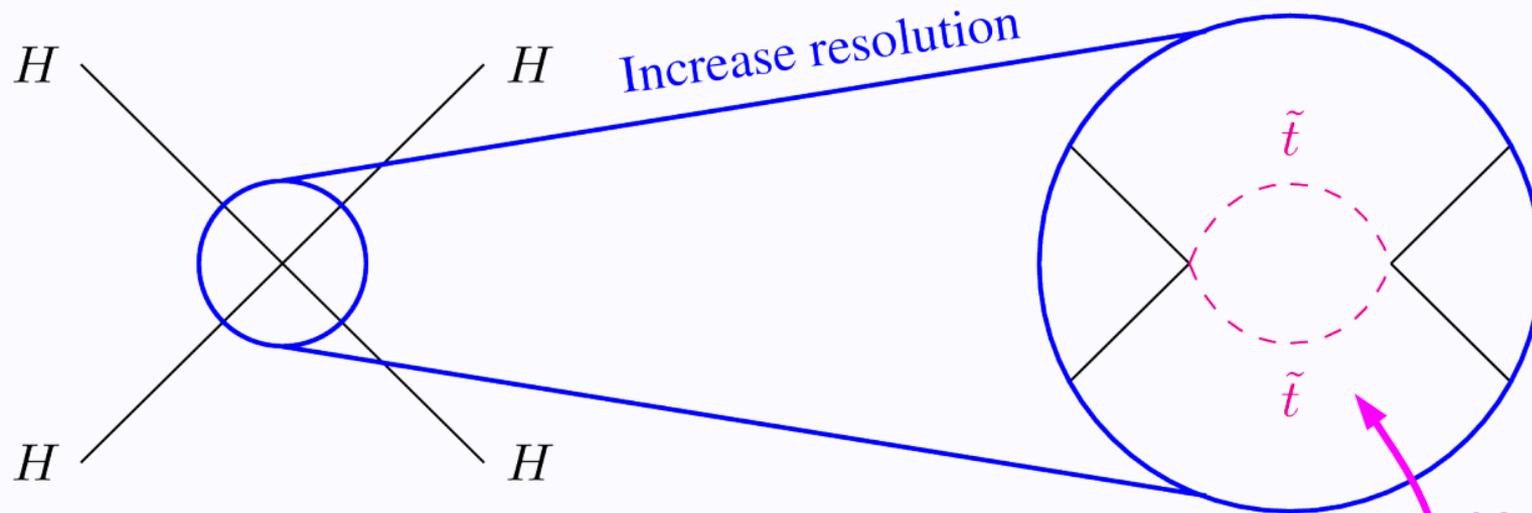
A LHC nonostante il collider sia adronico, sarà possibile arrivare a misurare al “percento” molte delle caratteristiche dell’Higgs.

Si stanno sviluppando vari metodi per poter misurare possibili deviazioni dovuti a presenza di nuova fisica

## Four-Fermi interaction and the weak bosons

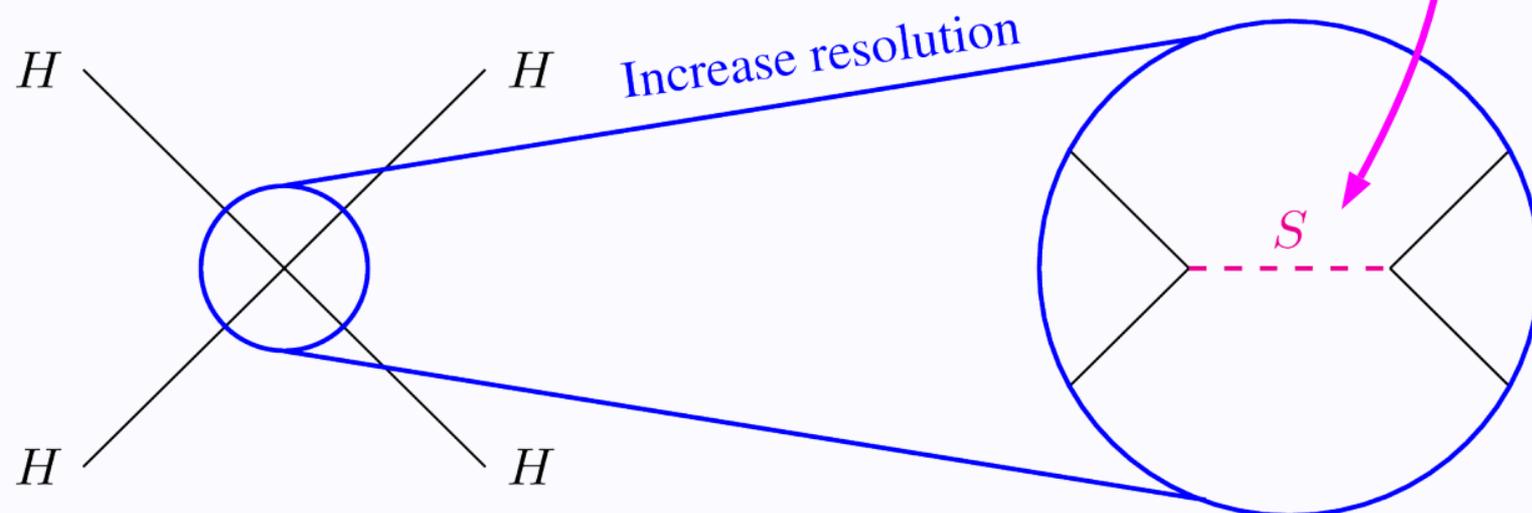


# Aumentare la precisione



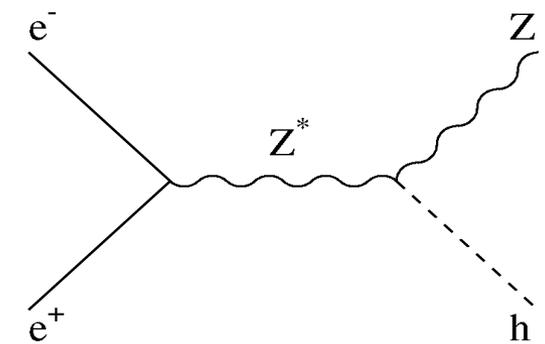
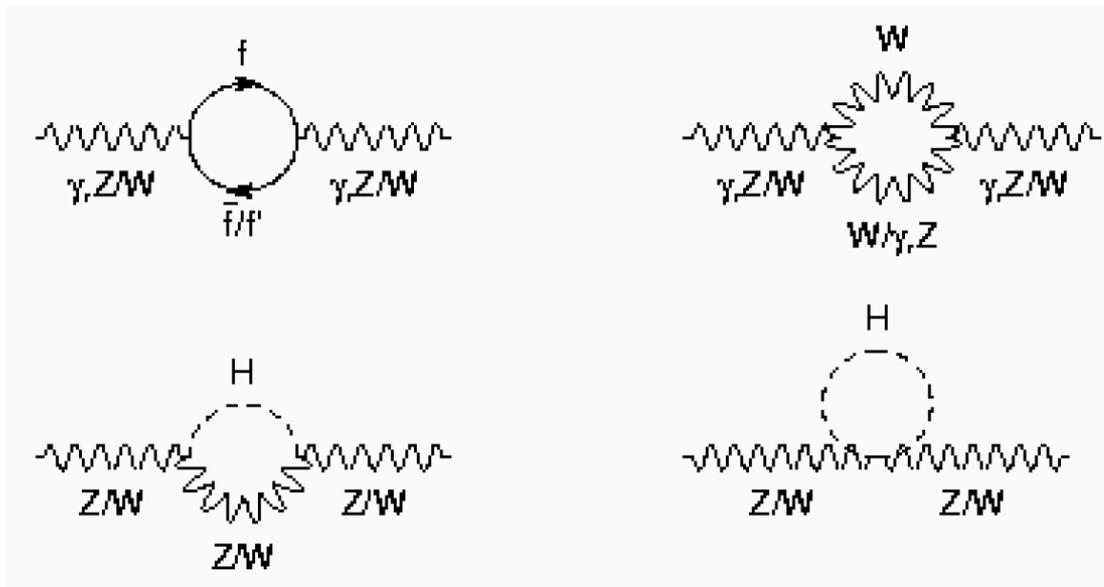
$$\mathcal{O} = (\partial_\mu |H|^2)^2$$

Various UV physics can give same EFT op



# Loop

Misurando con precisione tutte le proprietà, se nei "loop" ci sono particelle nuove, si potrà vedere l'effetto, così come a LEP si potevano avere indicazioni sul TOP e sull'Higgs



**Ricerca diretta**

**Ricerca indiretta via misure di precisione**

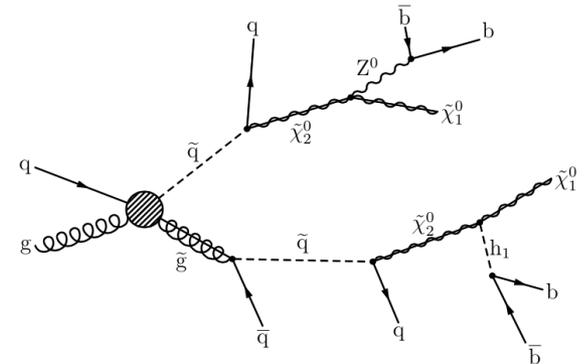
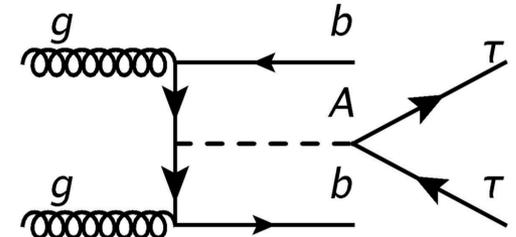
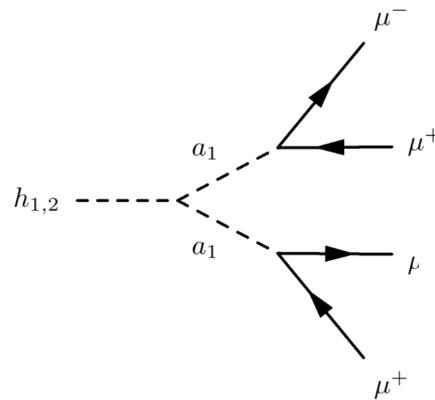
# Ricerca nuovi Higgs

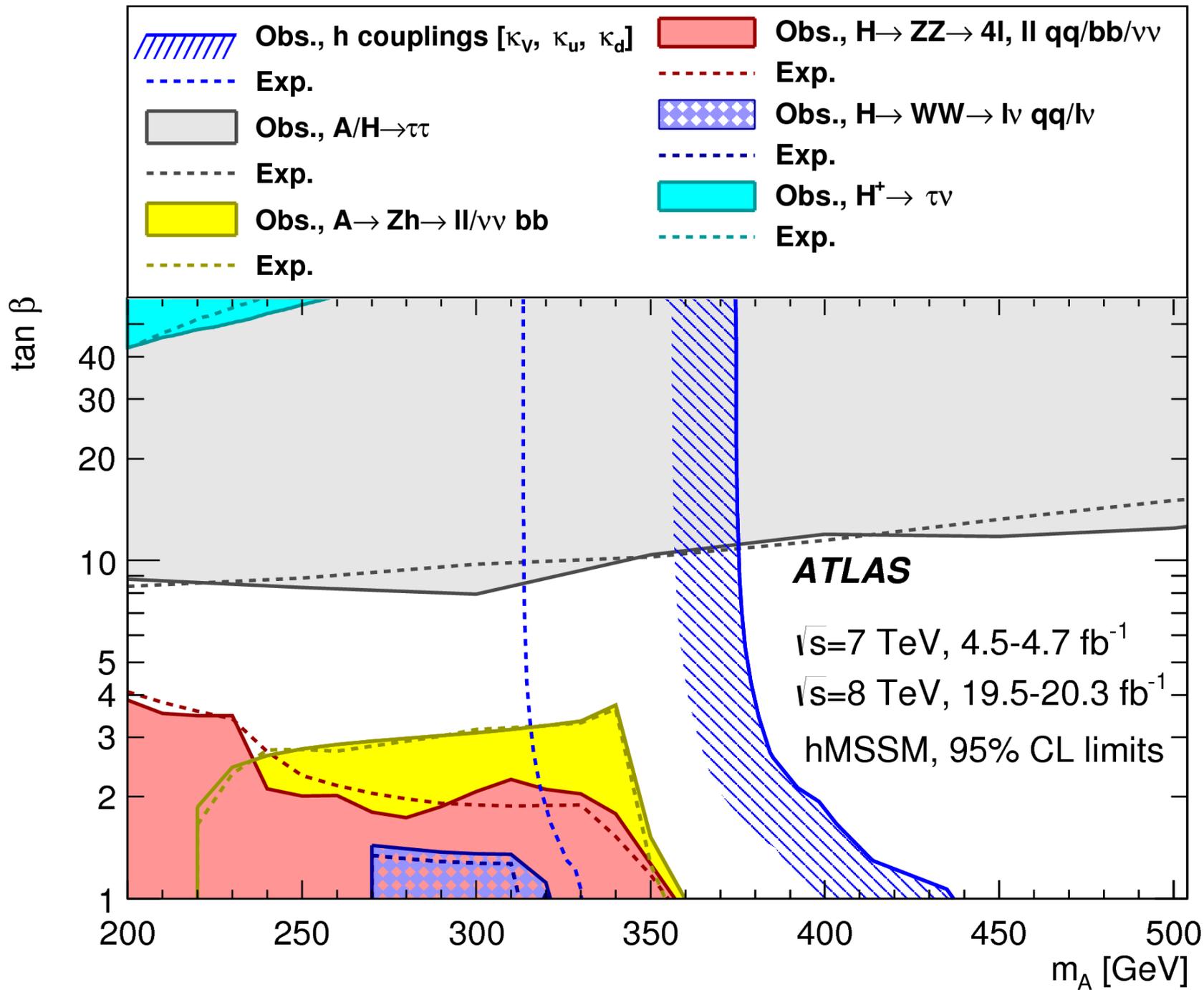
Nelle teorie supersimmetriche o nelle estensioni del Modello Standard, si postula l'esistenza di altri Higgs.

A LHC li stiamo cercando e li continueremo a cercare!  
Li potremmo vedere in molte topologie diverse:

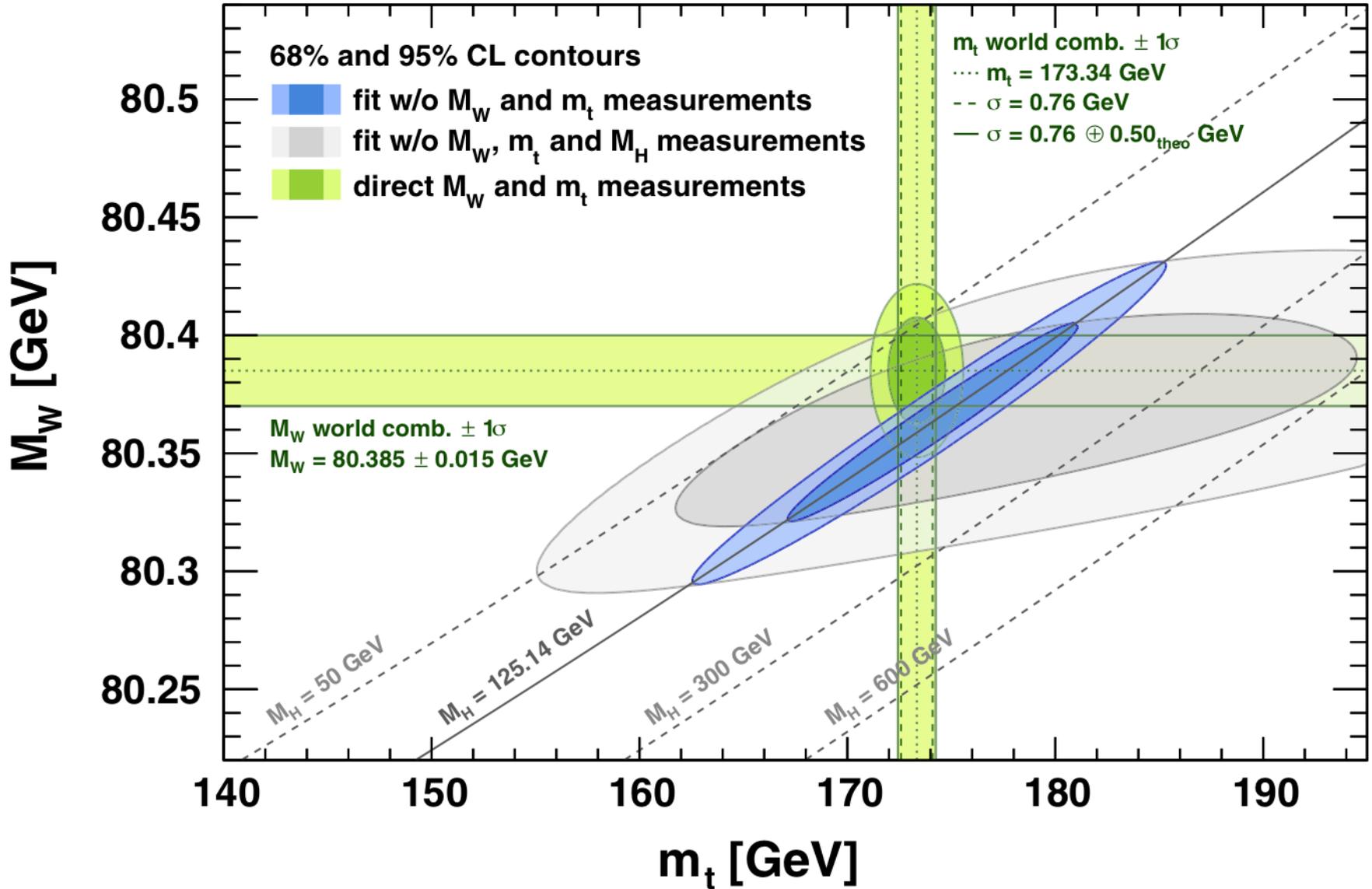
2HDM (or MSSM)  
 $h, H, A, H^+, H^-$

NMSSM  
 $a_{1,2}, h_{123}, H^+, H^-$

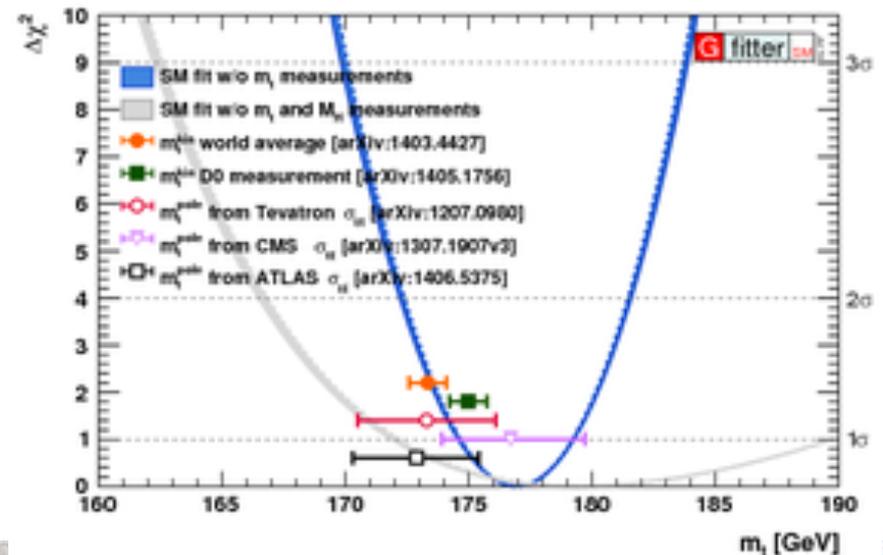
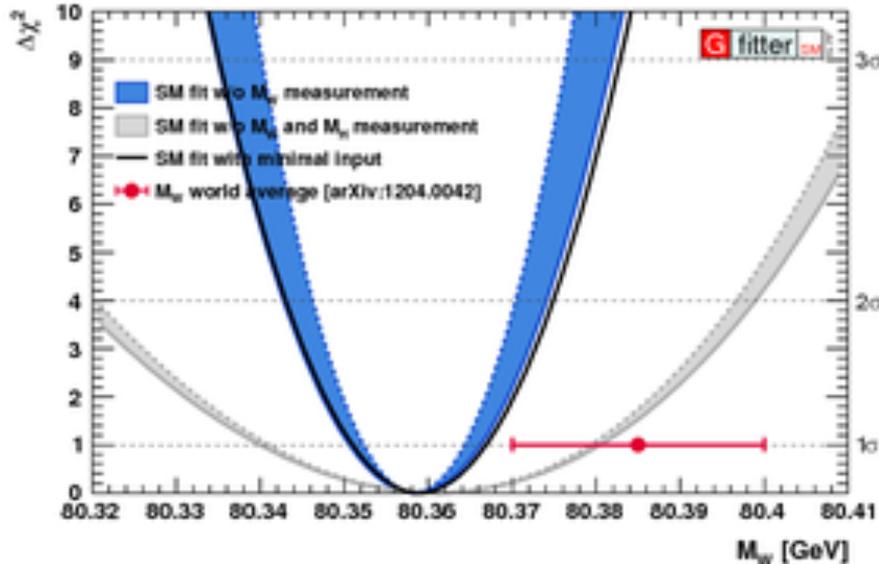
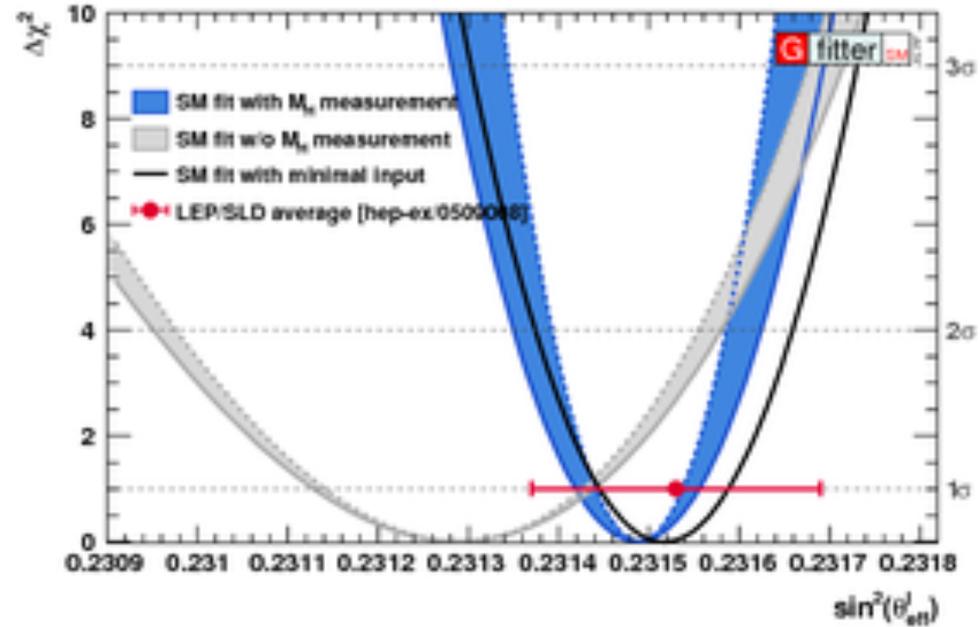
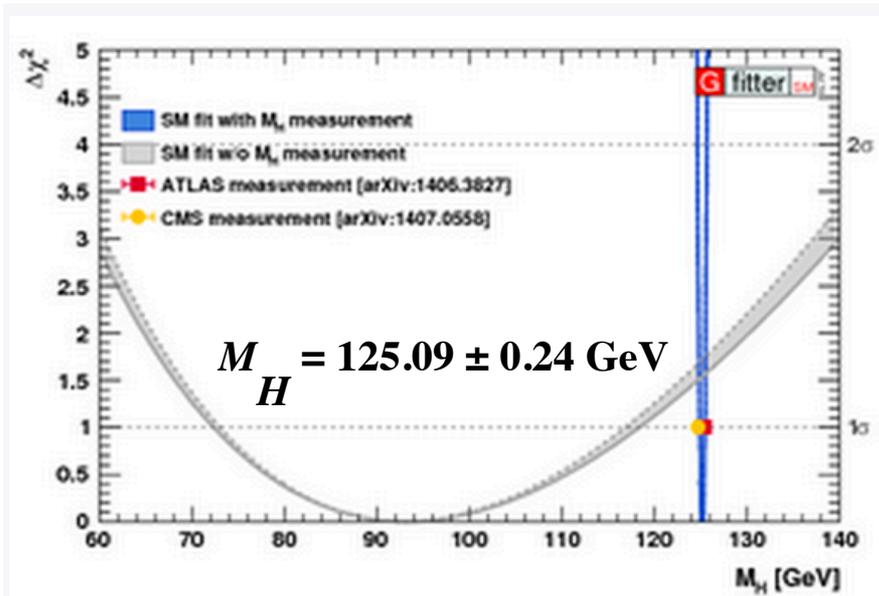




# Tutto deve essere consistente



# Misure dirette e indirette





**Sappiamo molto poco e vorremmo saperne di più:**

**Proseguiamo per 2 strade**

- **cercando cose nuove**
- **capendo a fondo quelle che abbiamo già trovato**

# BACKUP

# Cosa e' la massa di una particella

Il momento  $p$  e l'energia  $E$  di una particella che si muove ad una velocita' vicino a quella della luce sono date da:

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad E = mc^2$$

$$\vec{p} = \left. \begin{array}{c} E \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{array} \right\} \begin{array}{c} E \\ \vec{p} \end{array}$$

Quando lavoriamo con oggetti relativistici la massa a cui ci riferiamo e' quella a riposo i.e. l'energia a  $v \rightarrow 0$  divisa per  $c^2$ .

$$E^2 = m^2 \cdot c^4 + \vec{p}^2 c^2 \Rightarrow m = \frac{\sqrt{E^2 - \vec{p}^2 c^2}}{c^2}$$

Un punto importante: particelle relativistiche possono avere  $m=0$  e allo stesso tempo  $E \neq 0$  e  $p \neq 0$ .

Questo e' possibile solo se  $v=c$ .

# La massa delle particelle

Il protone ha massa, e' un oggetto composto (da quark) e la sua massa e' in teoria calcolabile.

Delle particelle elementari (quelle che non hanno struttura interna) non si puo' calcolare la massa, ma la si deve misurare sperimentalmente (ex: elettrone, muone, tau).  
La massa e' un numero fondamentale.

Altre particelle:

- il neutrino: si e' da poco scoperto che e' massivo;
- il fotone ha massa nulla.

i 3 quark che compongono il protone sono responsabili di solo 1% della sua massa. Il resto viene dall'interazione tra i quark e i gluoni



# Il fotone

In meccanica quantistica relativistica ogni particella è associata ad un campo e viceversa.

Il fotone è la particella (messaggero o “particella forza”) associata alla radiazione elettromagnetica. **È senza massa per definizione: la radiazione elettromagnetica viaggia nello spazio alla velocità della luce.**

Si capisce bene il perché del valore della sua massa.

Il potenziale elettrostatico ha range infinito: la propagazione delle onde elettromagnetiche è possibile su lunghe distanze.

# Interazioni deboli

Le interazioni deboli, per contro, sono a corto range: sebbene abbiano bisogno di “messaggeri” tipo il fotone, chiamati  $W^\pm$  e  $Z$ , la loro massa e' molto grande, circa 100 volte la massa del protone.

La connessione tra l'interazione elettromagnetica e l'interazione debole e' molto profonda: sono differenti aspetti della stessa interazione fondamentale (la teoria e' unificata → la teoria elettrodebole). Il perche' la massa del fotone e le masse di  $W$  e  $Z$  sono cosi' diverse e' veramente difficile da capire.

# Una soluzione possibile

Torniamo all'elettromagnetismo: Sappiamo che i fotoni possono comportarsi come particelle massive: questo succede quando viaggiano in un mezzo diverso dallo spazio vuoto.

La ragione fisica per questo è che la propagazione del campo elettrico e magnetico (ovvero del fotone) interagisce con il mezzo. L'effetto risultante è il “rallentamento” dell'onda che si propaga che è l'equivalente di una massa effettiva per il fotone che si propaga.

Si potrebbe dunque modificare lo spazio vuoto in modo tale che si comporti come un mezzo per le particelle che si propagano?

# La rottura spontanea di simmetria

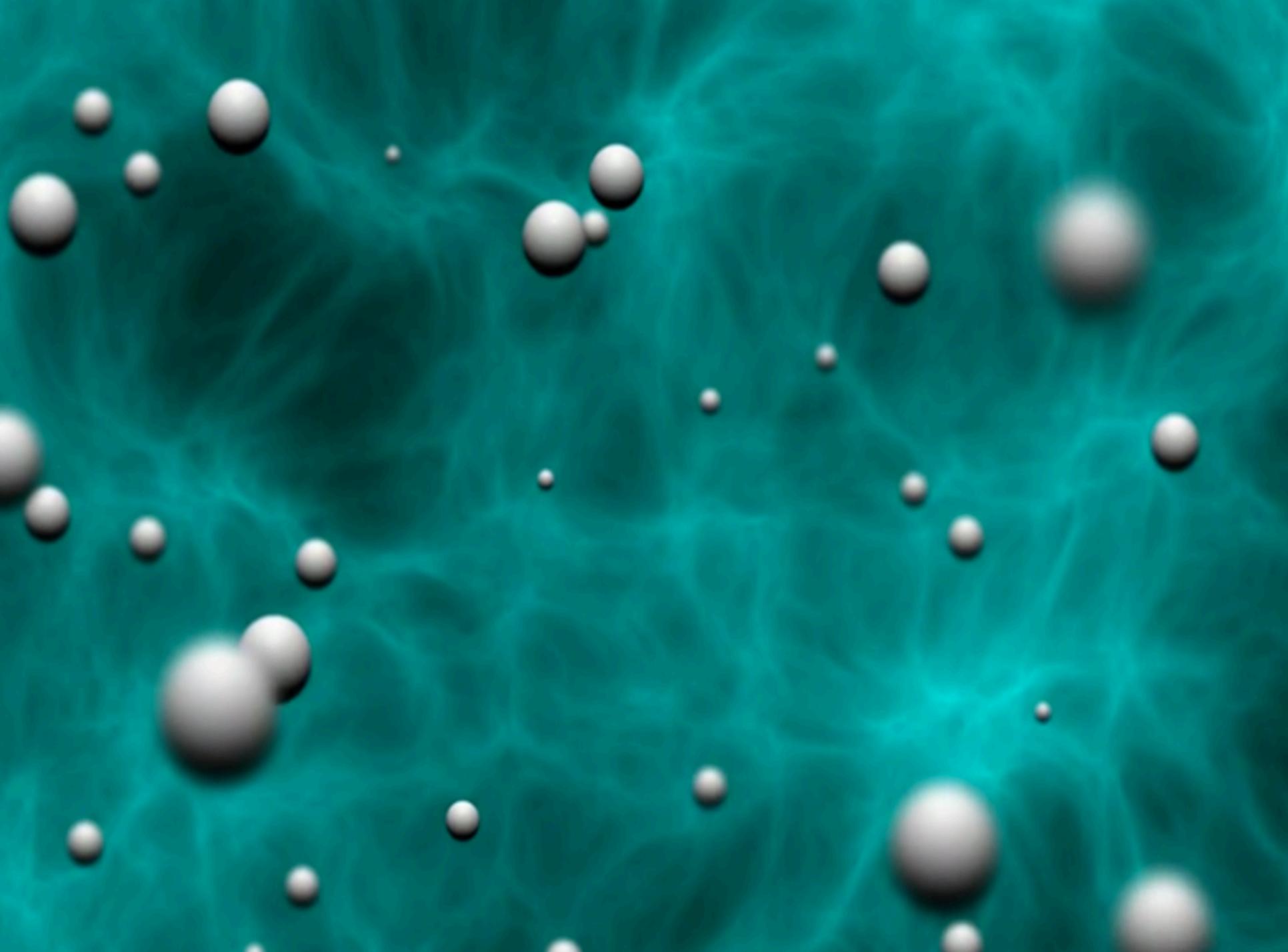
La risposta è sì: possiamo introdurre un campo tale che:

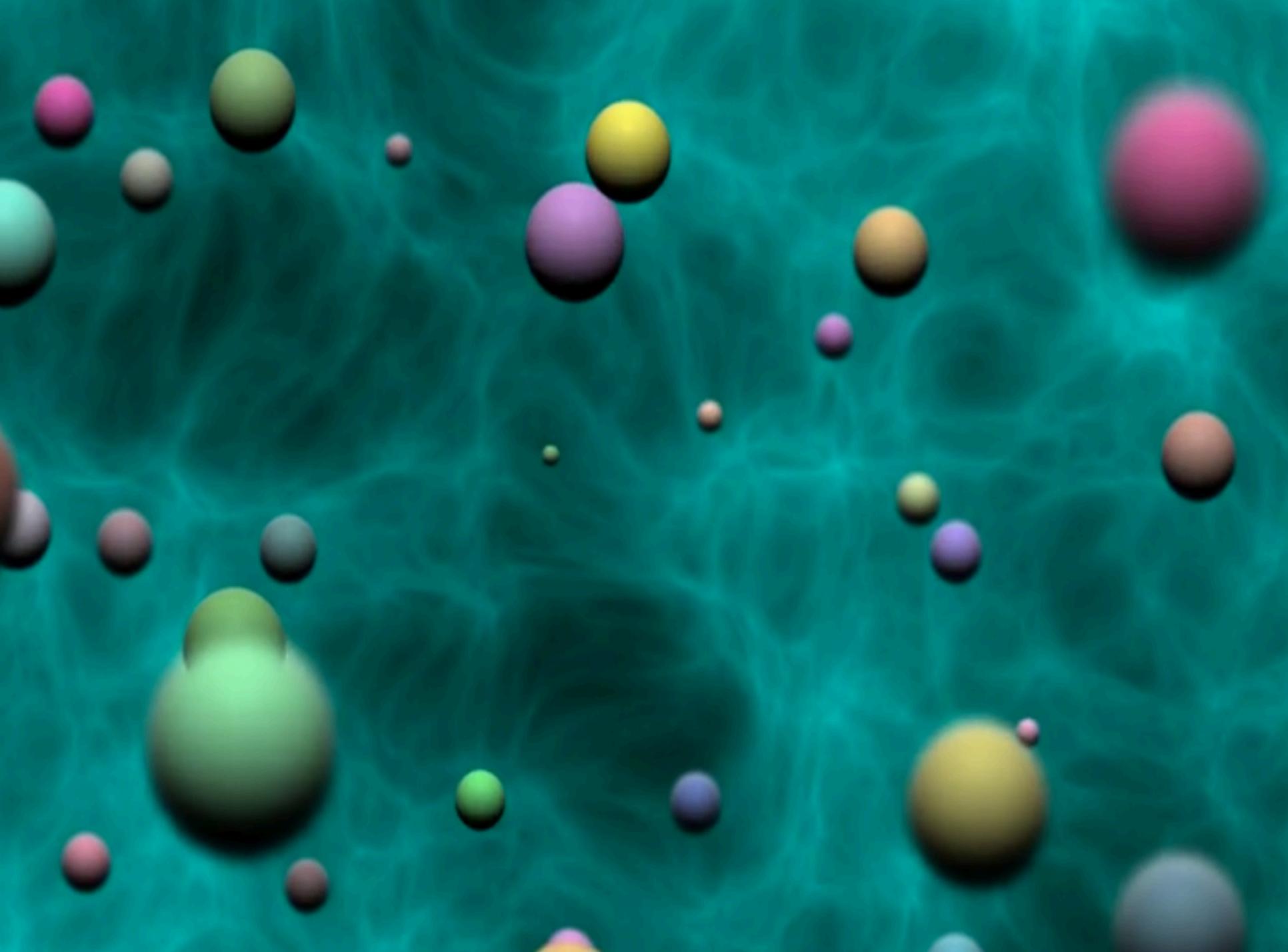
1. non abbia valore nullo quando “non accade nulla”  
(ovvero lo stato di minima energia / stato fondamentale non sia nullo)
2. che non violi i principi di base della invarianza relativistica
3. interagisca con tutti gli altri campi “nel modo giusto” (ossia vogliamo che ad esempio il fotone rimanga a massa nulla, mentre  $W$ ,  $Z$ , leptoni e quark acquistino massa). → **Le particelle “muovendosi” nel mezzo dove questo nuovo campo è presente, acquistano una massa effettiva**

Il punto 1 è quello che chiamiamo “**rottura spontanea di simmetria**”: lo stato fondamentale **non** corrisponde ad una configurazione totalmente simmetrica



**$10^{-10}$  SECONDS**  
**AFTER BIG BANG**

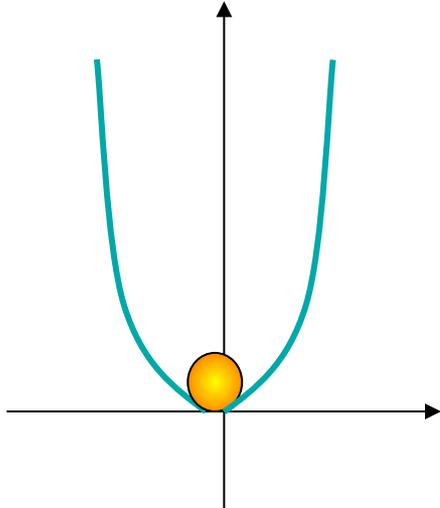




# Rottura spontanea di simmetria

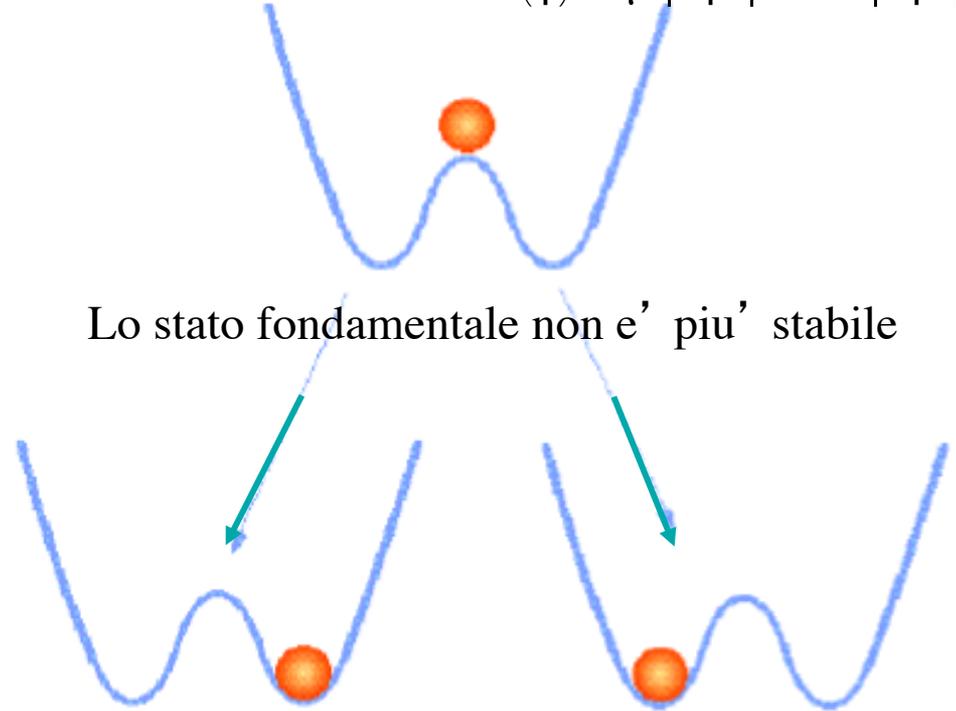
Graficamente possiamo illustrarlo così:

$$V(\phi) = +\mu |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$$



Simmetria dello stato fondamentale

$$V(\phi) = -\mu |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$$



Lo stato fondamentale non è più stabile

Per andare nello stato stabile, deve scegliere destra o sinistra. La scelta rompe la simmetria in modo "spontaneo"! Lo stato stabile non è più simmetrico

# Il meccanismo di Higgs

Il meccanismo descritto puo' essere implementato in modo consistente: **il meccanismo di Higgs**

Nella versione piu' semplice richiede l'introduzione di un solo campo scalare (SPIN = 0, con una sola componente - mentre il fotone ha 3 componenti): **il campo di Higgs.**

**In meccanica quantistica relativistica ci aspettiamo che al campo di Higgs sia associata una particella.**

La prova di consistenza interna delle teorie di campo con il meccanismo di rottura spontanea della simmetria di gauge e' stato molto laborioso ed e' uno dei risultati di piu' alto livello della fisica teorica.

# La massa del bosone di Higgs

Questo nuovo campo di Higgs responsabile della massa di tutte le particelle corrisponde ad una particella fisica:

**il bosone di Higgs.**

Osservazione diretta di questa particella e' necessaria per una conferma che tale meccanismo sia corretto.

Era l'unico pezzo mancante della teoria che oggi abbiamo delle interazioni fondamentali (il Modello Standard).

Nel Modello Standard il bosone di Higgs deve esistere con una massa al di sotto di **1 TeV**, altrimenti la teoria non e' piu' valida.

# Il bosone di Higgs

Se cammini e improvvisamente entri in una piscina, rallenti.

Se non vedessi l'acqua, penseresti di essere improvvisamente diventato pesante.

Acquisti "massa" perché interagisci con un mezzo che è tutto attorno a te.

Il campo di Higgs è l'equivalente dell'acqua che ti sta attorno.

# Il bosone di Higgs

Possiamo pensare alla particella di Higgs come 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 é equivalente ad una massa:



quark top



elettrone

“Immaginate questa stanza, togliete tutti gli oggetti, svuotatela.  
Quello che rimane e' il campo gravitazionale.

Immaginate ancora di poterla spostare nello spazio in un luogo dove non ci sia il campo gravitazionale.  
Quello che resta e' il campo di Higgs.”

Alvaro de Rujula  
ai poeti di POP-Science

