Scoperte e misure di precisione

Chiara Mariotti INFN-Torino

28-30 agosto, CERN

Programma per gli insegnanti italiani 2017

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

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_2.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

Precisione e nuove scoperte

Misurare con precisione delle quantita' 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

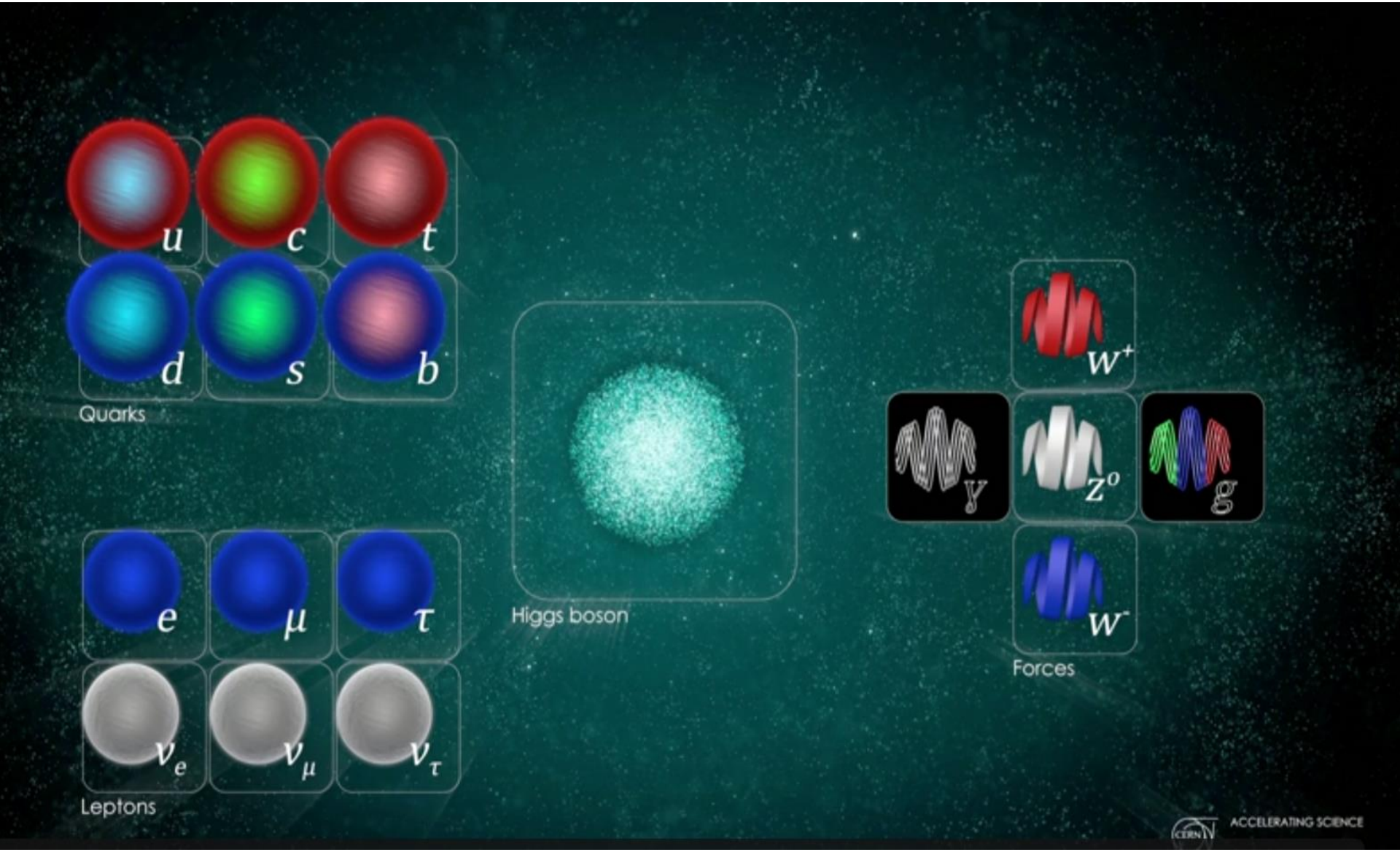


Table 2.1: Properties of the quarks [5].

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	173.21×10^3
	b	-1/3	4.18×10^3

Table 2.2: Properties of the leptons [5].

Lepton properties			
Generation	Flavour	Electric charge [e]	Mass [MeV]
I	e	-1	0.511
	ν_e	0	$<2 \times 10^{-3}$
II	μ	-1	105.66
	ν_μ	0	$<2 \times 10^{-3}$
III	τ	-1	1776.82
	ν_τ	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
γ	0	0	electromagnetic
$W^\pm$	± 1	80.385	weak
Z	0	91.188	weak

La Lagrangiana del MS

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

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

$$\mathcal{L}_{\mathrm{MS}} = -\frac{1}{4}\,\overline{W}_{\mu\nu}\cdot\overline{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4}\,B_{\mu\nu}B^{\mu\nu}$$

$$+\ \overline{L}\gamma^{\mu}\left[i\partial_{\mu} - g\,\frac{1}{2}\,\overline{\tau}\cdot\overline{W}_{\mu} - \frac{g'}{2}\,YB_{\mu}\right]L$$

$$+\ R\gamma^{\mu}\left[i\partial_{\mu} - g'\,\frac{Y}{2}\,B_{\mu}\right]R$$

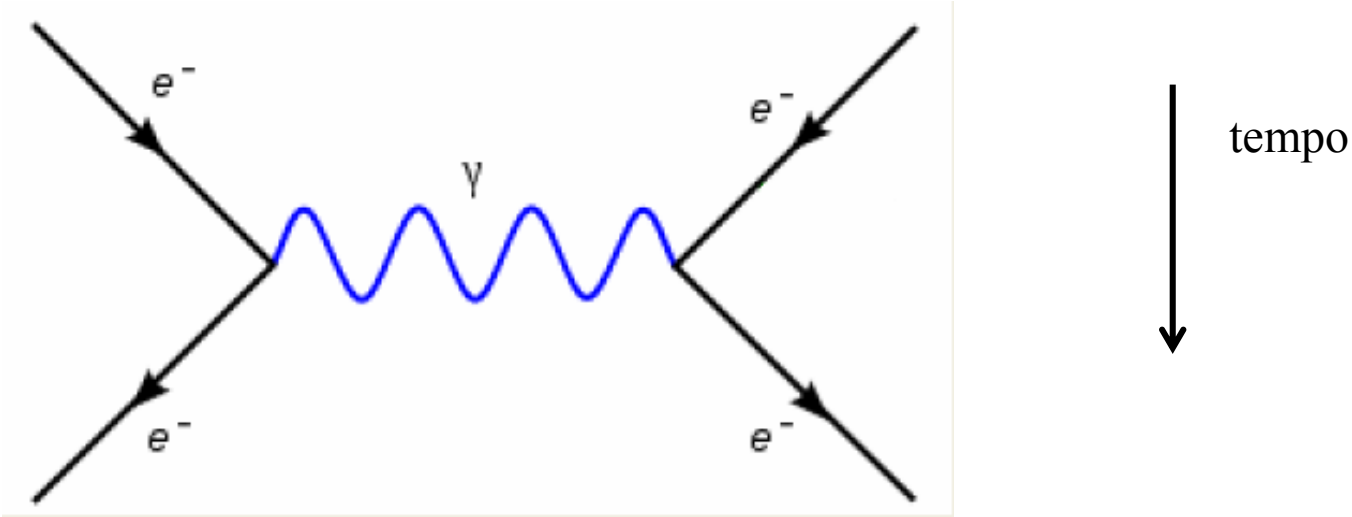
$$+\ \left|\left(i\partial_{\mu} - g\,\frac{1}{2}\,\overline{\tau}\cdot\overline{W}_{\mu} - g'\,\frac{Y}{2}\,B_{\mu}\right)\phi\right|^{2} - V(\phi)$$

$$-\ G_1\overline{L}\phi R + G_2\overline{L}\phi_C R + h.c.$$

Le interazioni

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

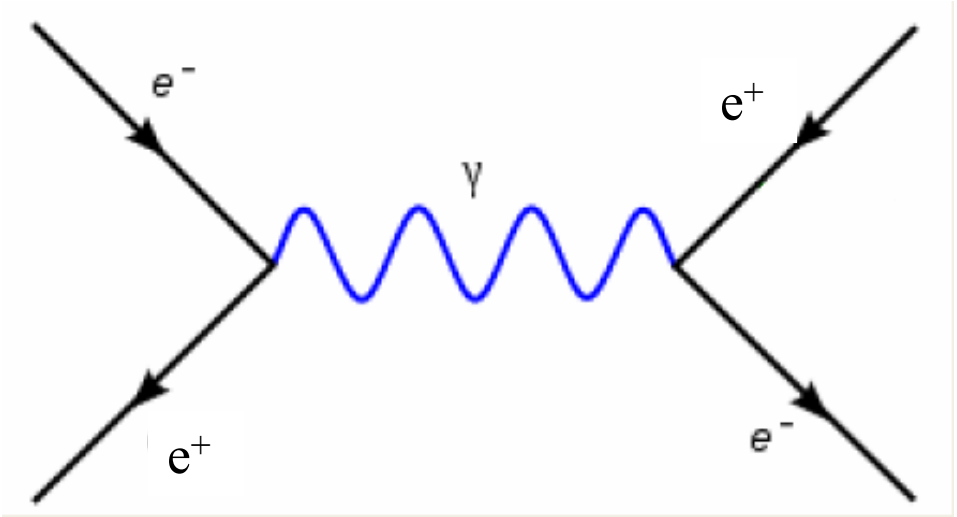
Interazione elettromagnetica:



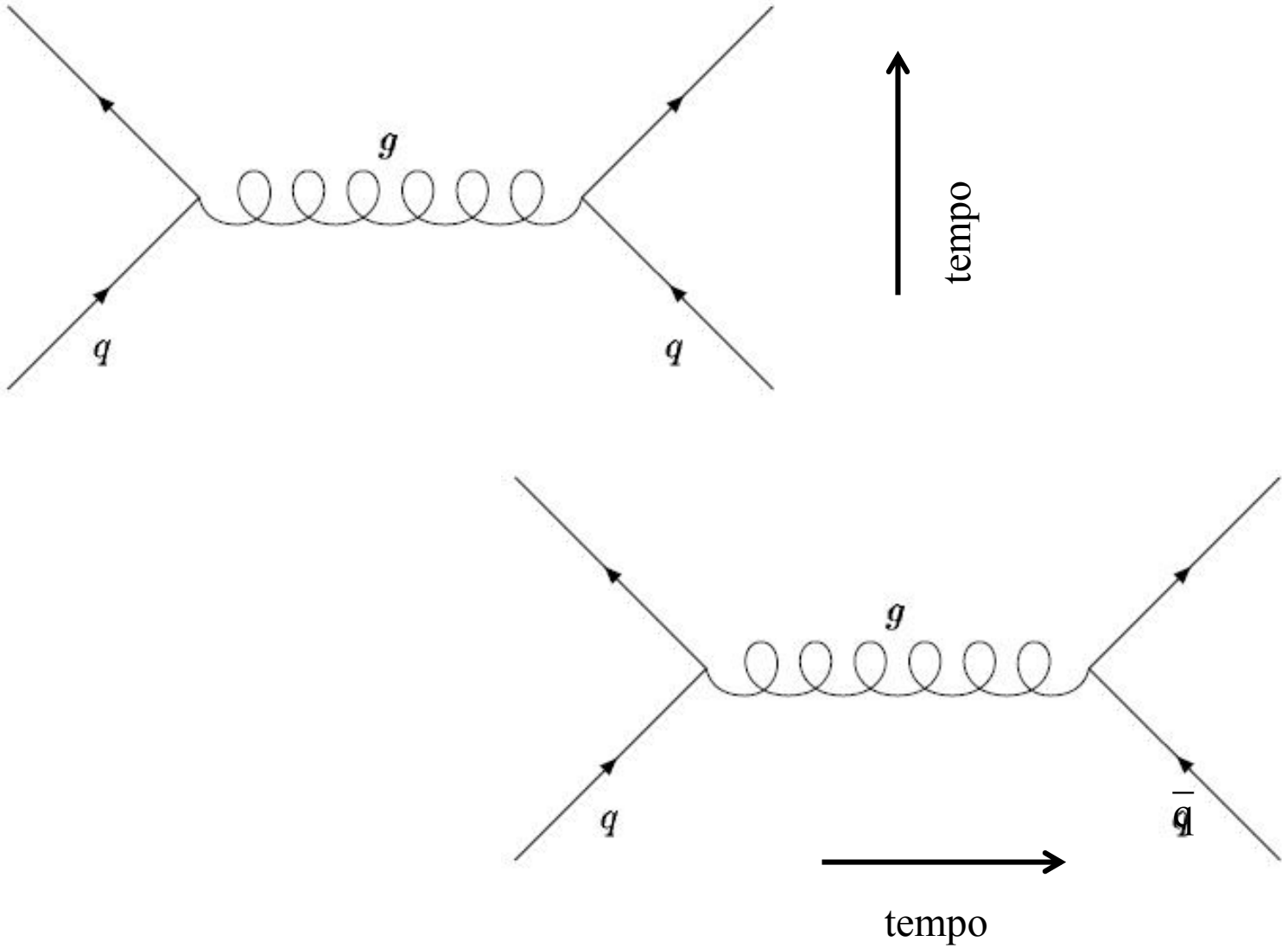
Le interazioni

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

Interazione elettromagnetica:

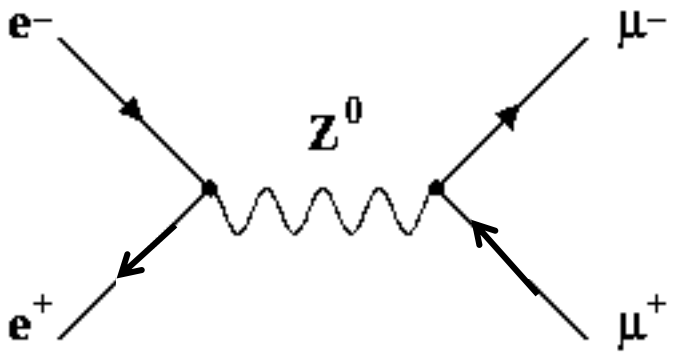


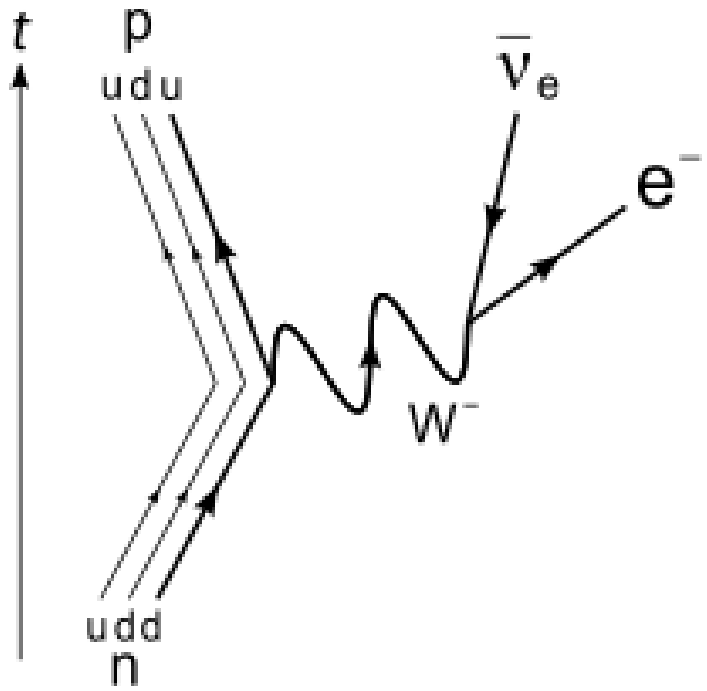
Interazioni Forti



Interazioni deboli

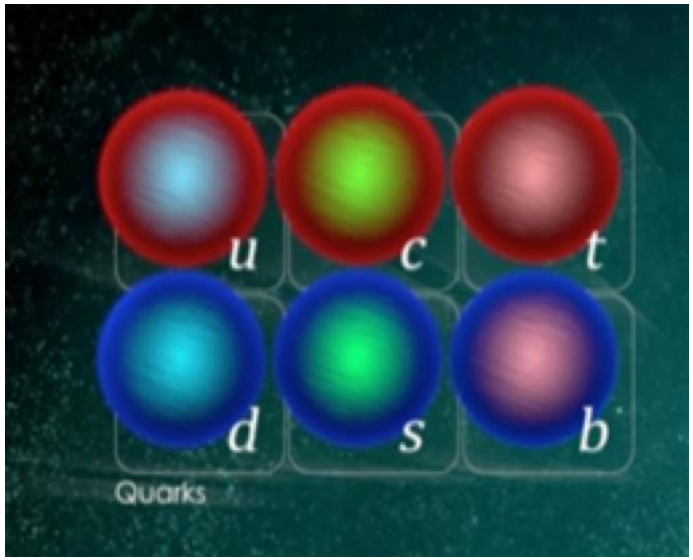
Il modello standard predice inoltre:
una interazione NEUTRA DEBOLE – mediata dal bosone Z
una interazione CARICA DEBOLE – mediata dai bosoni W+ e W-

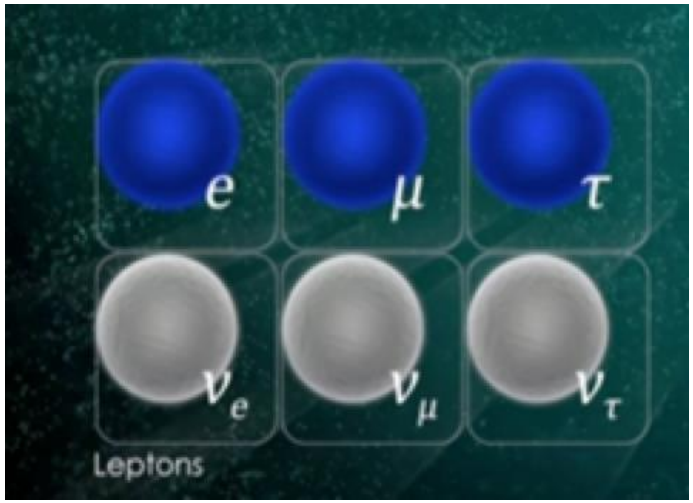




Per poter senza dubbio capire se l'interazione e' DEBOLE e non Elettromagnetica, come si puo' fare?

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 Syncrotron) del Cern scopre le interazioni di corrente debole neutra.

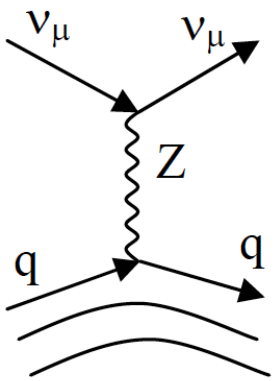
Nel 1970 erano disponibili al CERN fasci di neutrini (vd S.Gilardoni)

Neutrini e Anti-Neutrini incidenti su camera a bolle riempita con liquido pesante (Freon di densita' 1.5 x 10^3 kg/m^3)

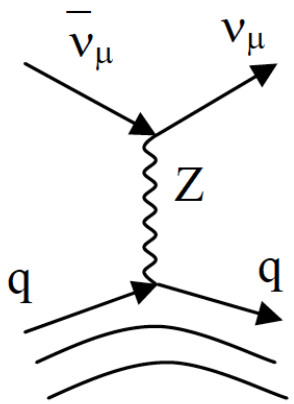
NC

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

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



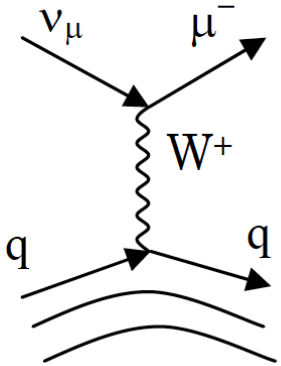
e



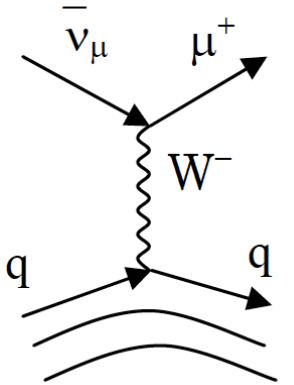
CC

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

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



e



Corrente neutra di anti-neutrini

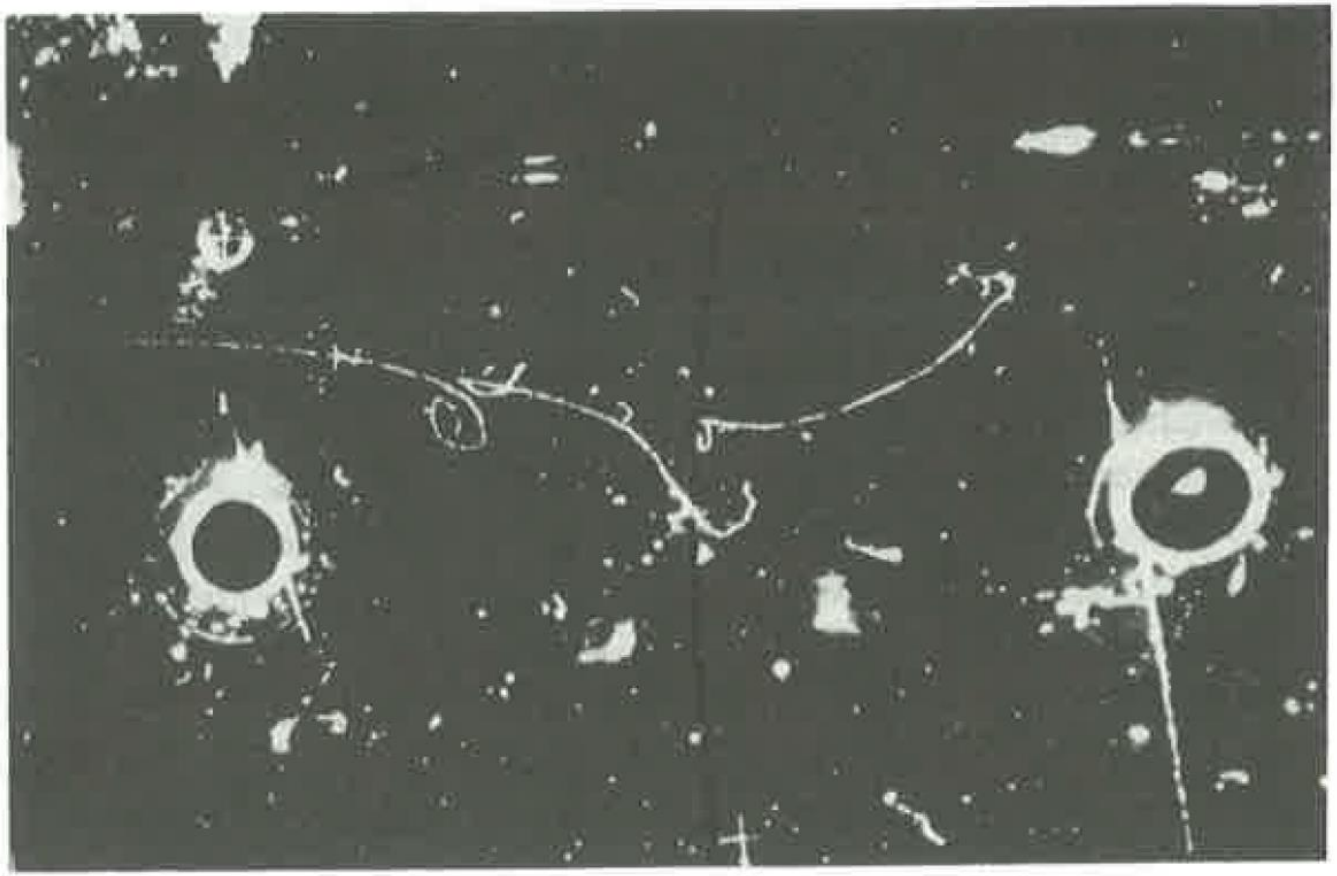


Figure 1.6 First example of weak neutral-current process $\bar{\nu}_\mu + e \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e$ observed in heavy-liquid bubble chamber Gargamelle at CERN irradiated with a $\bar{\nu}_\mu$ beam (Hasert *et al.*, 1973). A single electron of energy 400 MeV is projected at a small angle ($1.5 \pm 1.5°$) 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: $\nu + n \rightarrow \mu + p$

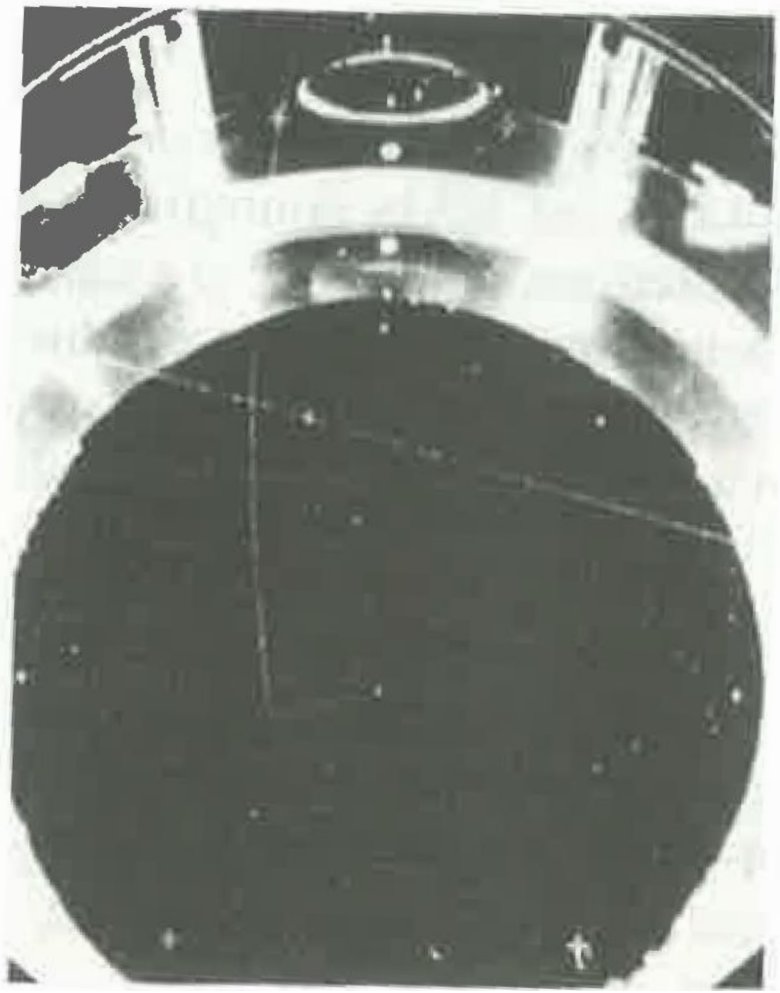
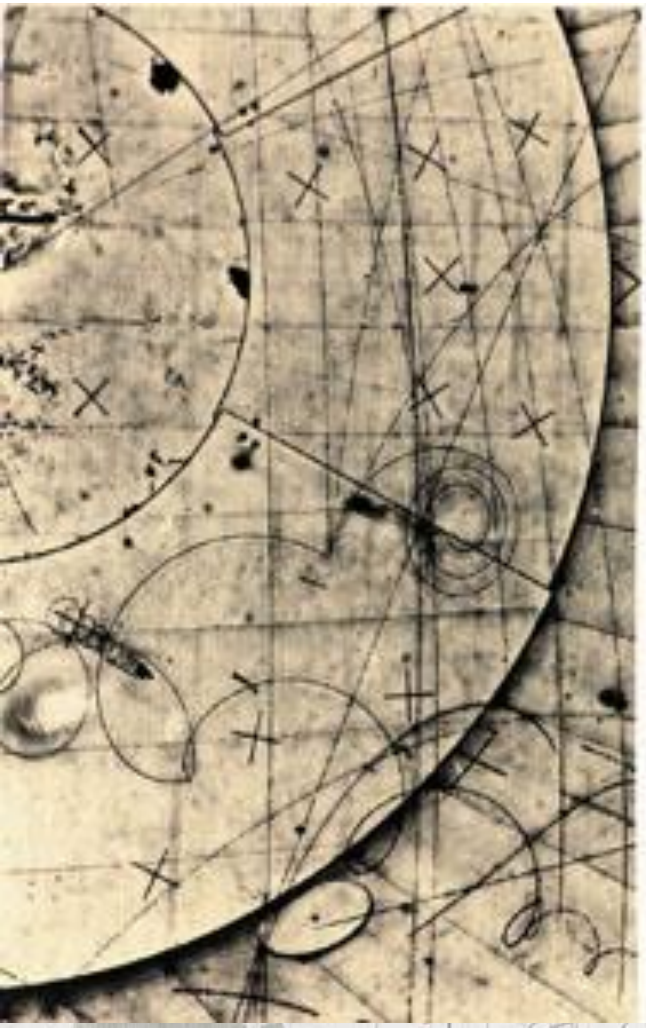


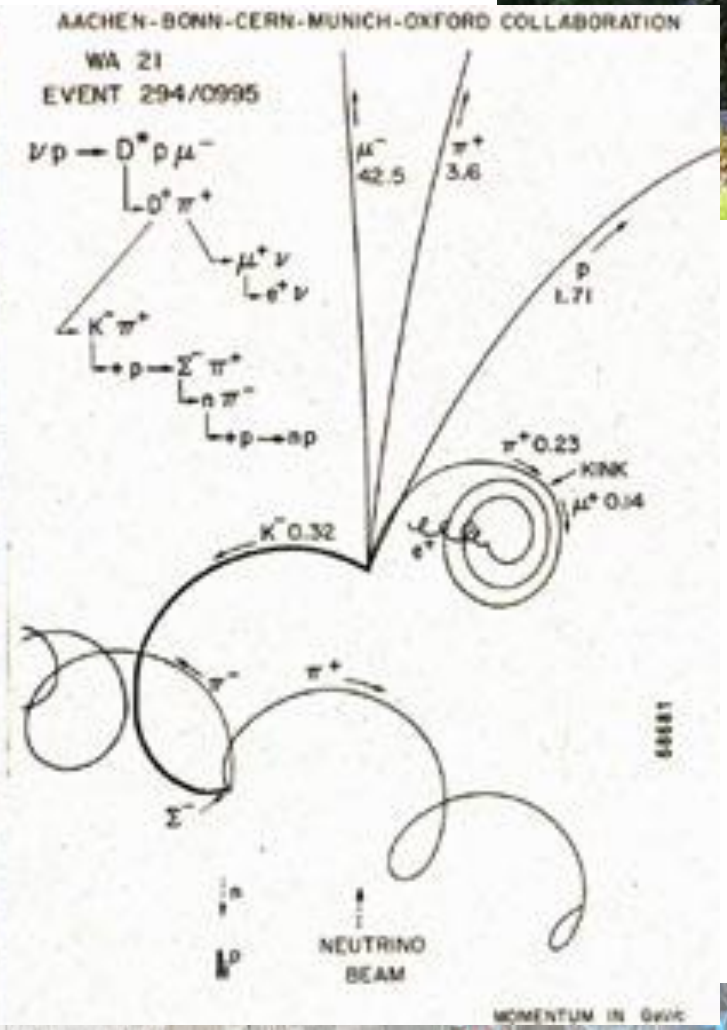
Figure 7.13 Early examples of "elastic" neutrino interactions observed in a heavy-liquid bubble chamber at CERN in 1963. (a) shows an event attributed to the reaction $\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$. The noninteracting muon passes out of the chamber, and the recoil proton comes to rest inside the

(b)

(b) Event produced by interaction of an electron-neutrino ν_e: $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$. The incident beam consists mostly of muon-neutrinos ν_μ, with a very small admixture of ν_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.)

Gargamelle




AACHEN-BONN-CERN-MUNICH-OXFORD COLLABORATION
WA 21
EVENT 294/0995
$\nu p \to D^0 p \mu^-$
$D^0 \pi^+$
$\mu^+ \nu$
$e^+ \nu$
$K^- \pi^+$
$p \Sigma^- \pi^+$
$n \pi^-$
$p \to np$
μ^- 42.5
π^+ 3.6
p 1.71
π^+ 0.23
KINK
μ^+ 0.14
K^- 0.32
π^-
π^+
Σ^-
n
p
NEUTRINO BEAM
MOMENTUM IN GeV/c

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 decadra' 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 τ decadute dopo un tempo t

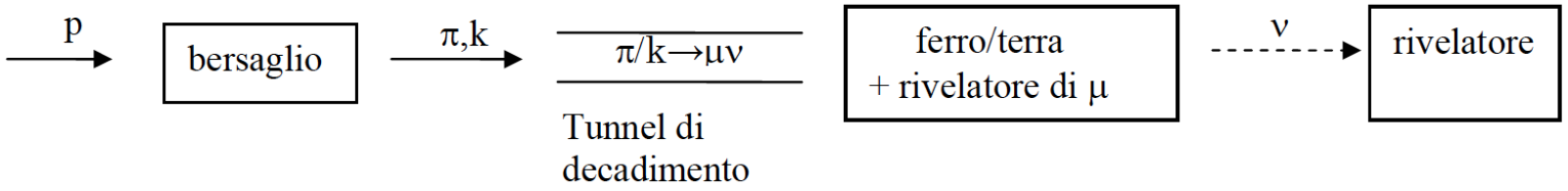
$S = \gamma\beta c\tau$ spazio percorso dalla particella di vita media τ e velocita' β

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→bersaglio→ π, k → decadimento in μ+ν → ν



E(π,k) ~ 200 GeV
Selezionati con magneti dipoli e quadrupoli e collimatori

π,κ→μν
solo una frazione
r =T/τ

L'energia del neutrino e' correlata con la distanza del neutrino dal centro del fascio.
I fasci al PS avevano tipicamente E(ν)=50÷100 GeV (pioni) ed E(ν)= 150÷200 GeV (kaoni).
Il fascio e' essenzialmente di neutrini muoni (ν_μ) con una contaminazione di 10^{-4} di neutrini elettronici ν_e ($R(\nu_\mu/\nu_e) \sim (m_\mu/m_e)^2$).

Scoperta correnti deboli, 1973

Le quantita' che si vogliono misurare sono :

$$R = \frac{NC}{CC} = \frac{\nu_\mu N \to \nu_\mu X}{\nu_\mu N \to \mu X} \qquad R = \frac{NC_\nu}{NC_{\bar{\nu}}} = \frac{\nu_\mu N \to \nu_\mu X}{\bar{\nu}_\mu N \to \bar{\nu}_\mu X}$$

$$R = \frac{NC_\nu}{CC_\nu} = \frac{102}{428} evt \sim \sin^2 \vartheta_W \qquad R = 0.24 \pm 0.03$$

$$R = \frac{NC_{\bar{\nu}}}{CC_{\bar{\nu}}} = \frac{64}{148} evt \sim \sin^2 \vartheta_W \qquad R = 0.42 \pm 0.03$$

L'espressione del rapporto NC/CC per neutrini per anti-neutrini e' il seguente:

$$R\left(\frac{NC}{CC}\right)_\nu = \frac{1}{2} - \sin^2\theta_W + \frac{20}{27}\sin^4\theta_W$$

$$R\left(\frac{NC}{CC}\right)_{\bar{\nu}} = \frac{1}{2} - \sin^2\theta_W + \frac{20}{9}\sin^4\theta_W$$

Gli esperimenti con neutrini misuravano all'inizio degli anni 80 , $\sin^2\theta_W \sim 0.23$.

Autostati delle interazioni deboli, autostati di massa

- $|\nu_\alpha\rangle$ rappresenta un neutrino con sapore definito. α = e (elettrone), μ (muone) o τ (tauone).
- $|\nu_i\rangle$ rappresenta un neutrino con massa definita. m_i, $i = 1, 2, 3$.

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$

Analogamente per i quark (la matrice CKM):
dsb autostati interazione forte,
d',s',b' autostati interazione debole

$$\begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{bmatrix}$$

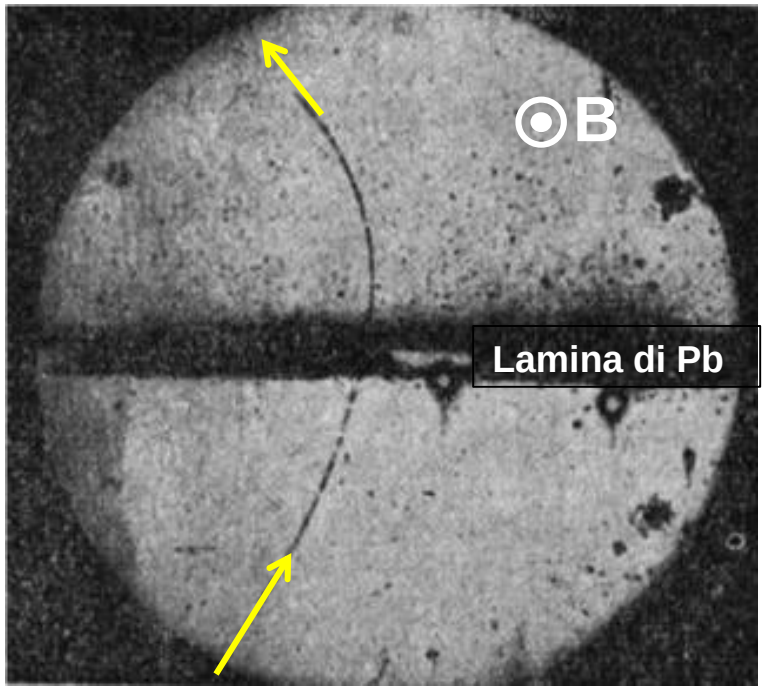
Intermezzo: scoperta del positrone

Vediamo le particelle sfruttando i meccanismi con cui interagiscono con la materia

- Esempio: le particelle cariche ionizzano la materia al loro passaggio

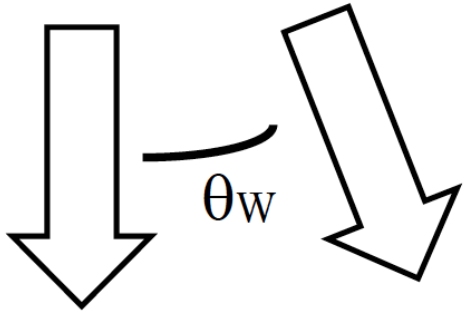
Camera a nebbia (Wilson, 1911; premio Nobel 1927):
Camera riempita di vapore saturo che condensa a seguito della ionizzazione, rendendo visibile la traccia

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)



Interazione	Forte	Elettrodebole		
simmetria locale	$SU(3)_C$	$SU(2)_I$	x	$U(1)_Y$
cost. accoppiamento	α_s	g		g'
campi di gauge	gluoni	W_1, W_2, W_3		B

Rottura spontanea di simmetria — Higgs



campi di gauge		W^+, W^-	Z	γ
cost. accoppiamento		g	$g/\cos\theta_W$	$e = g\sin\theta_W = g'\cos\theta_W$
campi di materia	quark	f_L	f_L, f_R	$f_L, f_R (Q>0)$
quantita' conservate	N barionico	Le, Lμ, Lτ		Q
	isospin			
	carica colore			

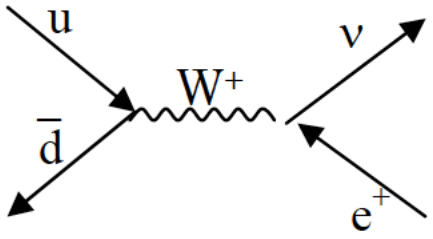
Scoperta W e Z: 1983

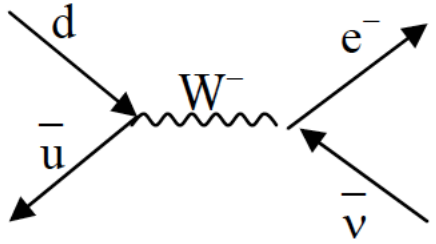
La misura di $\sin^2\theta_W$ da parte di Gargamelle (confermata poi da altri esperimenti con neutrini) permise la stima delle masse dei bosoni W e Z:

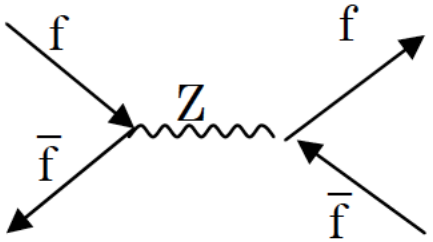
Per $\sin^2\theta_W \sim 0.23$: $m_W = 80\ \text{GeV}/c^2$ $m_Z = 92\ \text{GeV}/c^2$

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

Per produrre $Z \rightarrow \sqrt{s(f\bar{f})} \cong 100\ \text{GeV}$ (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 :

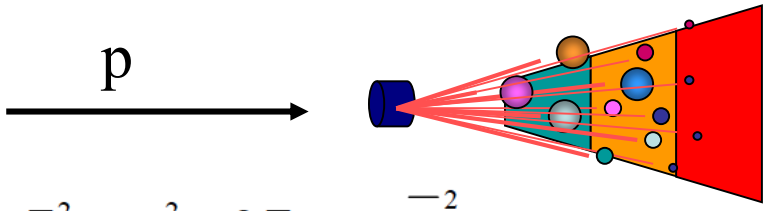
$$\sqrt{S_{p\bar{p}}} = 400 \div 600\ \mathrm{GeV}$$

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

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

Emax(protone) = 400 GeV

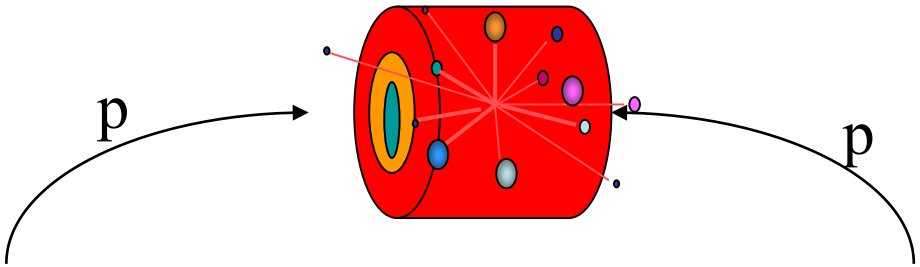
E funzionava come acceleratore su bersaglio fisso



$$(\sqrt{s})^2 = (p_1 + p_2)^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\bar{p}_1 + \bar{p}_2)^2 = E_1^2 + m_2^2 + 2E_1 m_2 - \bar{p}_1^{\,2} =$$
$$= m_1^2 + m_2^2 + 2E_1 m_2$$
$$= 2m_p(E_1 + m_p) = 800 \qquad GeV$$
$$\Rightarrow \qquad \sqrt{s} = 20 \div 30 \quad GeV$$

L'idea di Rubbia

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



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

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

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 (~100 mm))

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

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

Ovvero bisognava ottenere n_1,n_2 ed f molto grandi per compensare σxBR.

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 Sp$\bar{p}$S ma in direzione opposta ai protoni.

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

Nel 1978 fu deciso l' Sp$\bar{p}$S

Nel 1981 Sp$\bar{p}$S inizio' i lavori.

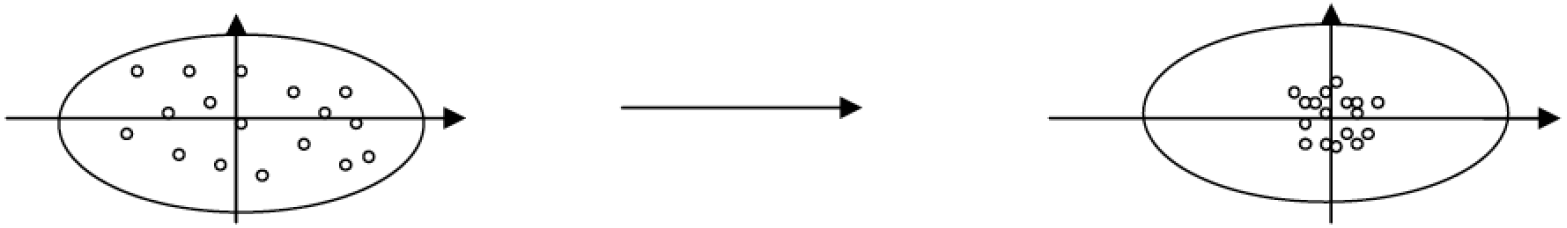
Nel 1982 i due esperimenti (UA1 e UA2) all'Sp$\bar{p}$S iniziarono a prendere dati.

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

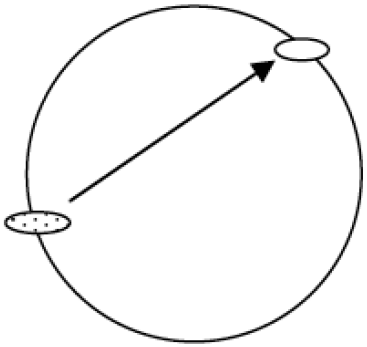
→ **Rubbia e Van der Meer prendono il premio Nobel.**

Lo stocastic cooling

La distribuzione nello spazio delle fasi degli anti-protoni e' tale da avere in una data ellisse (che rappresenta lo spazio delle fasi) i protoni distanziati tra loro nel vuoto. Il teorema di Lluville dice che lo spazio delle fasi e' incomprimibile (ovvero non si puo' restringere l'ellisse). Pero' nulla ci vieta ad avere tutti i protoni nel centro dell'ellisse e tutto il vuoto verso i bordi, senza modificare l'area dell'ellisse, ovvero non violando il teorema di Lluville.



Per comunicare ai protoni e anti-protoni come correggere la loro orbita (e dunque per raddensarli nel centro) si trasmetteva il segnale attraverso l'anello. In questo modo il segnale di correzione arrivava prima del fascio, che segue la traiettoria piu' lunga, lungo la circonferenza.



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 piu' alta del bosone W e considerando 3 quark per protone).

→ **MW =80.5 ± 0.5 GeV/c²** **MZ = 93 ± 2.9 GeV/c²**

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

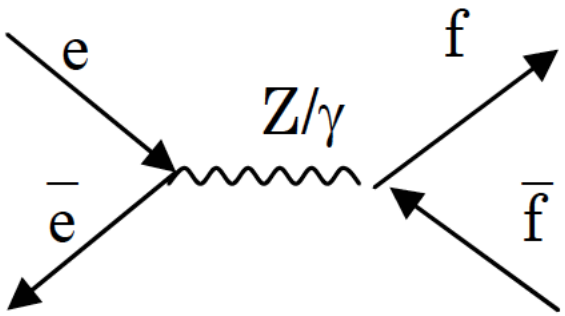
Dopo la scoperta dei bosoni W e Z e la misura della loro massa a qualche percento agli esperimenti UA1 e UA2, l'idea di misurare con precisione le caratteristiche dei due bosoni come test stringente del Modello Standard divenne quasi una "necessita'".

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:

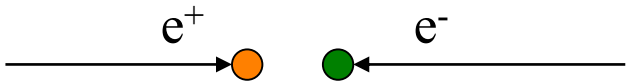


f =e, mu, tau, quark

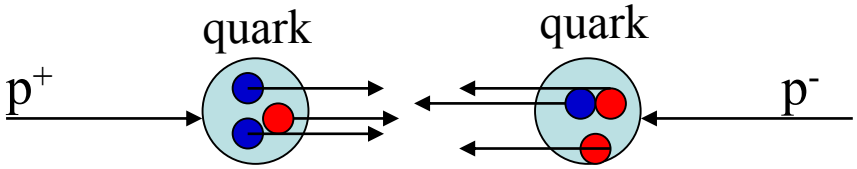
Perche' e+e- ?

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 facilita', 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-?

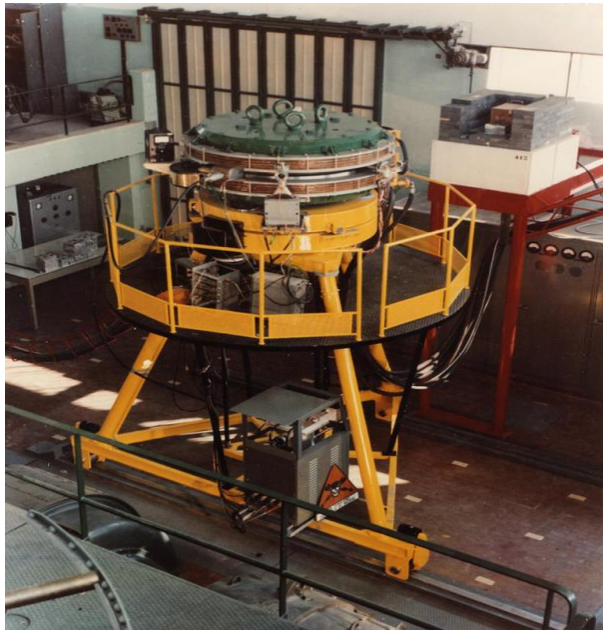
Inoltre in un urto elettrone/positrone l'energia dello stato iniziale $\sqrt{s(e^+e^-)}$ e' nota con precisione

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)
a Frascati nel 1961:

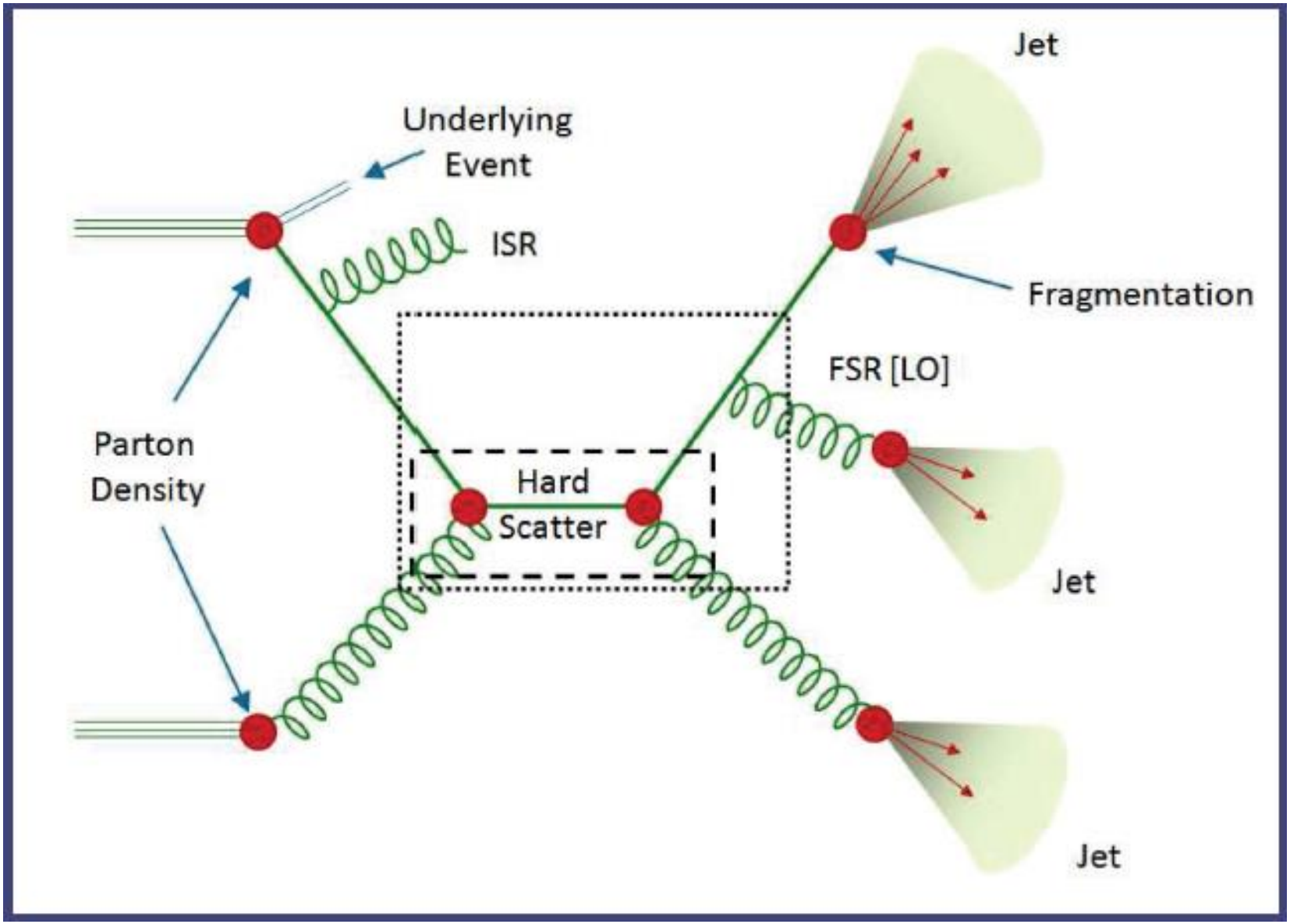
Raggio di 65 cm, E(e) = 0.250 GeV

AdA = Anello di Accumulazione

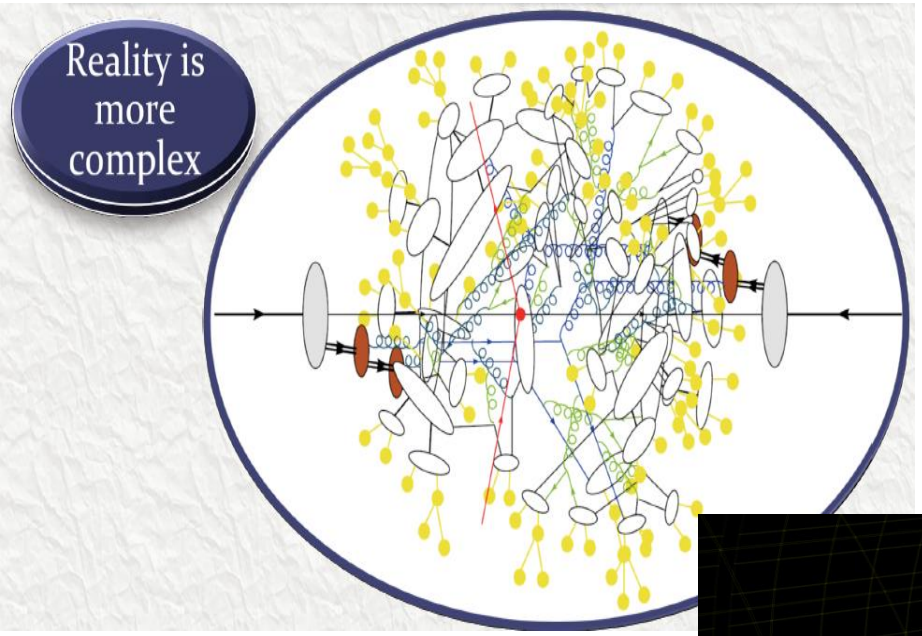


32

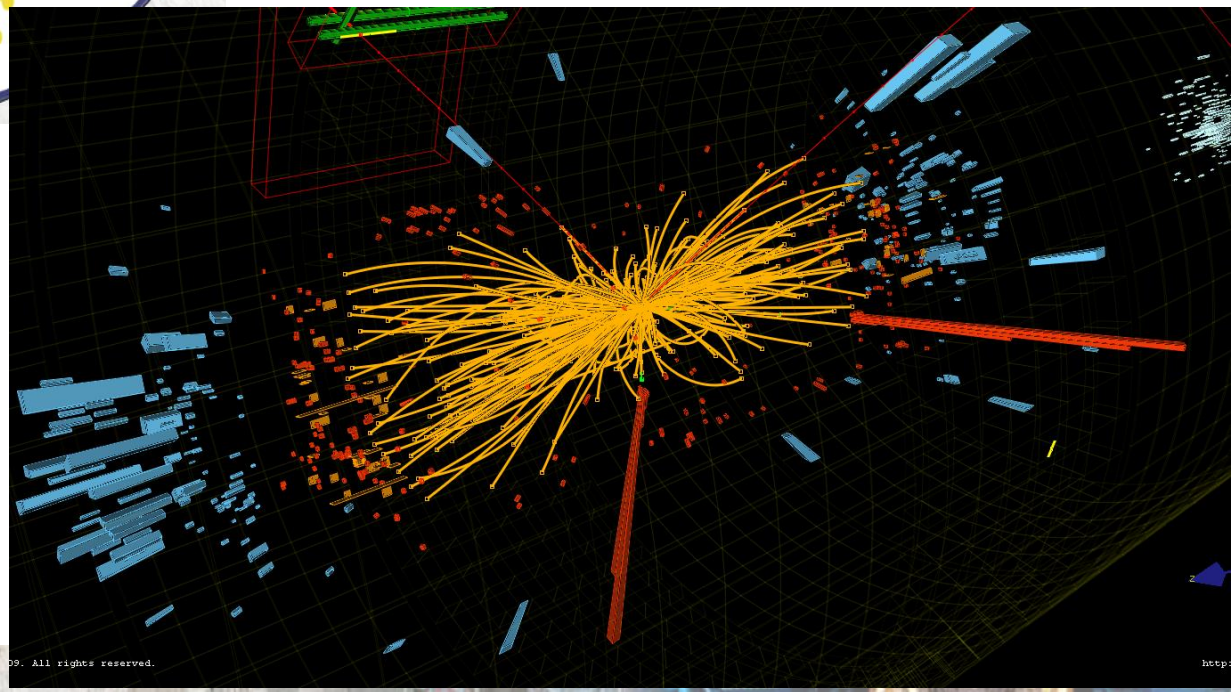
Fisica a LHC


Jet
Underlying
Event
ISR
Fragmentation
FSR [LO]
Parton
Density
Hard
Scatter
Jet
Jet

La realta' e piu' complessa



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


09. All rights reserved.

LEP

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 ?

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

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

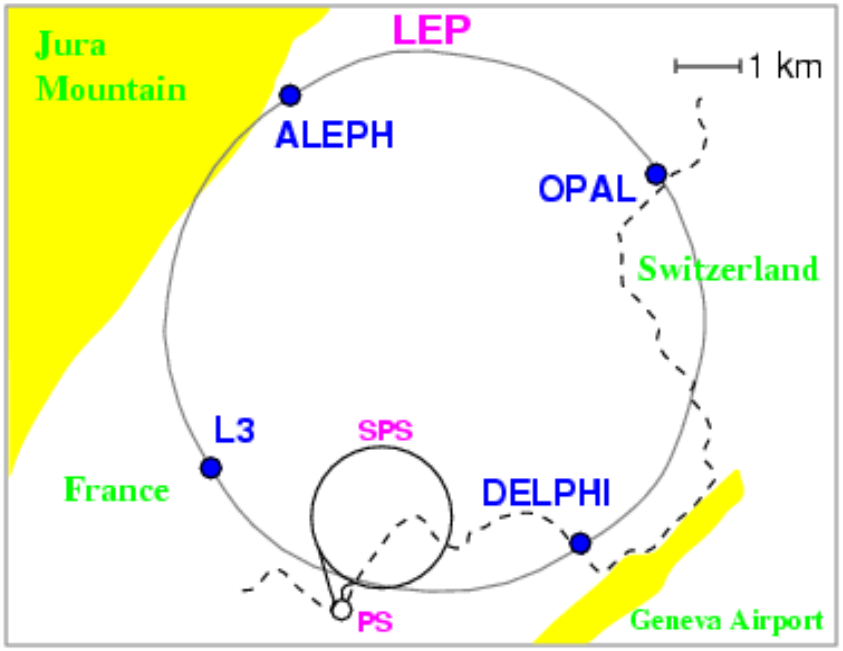
La potenza persa per radiazione di sincrotrone va come

l'energia della particella accelerata alla 4 potenza ~ E^4

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

LEP1 P~30 MeV
LEP2 P~2.5 GeV

LEP



Large **E**lectron **P**ositron 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 !

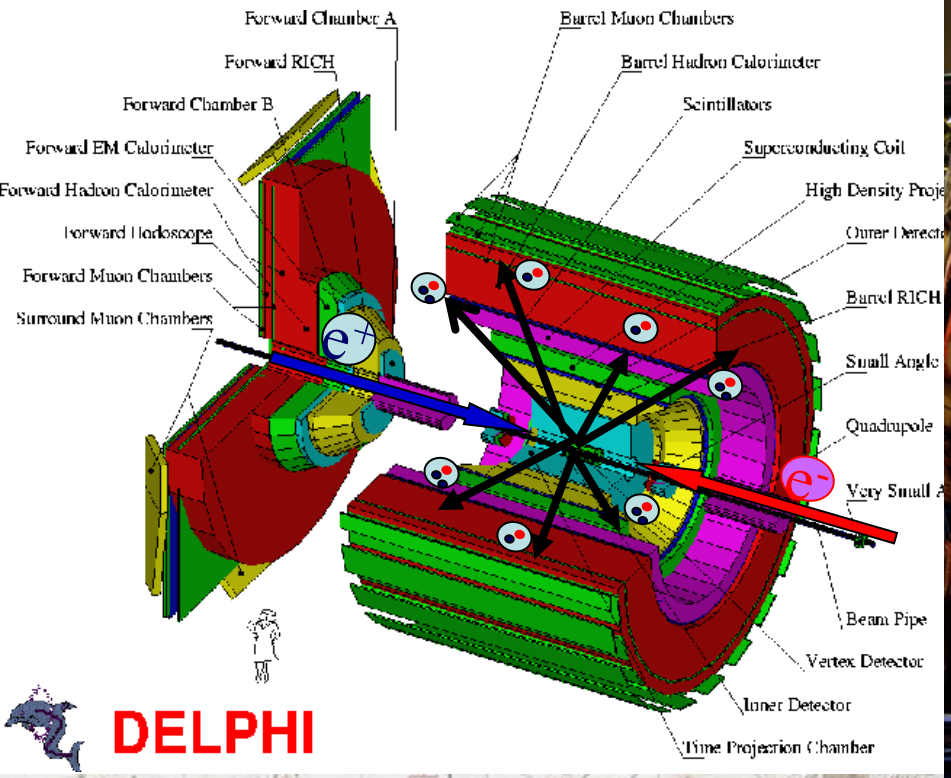
Molti italiani coinvolti sull'acceleratore LEP: E.Picasso direttore LEP

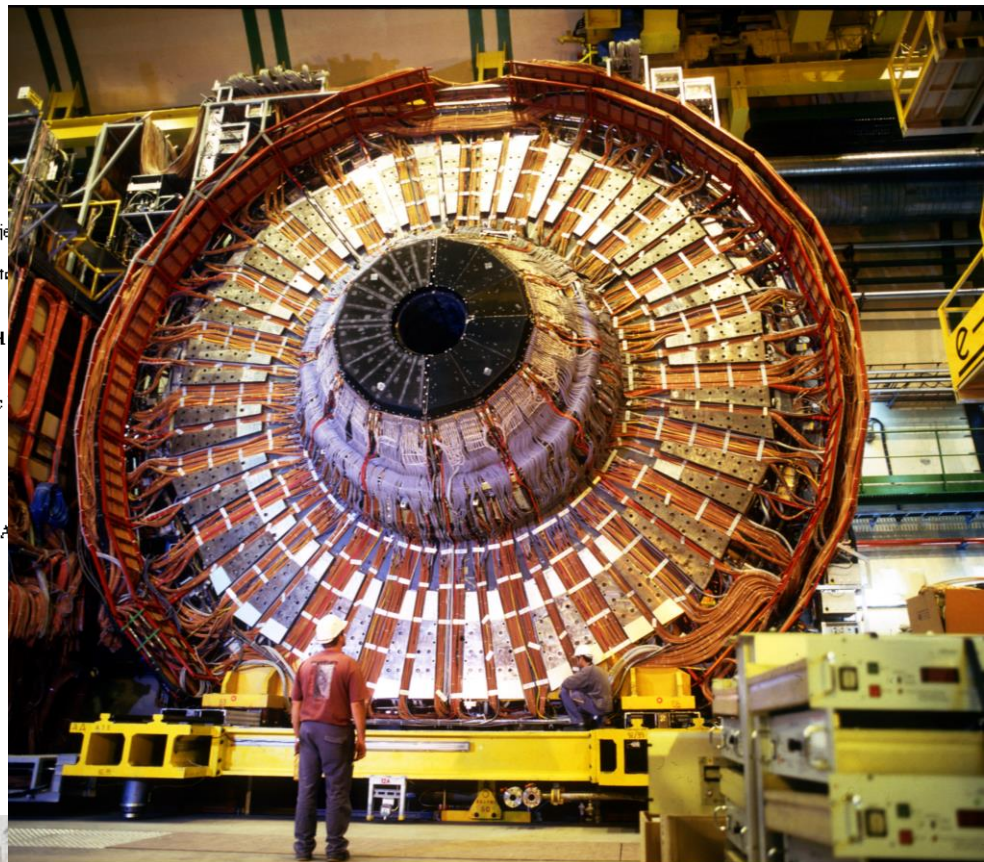
4 grandi esperimenti: ALEPH, DELPHI, L3 e OPAL

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

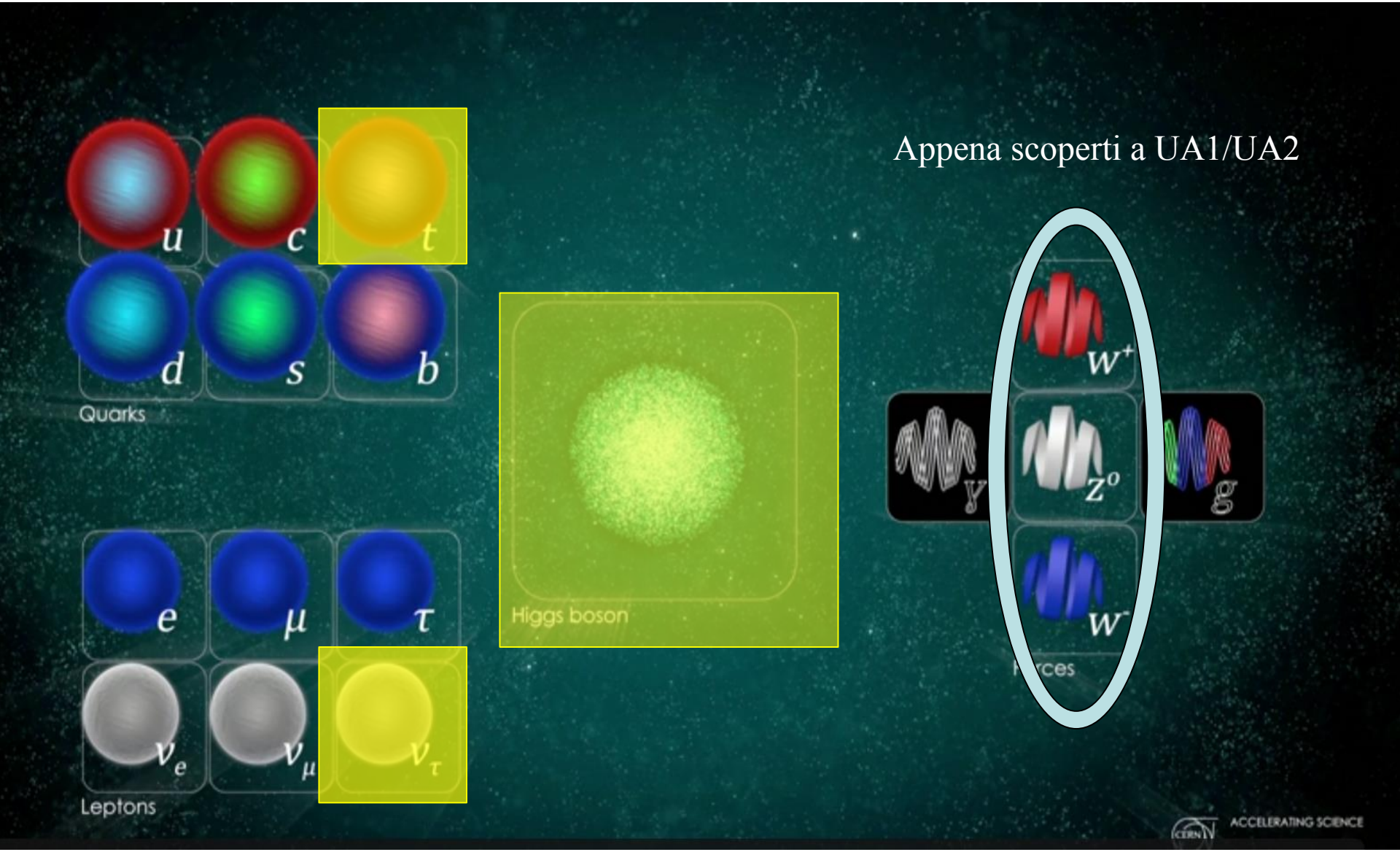
Responsabili della fisica Italiani: S.Gentile, C.Mariotti, S.Mele, G.Rolandi, R.Tenchini

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



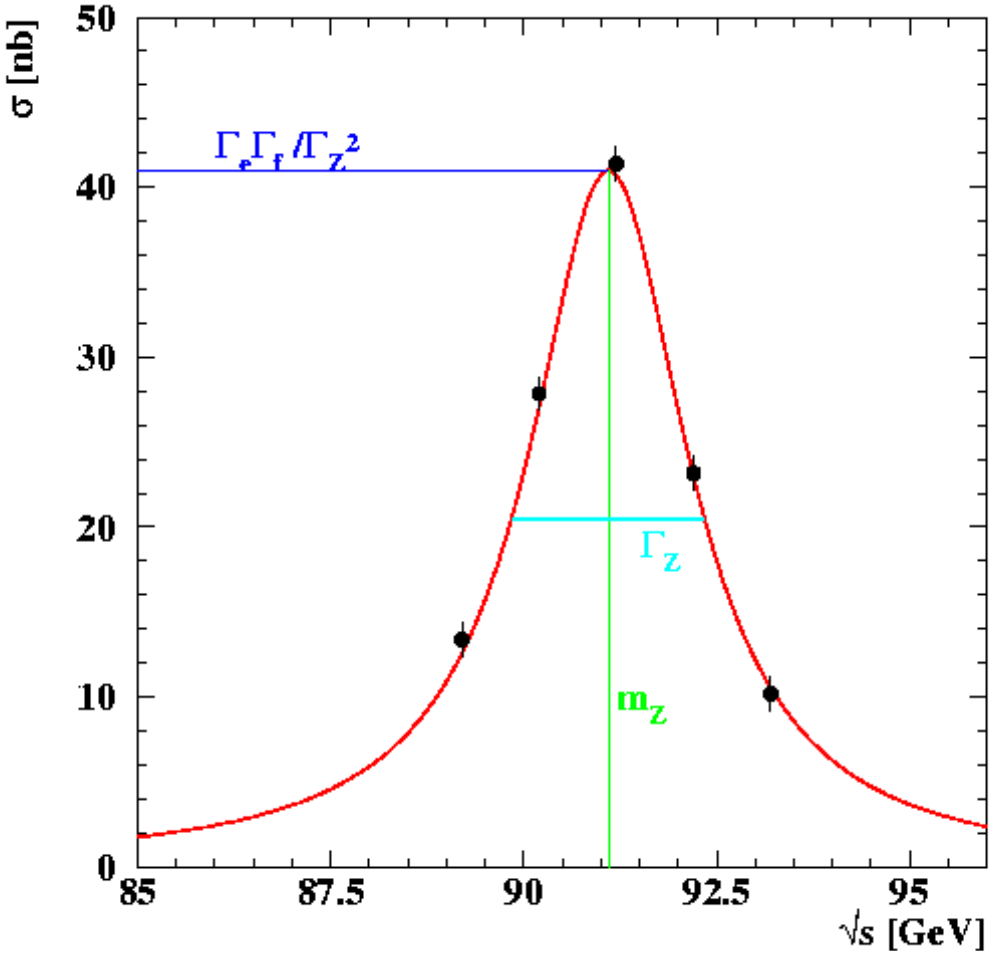


All'epoca di LEP



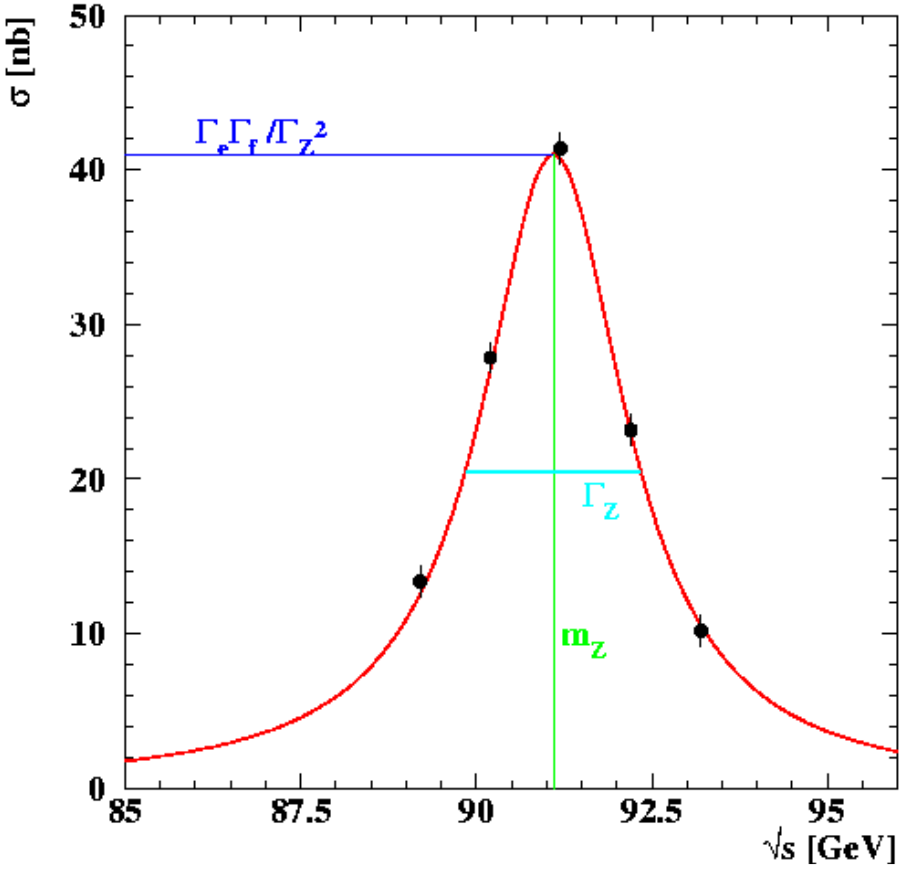
La fisica di precisione

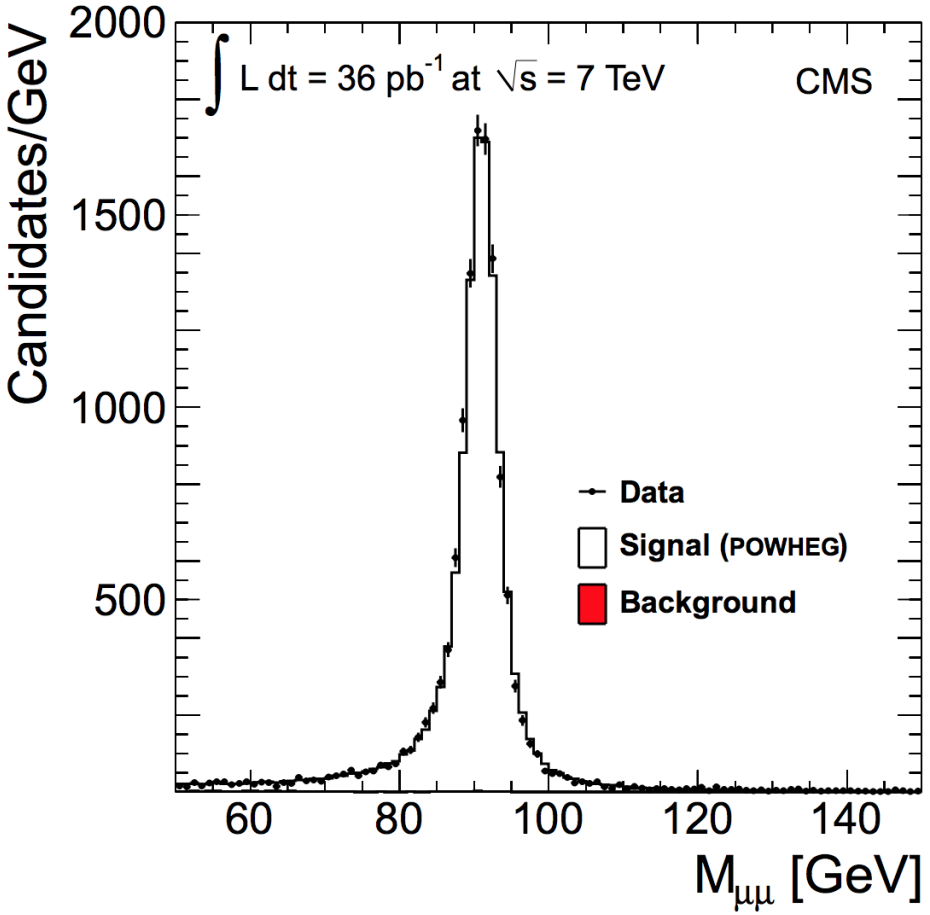
La LINE-SHAPE della Z



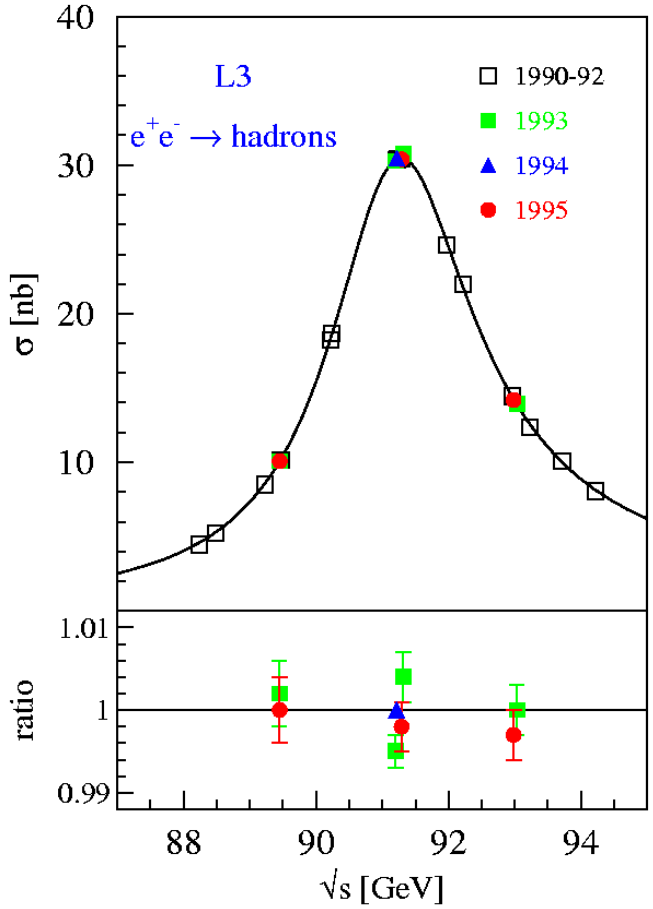
La fisica di precisione

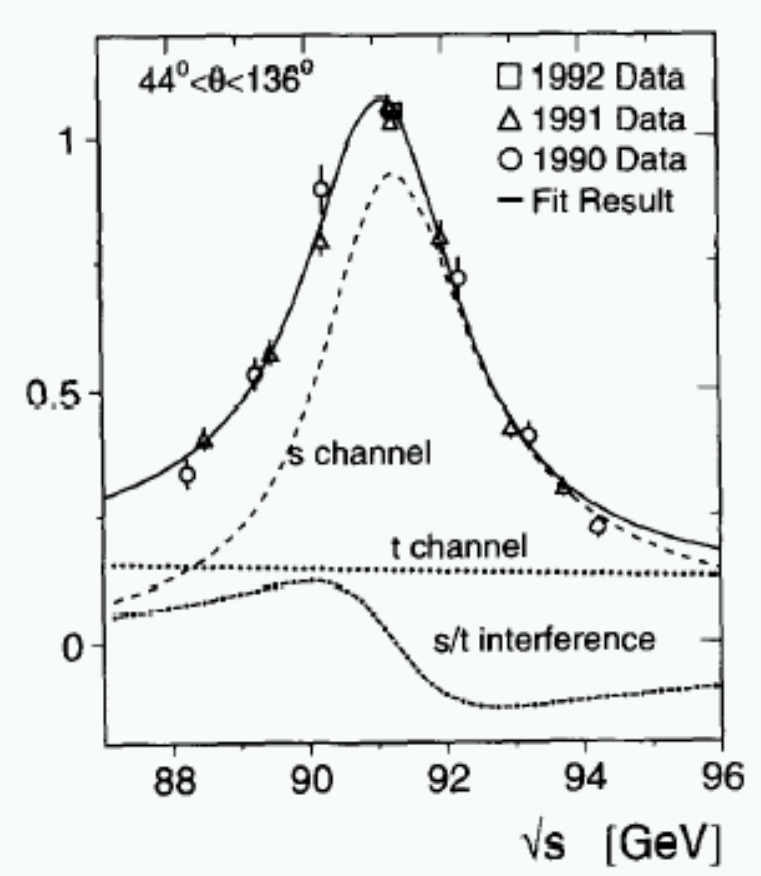
e+e- vs pp / LEP vs LHC





Misure di precisione

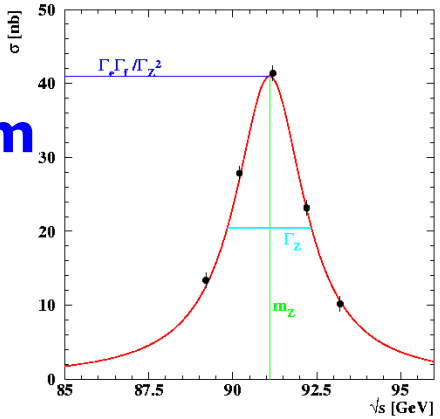




Line-shape

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:

σ = (Ndati – Nfondo) / ε × Luminosita' vs **Ecm**

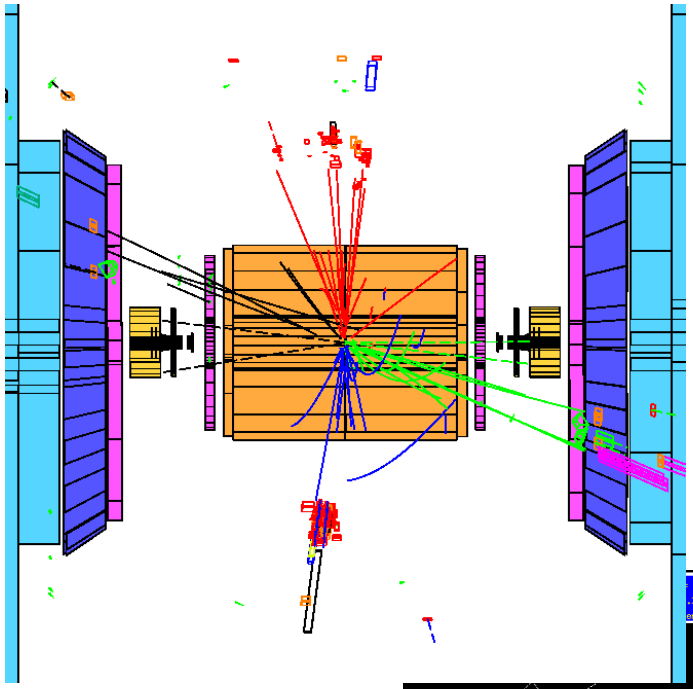


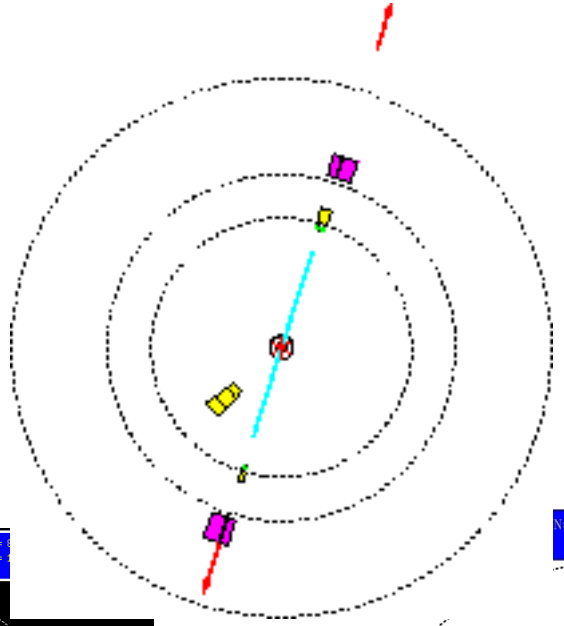
Sperimentalmente significa:

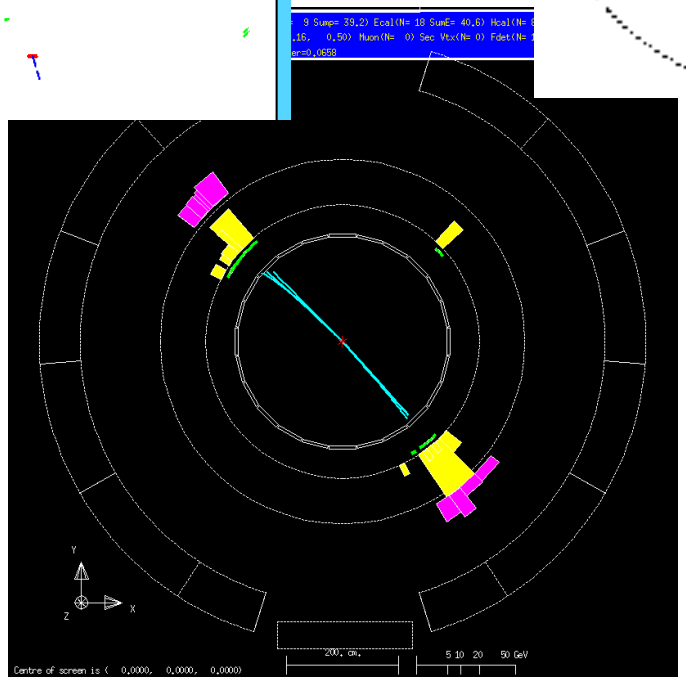
- contare gli eventi del tipo interessato (Ndati),
- determinare le efficienze ε dell'apparato per la rivelazione di tali eventi
- determinare gli eventi di fondo (Nfondo)
- misurare la Luminosita'
- misurare l'energia dei fasci.

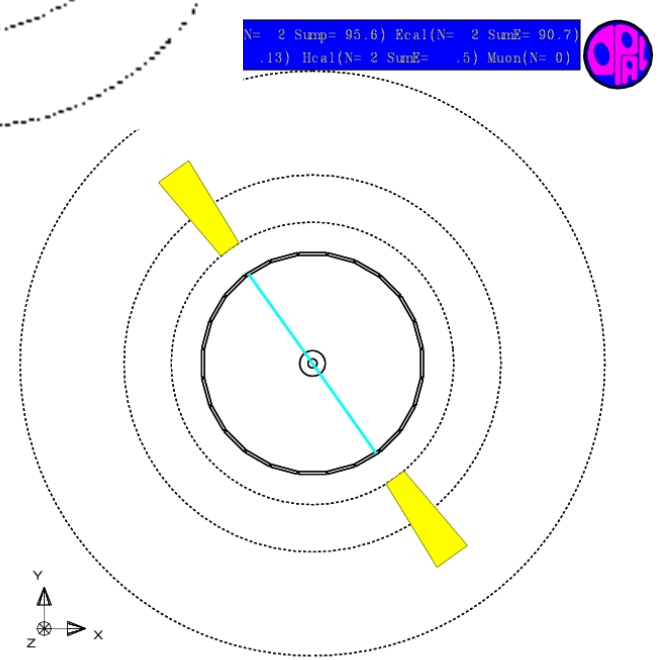
Per raggiungere **precisioni di frazioni del per-mille** sui parametri del bosone Z, bisogna raggiungere tali precisioni sia sullo stato inziale e^+e^- (Ecm e Luminosita') sia sullo stato finale f^+f^-.

Semplicitá stato iniziale → semplicitá stato finale

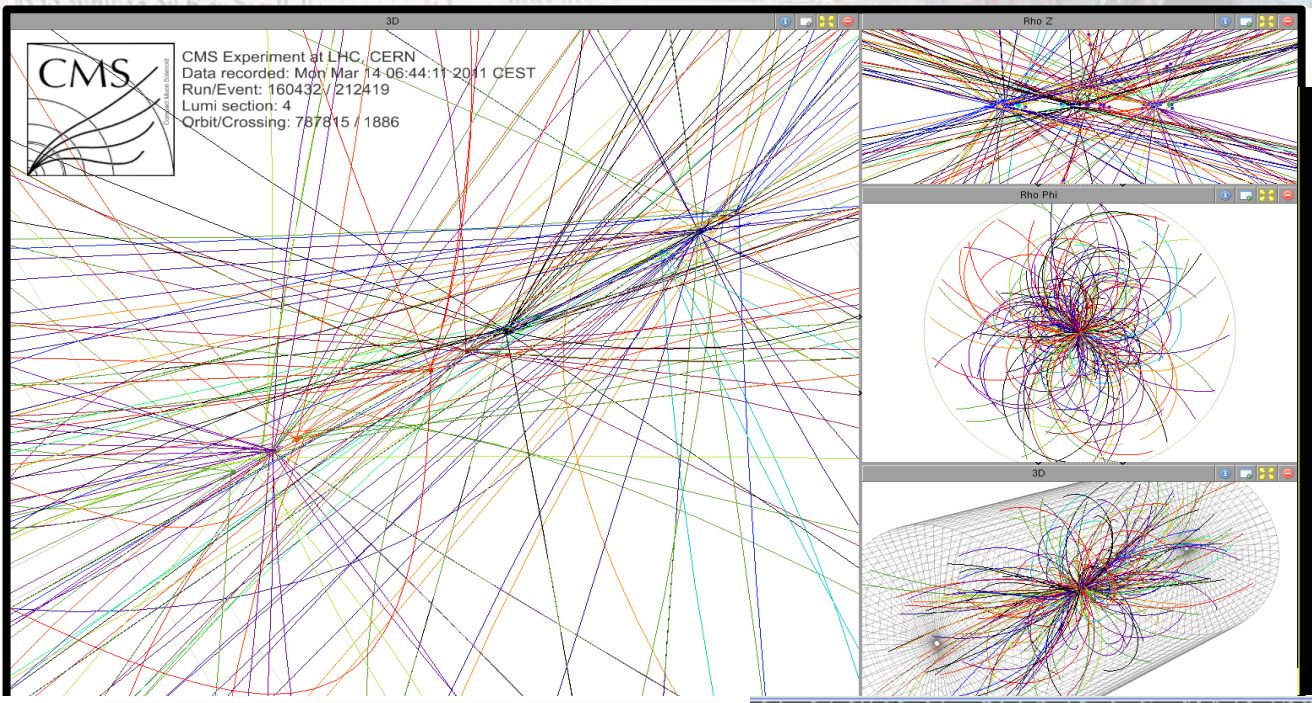


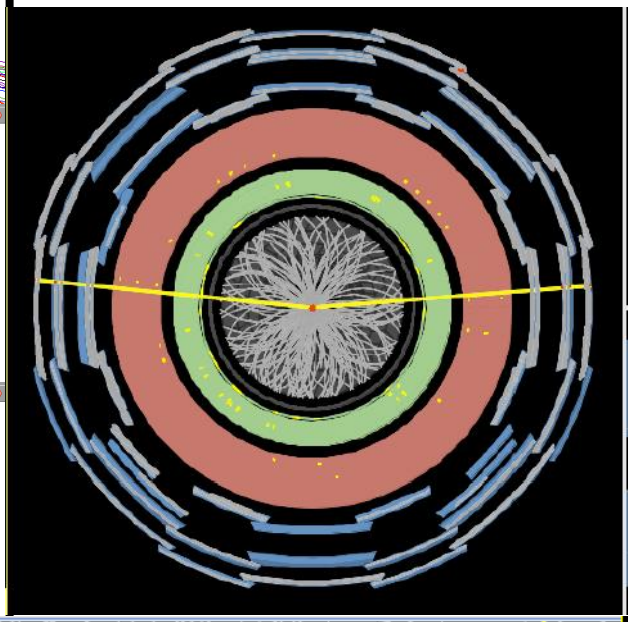


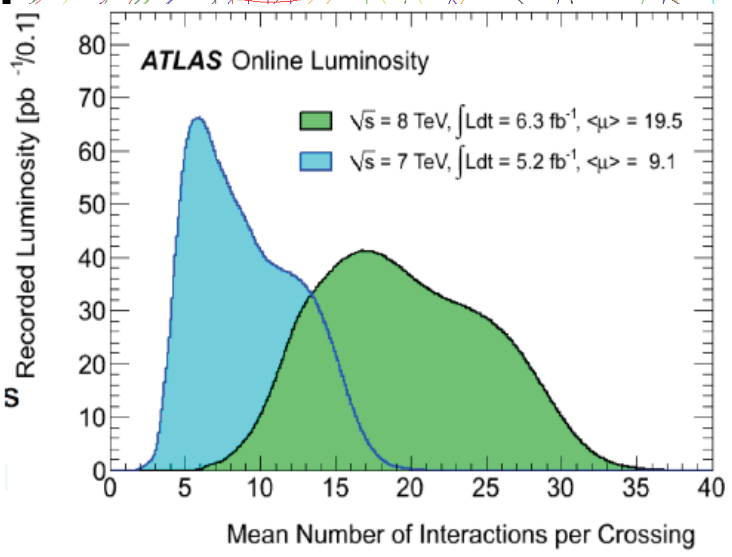


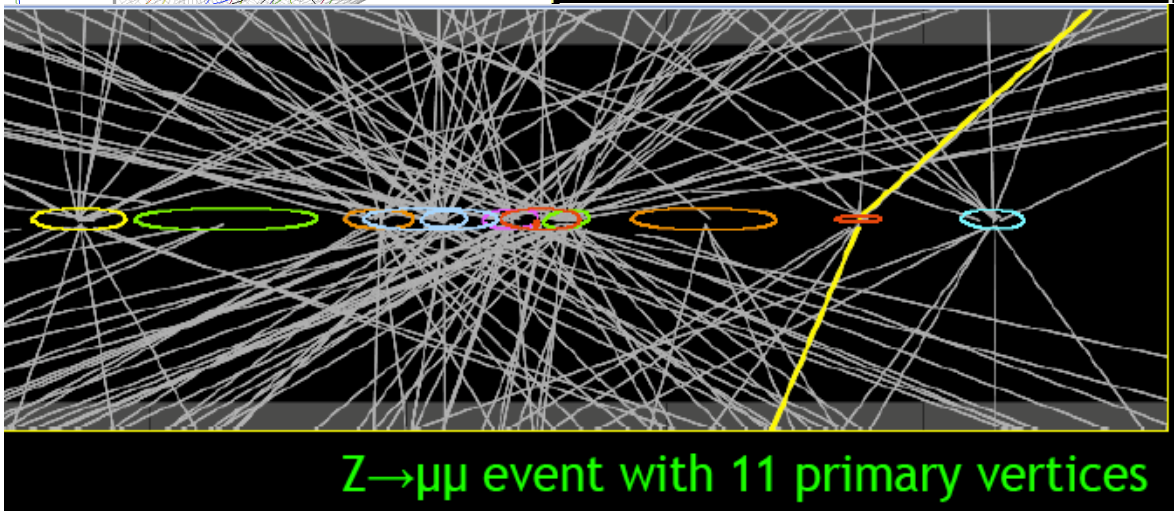


Z → μμ at LHC


3D
Rho Z
Rho Phi
3D
CMS
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon Mar 14 06:44:11 2011 CEST
Run/Event: 160432 / 212419
Lumi section: 4
Orbit/Crossing: 787815 / 1886




ATLAS Online Luminosity
√s = 8 TeV, ∫Ldt = 6.3 fb-1, <μ> = 19.5
√s = 7 TeV, ∫Ldt = 5.2 fb-1, <μ> = 9.1
Recorded Luminosity [pb-1/0.1]
Mean Number of Interactions per Crossing
0
10
20
30
40
50
60
70
80
0
5
10
15
20
25
30
35
40


Z→μμ event with 11 primary vertices

Misura dell'energia dei fasci

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

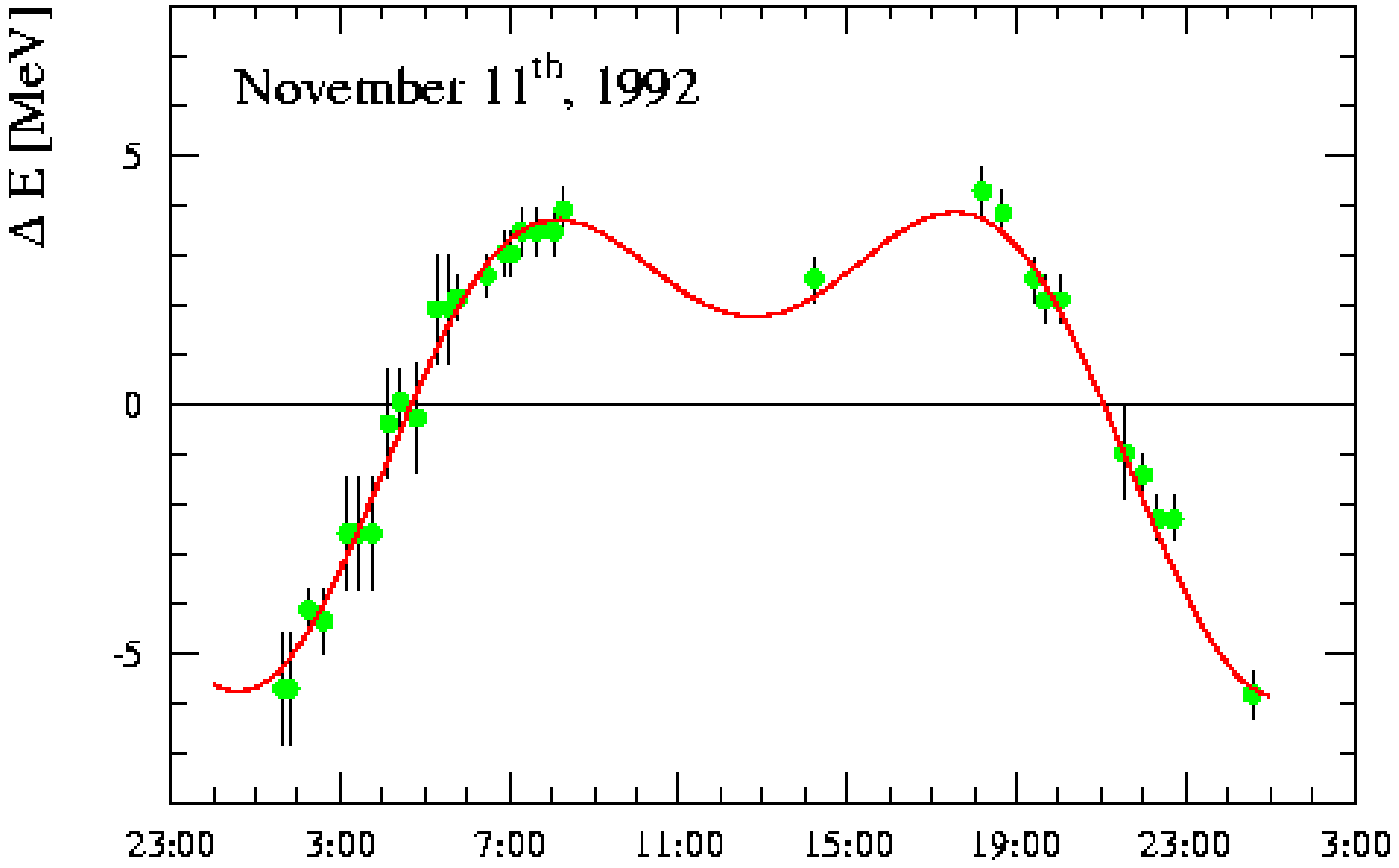
$$E_{beam} = \oint B \cdot dl$$

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 é 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 B e il cammino totale $L=\oint dl$ dal tempo t_0 al tempo t_1.

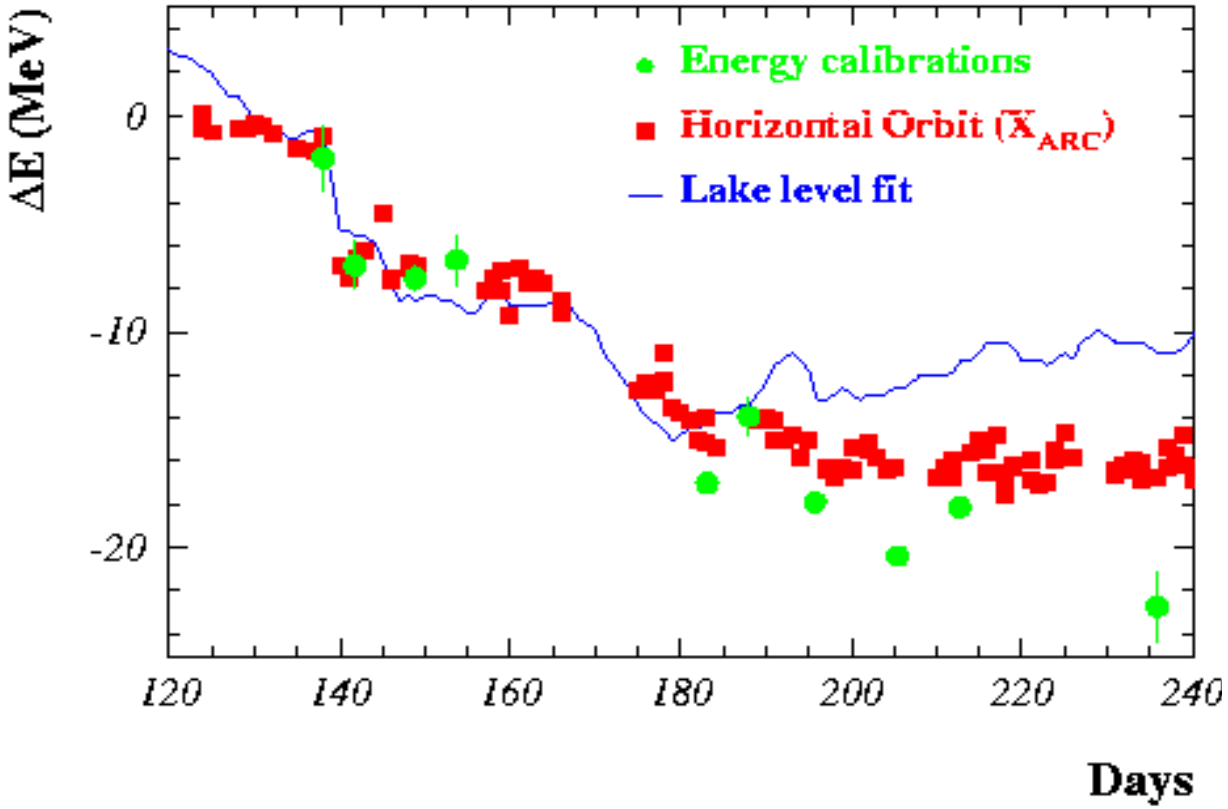
Effetti di marea



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 4×10^{-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.

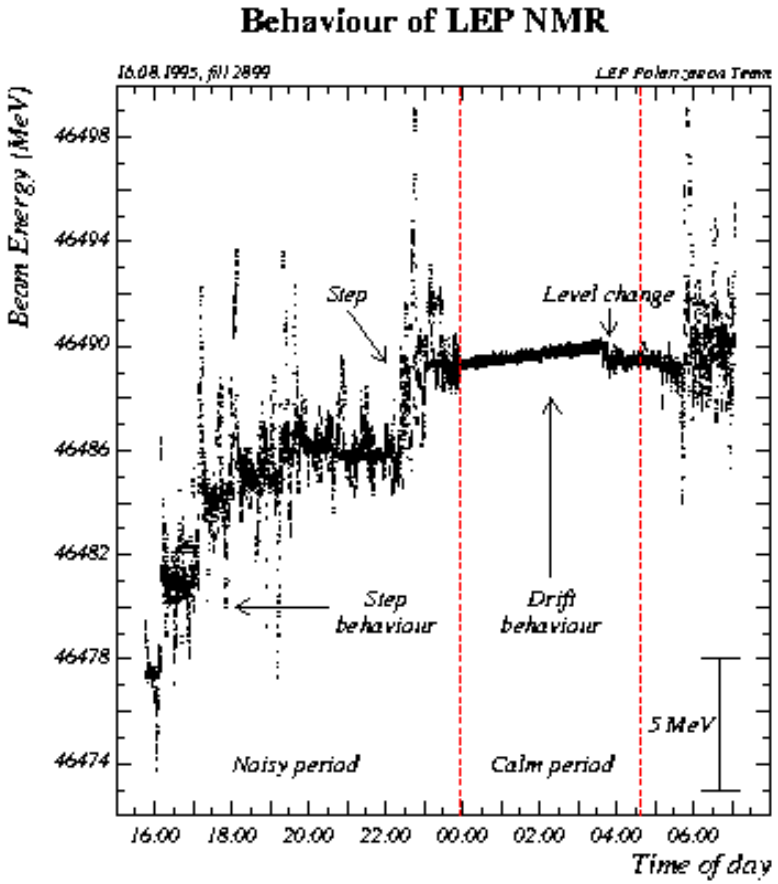
Quanto piove?

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 ⇒ variazione di L



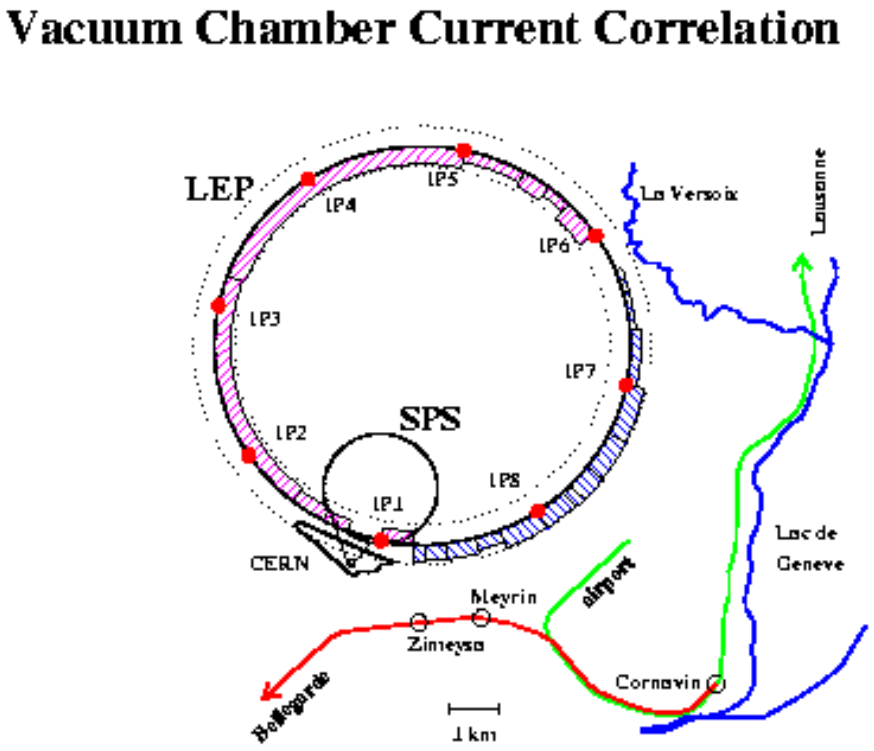
La figura mostra come il livello dell'acqua del lago Lemano influenza la forma dell'anello, ovvero il percorso totale delle particelle e dunque la loro energia. La misura e' stata possibile grazie al comune di Ginevra che, manovrando le dighe, ha permesso di aumentare e abbassare l'acqua del lago in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

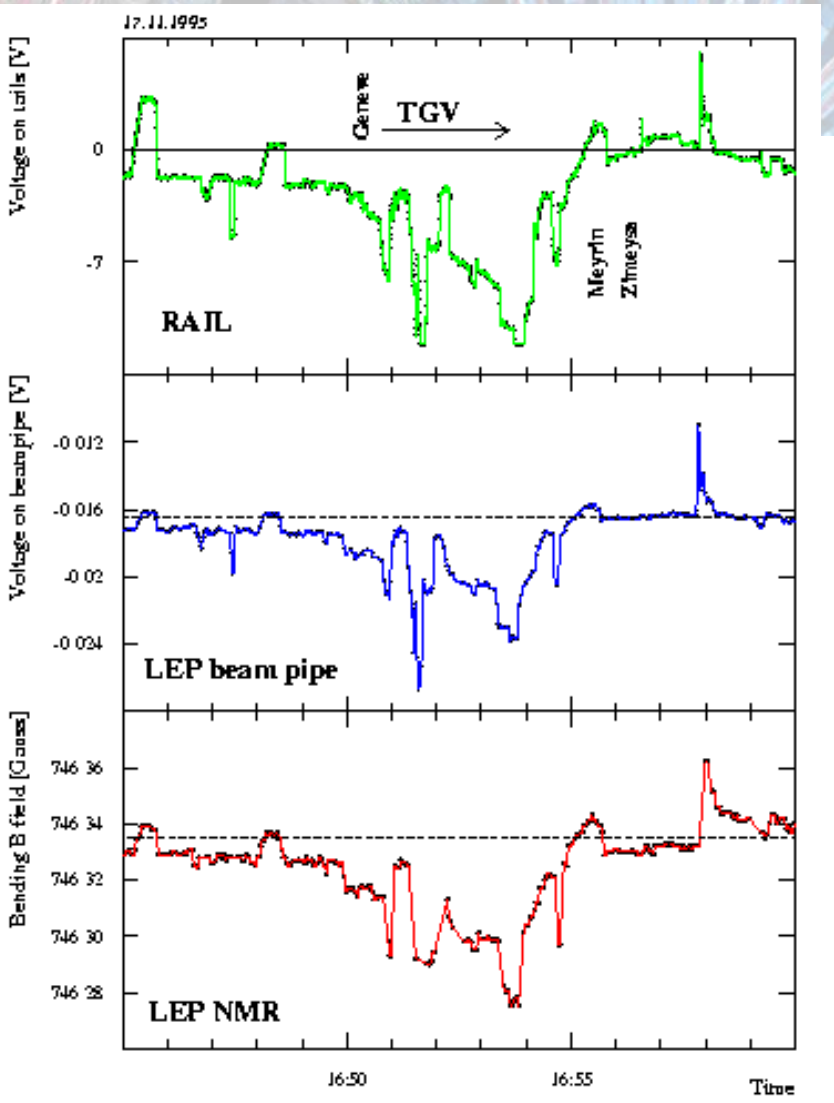
E qualche sorpresa



La figura mostra l'andamento dell'energia in funzione dell'ora. Questo andamento era ripetuto con regolarita' 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.

Il TGV





La spiegazione di questa variazione periodica di ~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 finche' 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 puo' 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.)

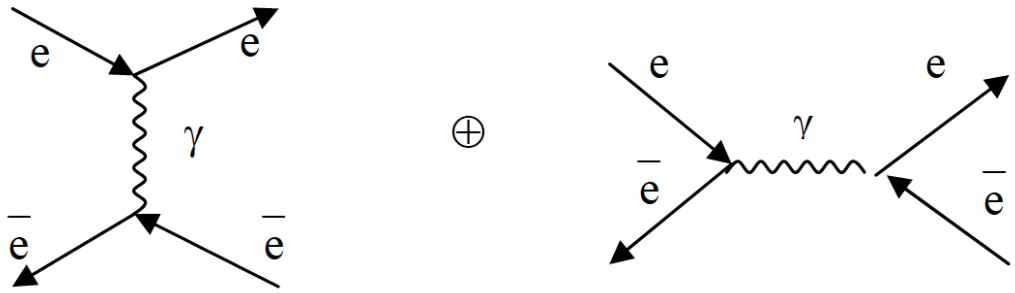
Luminositá

In teoria si puo' misurare la luminosita' dai parametri della macchina, in pratica, il modo piu' preciso per misurare la luminosita' dei fasci e' proprio usare la relazione:

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

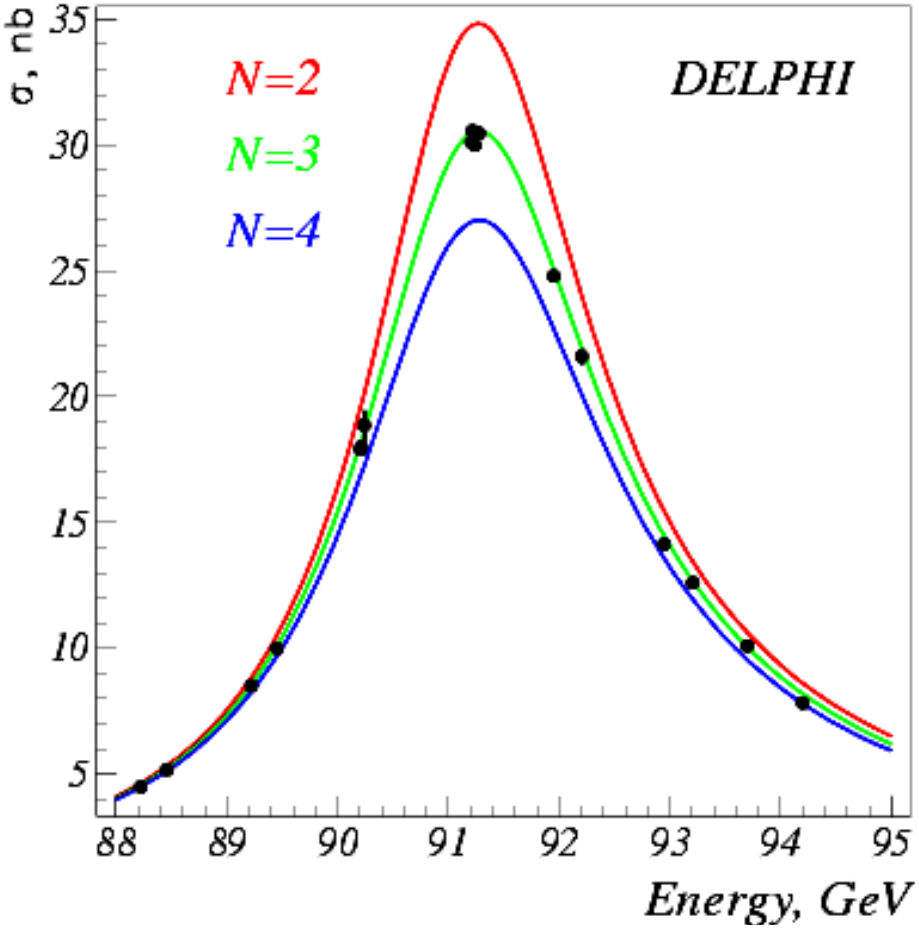
dove si seleziona un processo fisico la cui sezione d'urto e' molto ben nota teoricamente. Misurando il numero di eventi nel rivelatore dovuti a questo dato processo fisico si ottiene di conseguenza la luminosita'.

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



Si raggiunsero errori sulla lumonisita' di circa 0.5 x 10^{-3}.

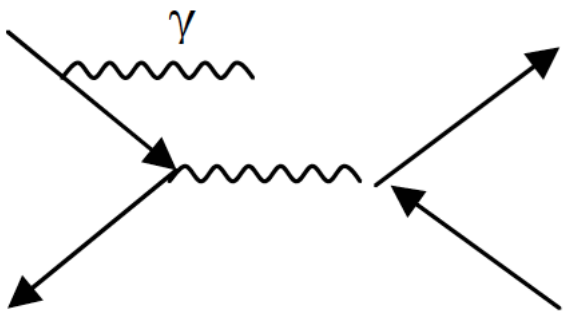
Perché cosí precisi?

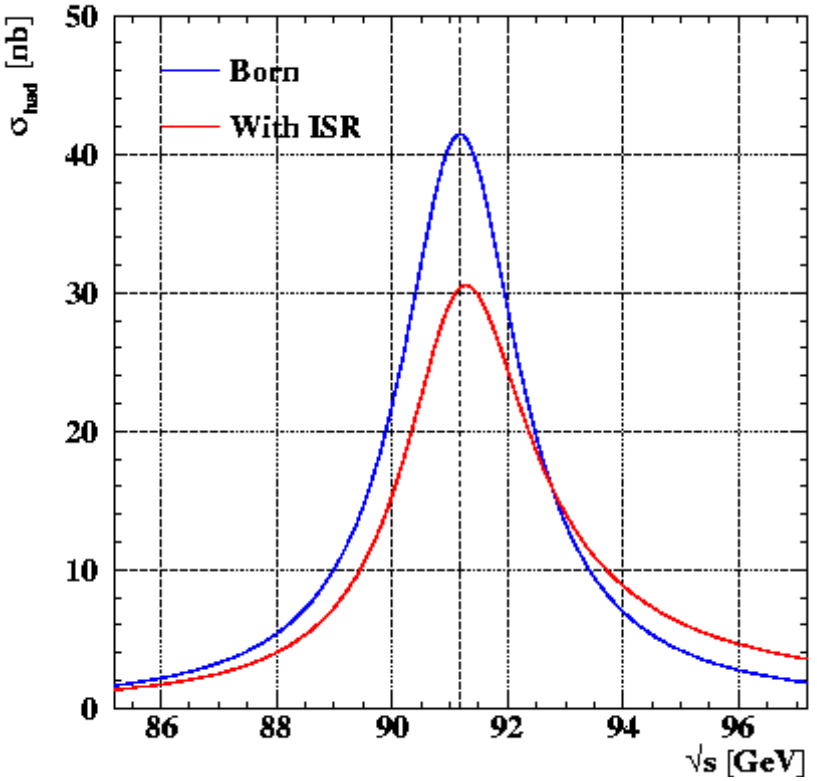


$$N(\nu) = 2.9841 \pm 0.0083$$

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 ν_τ e' stato effettivamente "visto" da DONUT al Fermilab nel 2000)

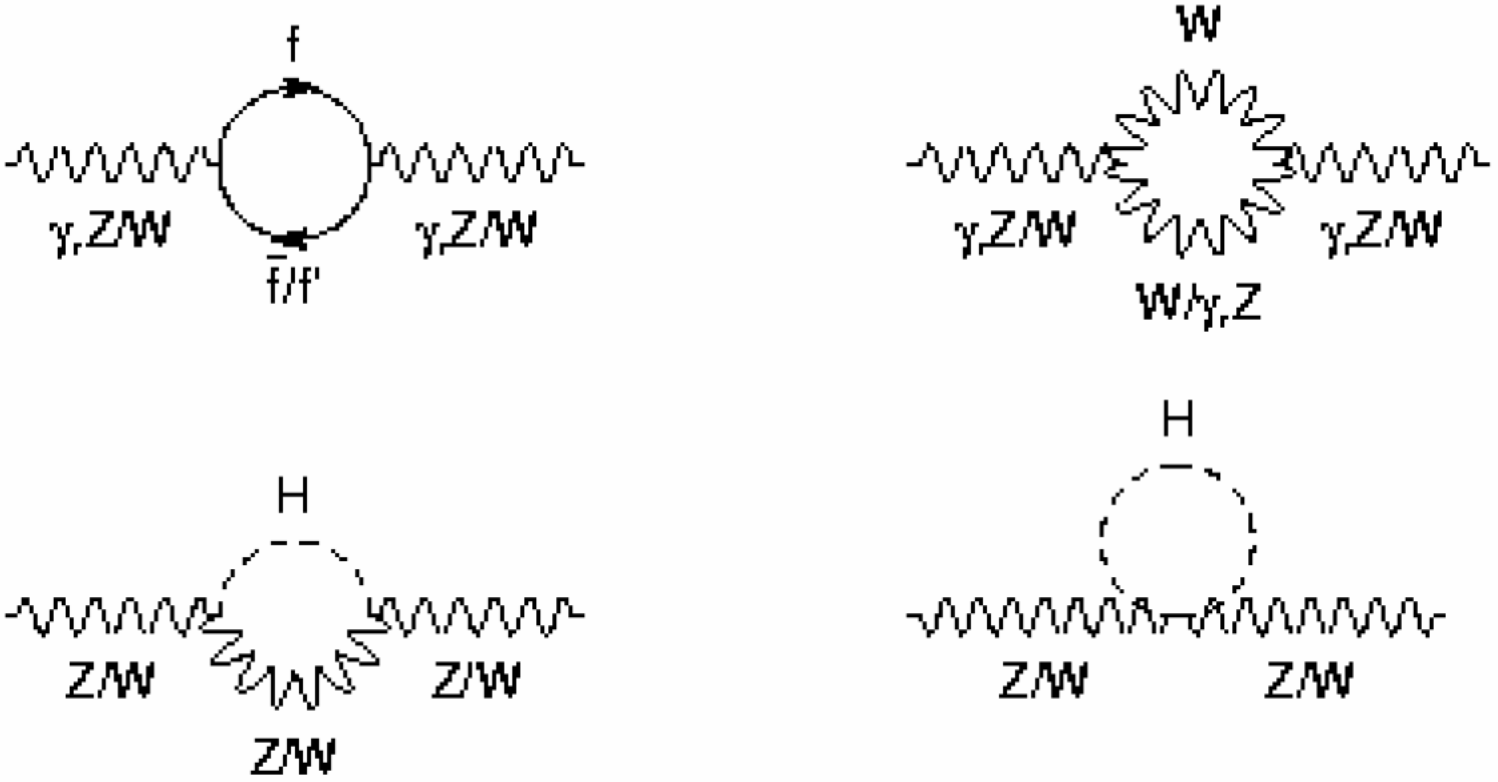
Correzioni radiative: QED





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 relazionano tra loro le costanti fondamentali del MS cambiano. Per esempio:

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

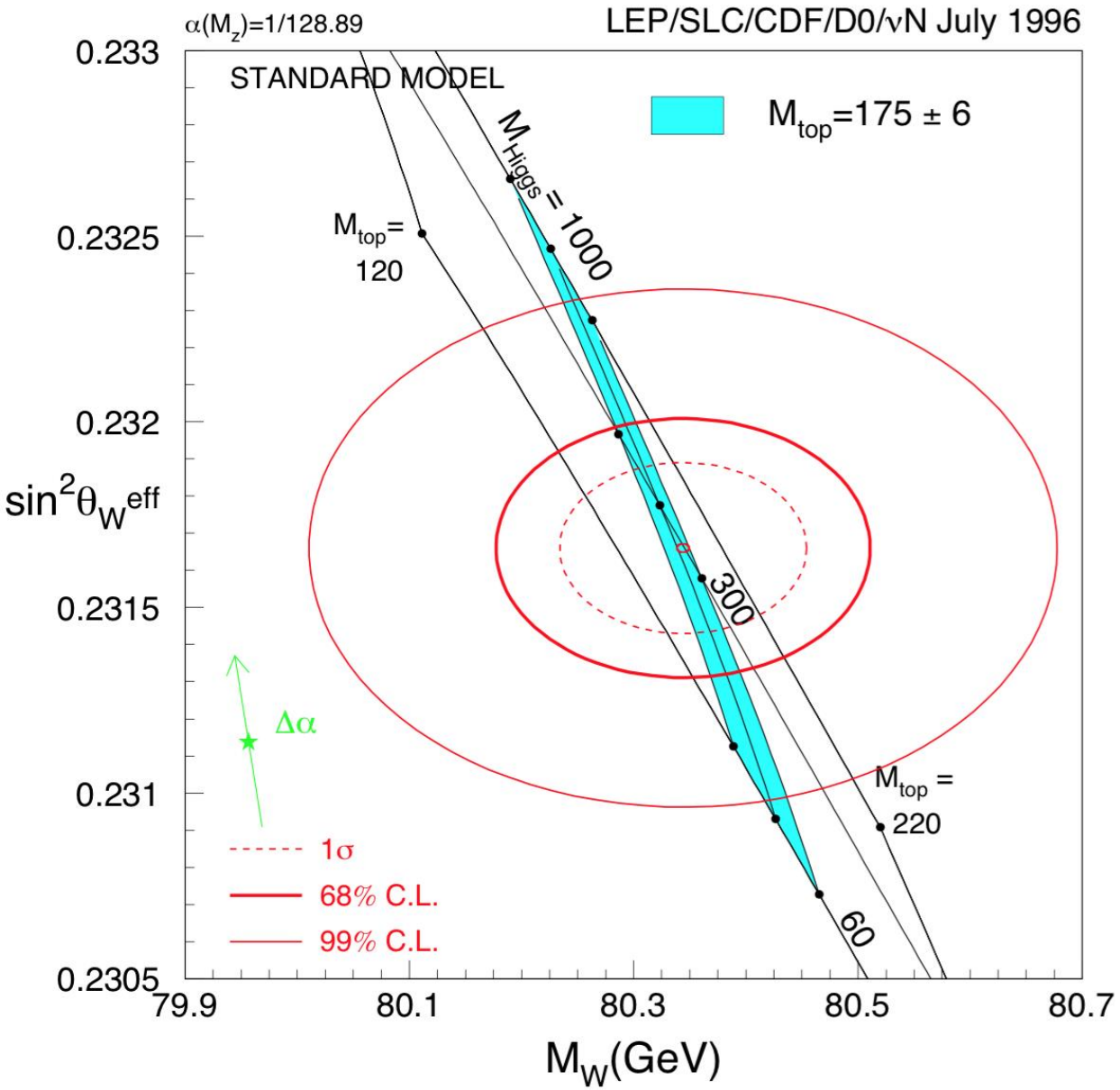
Ovvero le correzioni radiative dipendono dal quadrato della massa del quark top e dal logaritmo della massa dell'Higgs, di conseguenza si ha una forte dipendenza dalla massa del top, ma una debole dalla massa dell'Higgs.

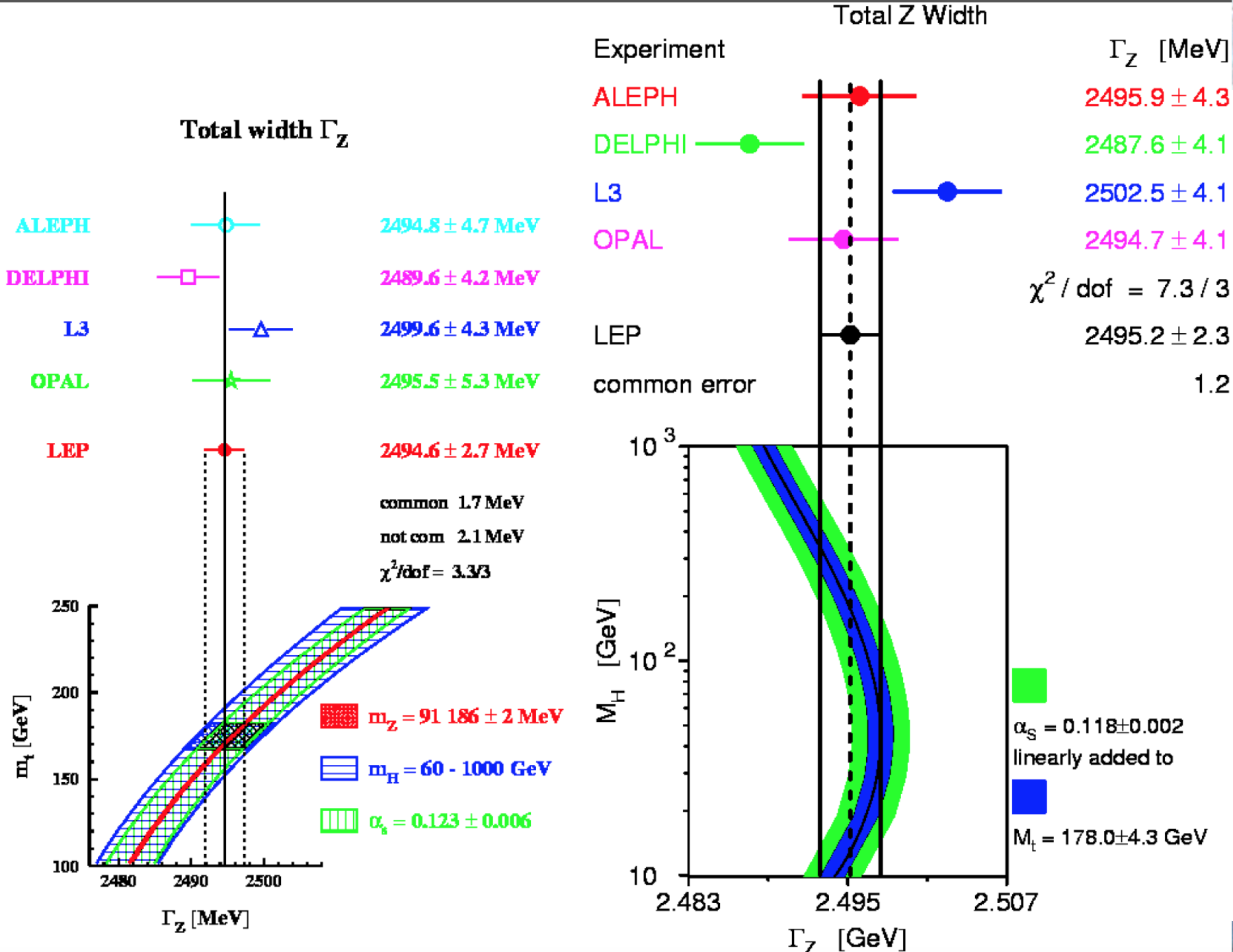
Confrontando le misure sperimentali delle variabili di precisione con le previsioni del Modello Standard si puo' determinare in modo indiretto la massa del top, e mettere limiti alla massa dell'Higgs.

Qualcosa di nuovo dei loop?

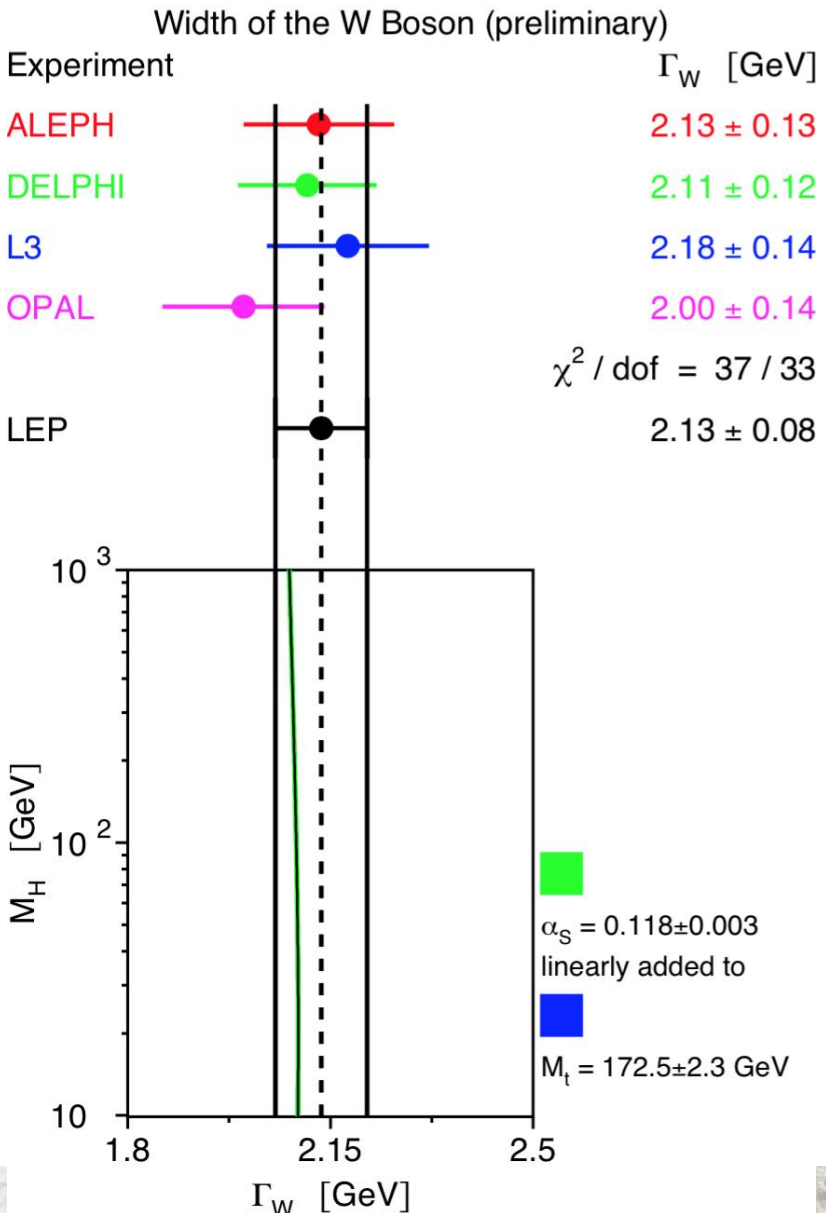
Le correzioni radiative elettrodeboli sono importantissime non solo per ottenere risultati di precisione, ma anche per ottenere informazioni su quello che non si produce direttamente a LEP.

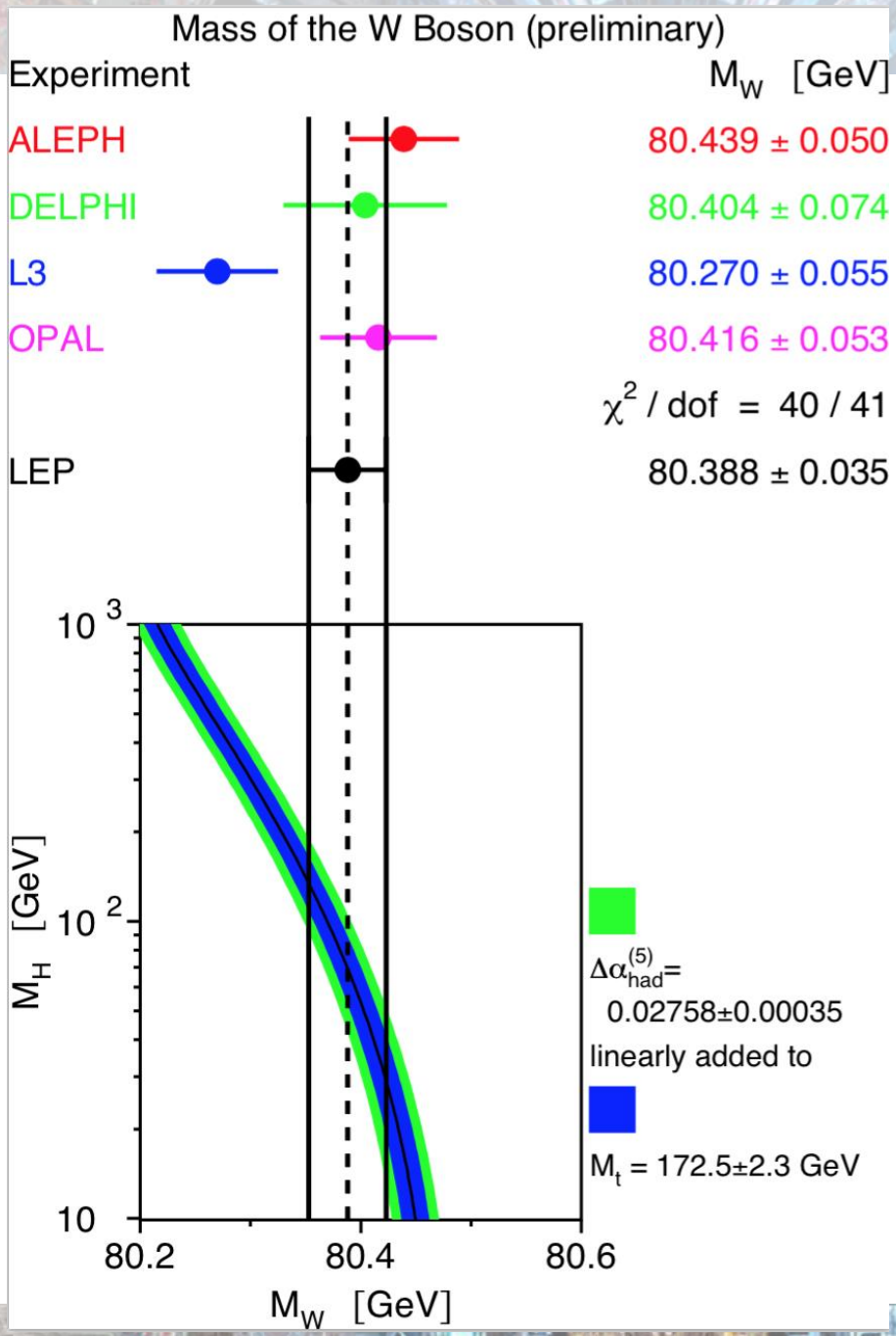
Top e Higgs nel 1996



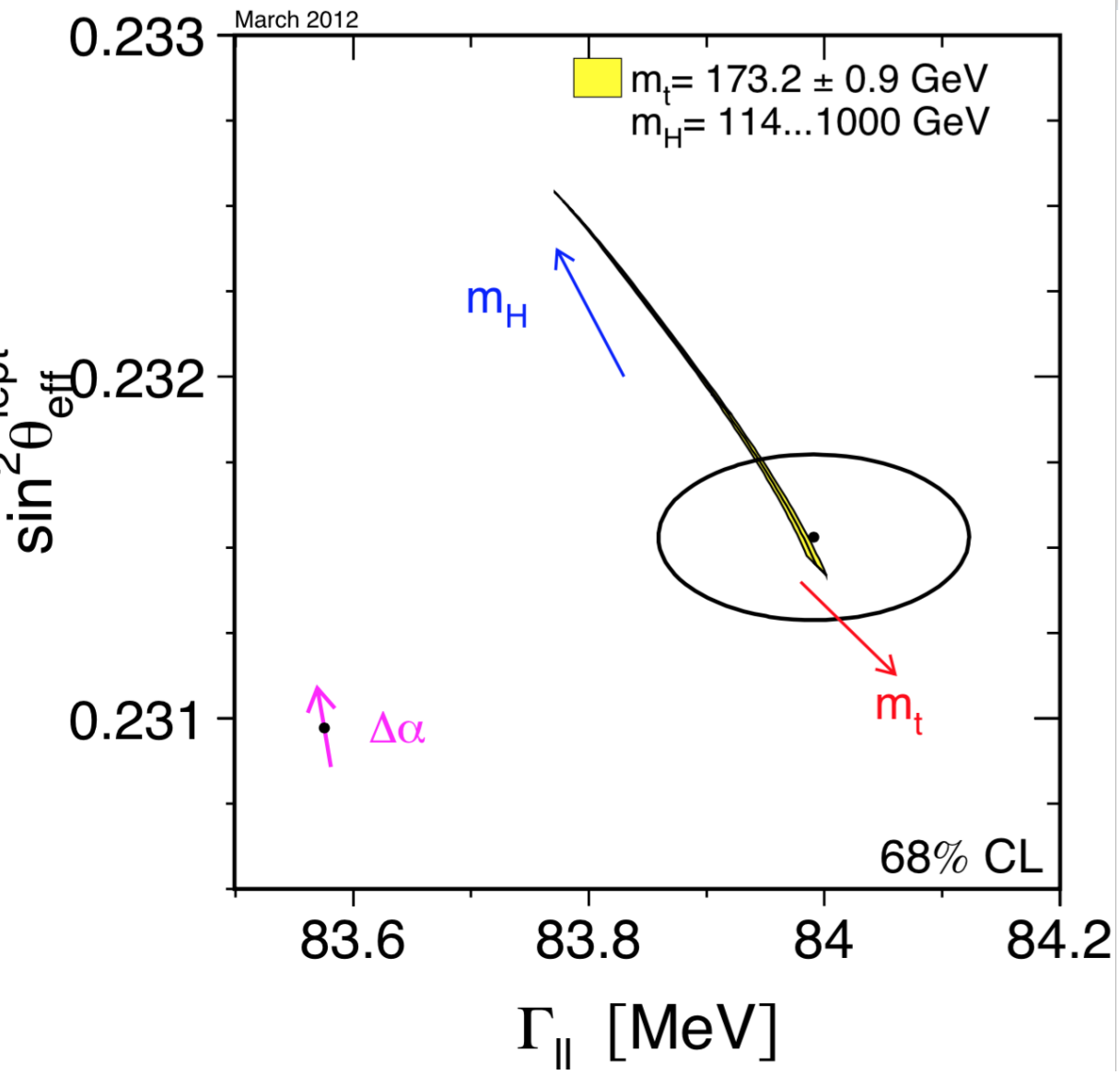

Total width Γ_Z
ALEPH
DELPHI
L3
OPAL
LEP
2494.8 ± 4.7 MeV
2489.6 ± 4.2 MeV
2499.6 ± 4.3 MeV
2495.5 ± 5.3 MeV
2494.6 ± 2.7 MeV
common 1.7 MeV
not com 2.1 MeV
χ^2/dof = 3.3/3
m_Z = 91 186 ± 2 MeV
m_H = 60 - 1000 GeV
α_s = 0.123 ± 0.006
m_t [GeV]
Γ_Z [MeV]
Total Z Width
Experiment
Γ_Z [MeV]
ALEPH 2495.9 ± 4.3
DELPHI 2487.6 ± 4.1
L3 2502.5 ± 4.1
OPAL 2494.7 ± 4.1
χ^2 / dof = 7.3 / 3
LEP 2495.2 ± 2.3
common error 1.2
M_H [GeV]
α_S = 0.118±0.002
linearly added to
M_t = 178.0±4.3 GeV
Γ_Z [GeV]

Dopo la scoperta del top

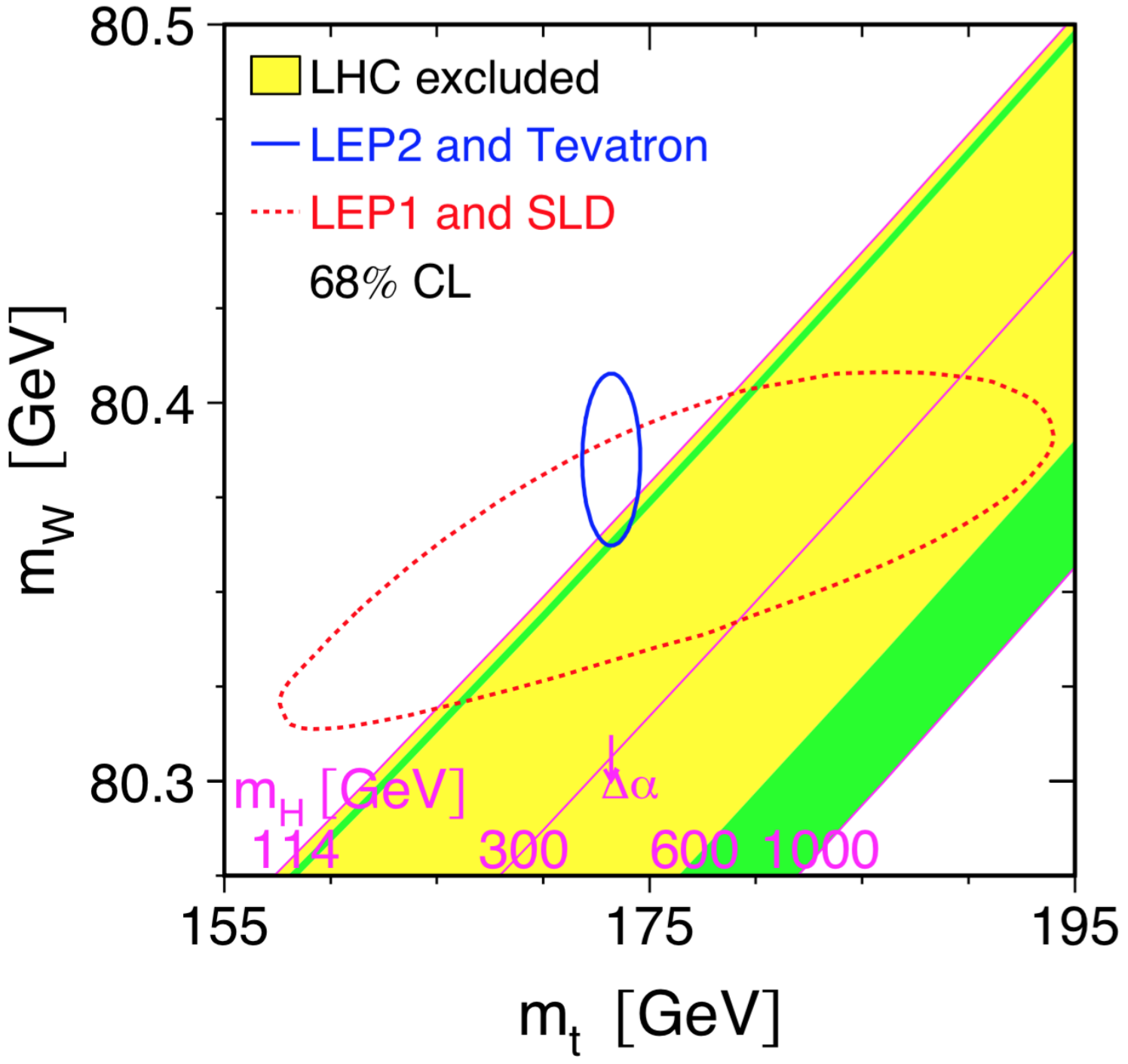


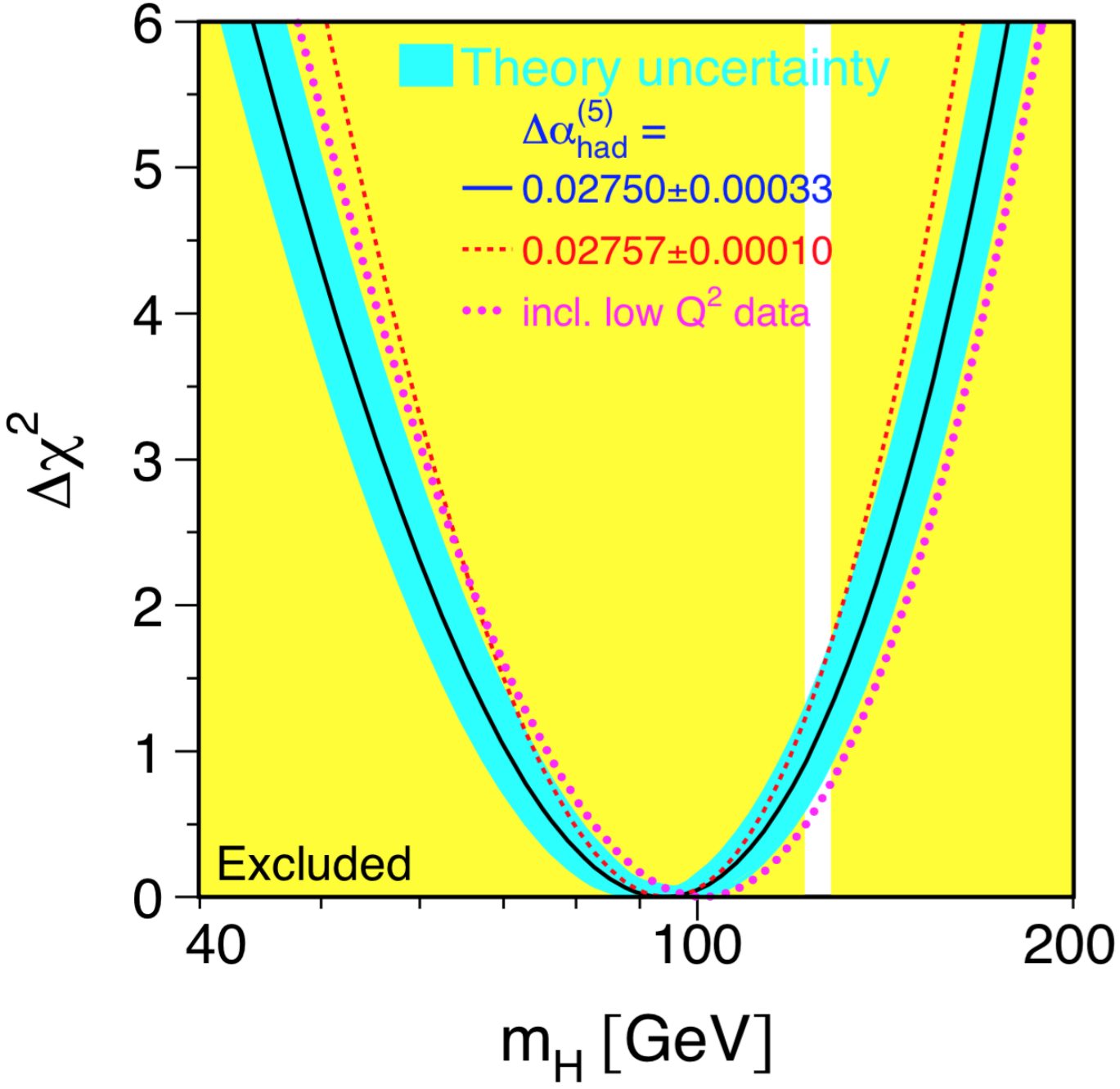


La fine di LEP

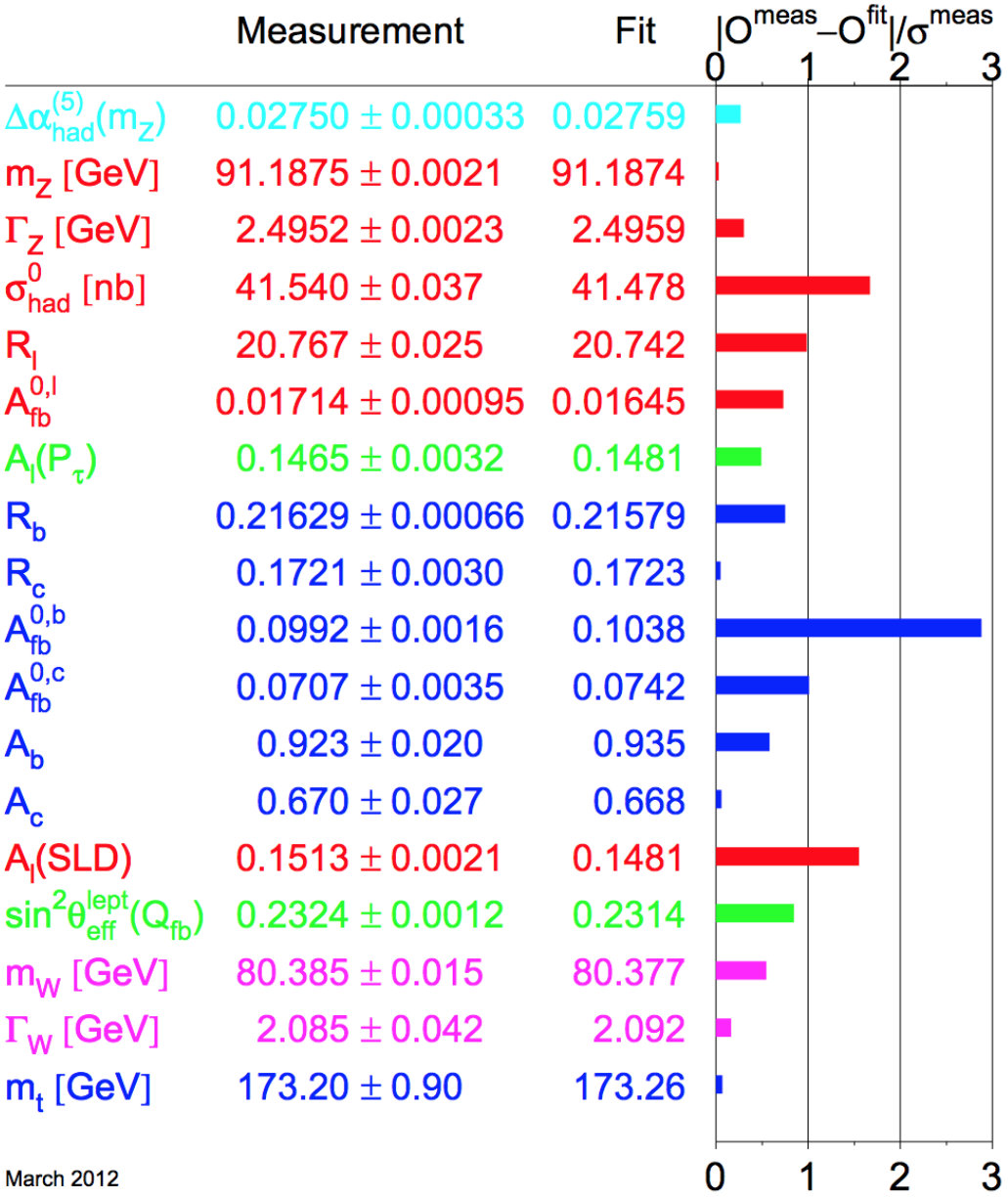


Il valore centrale è al centro del cerchio, il cerchio rappresenta il 68% del livello di confidenza. Il risultato sperimentale può essere paragonato con le predizioni del Modello Standard. In figura le predizioni del Modello Standard sono mostrate con dei vettori. Innanzi tutto il vettore piu' a sinistra (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_{em}. Gli altri 3 vettori (blu, rosso e giallo) sono le predizioni del MS tenendo in conto le correzioni radiative elettrodeboli, e variando le quantita' poco note o non note, come la massa del top (m_{top}=174.3±5.1 GeV), la costante di accoppiamento forte (a_s=0.118 ± 0.002) e la massa dell'Higgs (m_H=300+700-186 GeV)


LHC excluded
LEP2 and Tevatron
LEP1 and SLD
68% CL
m_W [GeV]
80.5
80.4
80.3
155
175
195
m_t [GeV]
m_H [GeV]
114
300
600
1000
$\Delta\alpha$


Theory uncertainty
$\Delta\alpha^{(5)}_{had}$ =
0.02750±0.00033
0.02757±0.00010
incl. low Q^2 data
Excluded
$\Delta\chi^2$
m_H [GeV]
0
1
2
3
4
5
6
40
100
200

Fisica di LEP



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

α_{em}	3.1×10^{-4}	700ppm
M(Z)	2×10^{-5}	23ppm
G_F	8.6×10^{-6}	9 ppm
α_s	2.3×10^{-2}	

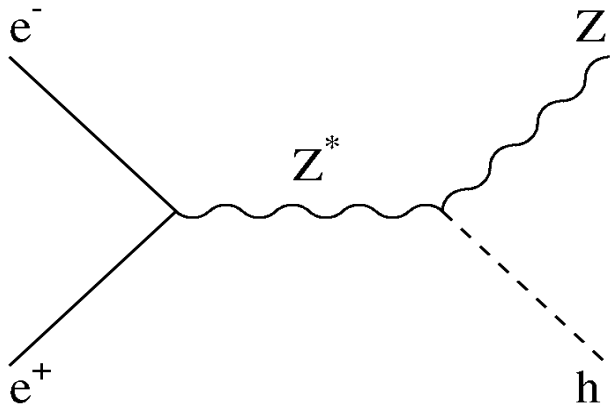
Higgs a LEP

I dati sperimentali testano il Modello Standard al **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:

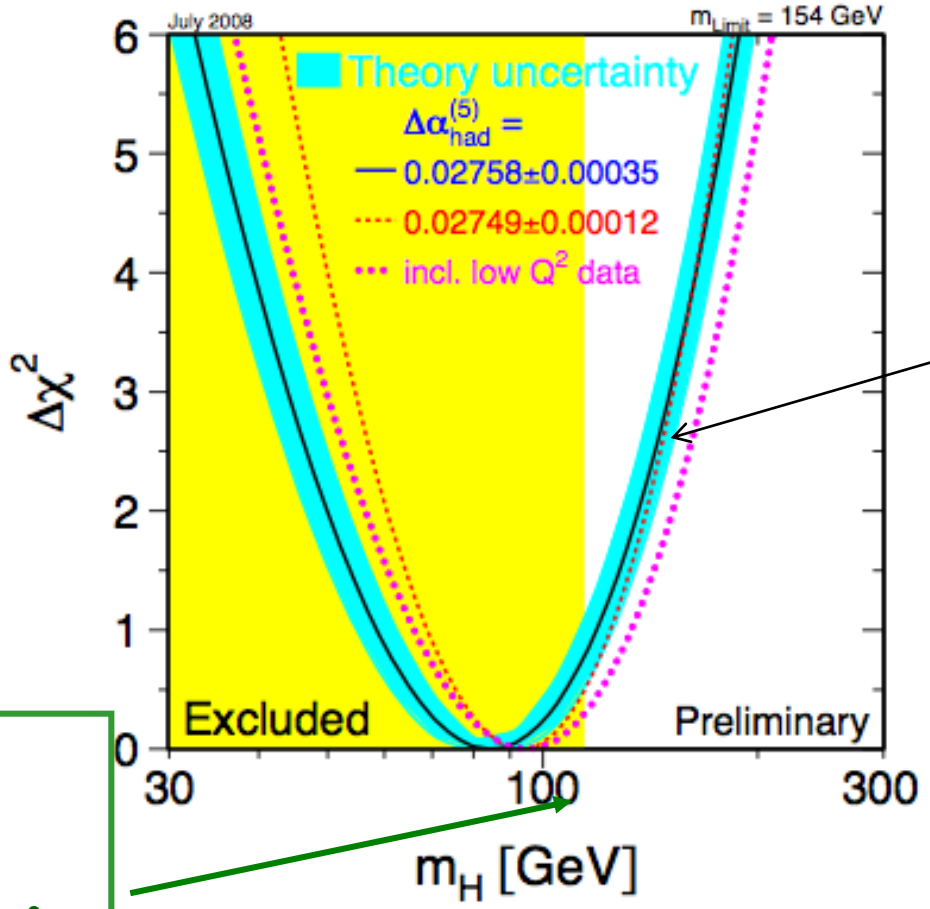


$m(Higgs) < E_{cm} - Mz$

Limite da LEP

LEP Expected to exclude: mH<115.3

Excluded: mH< 114.4 GeV



m(H)≤ 152 GeV/c²
at 95% CL

EW precision measurements

m(H)= 94 $^{+29}_{-24}$ GeV/c²

Perche' LHC

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

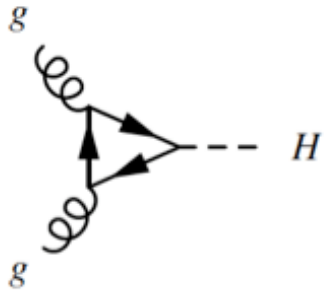
una macchina adronica (protone-anti-protone o protone-protone) e' una macchina da "scoperta": l'energia nel centro di massa dell'urto fondamentale tra quark o gluoni varia per vari ordini di grandezza, e i processi disponibili sono moltissimi. Si possono raggiungere energie nel centro di massa molto 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)

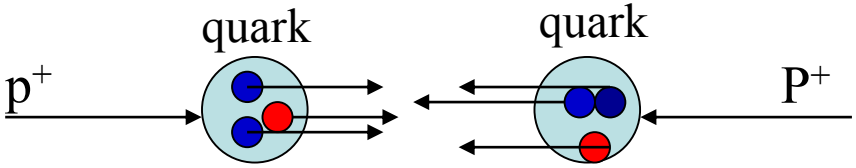
Protone – protone non e' penalizzante per la produzione dell'Higgs perche' il processo dominante di produzione di Higgs e' via la fusione (collisione) di 2 gluoni



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*)

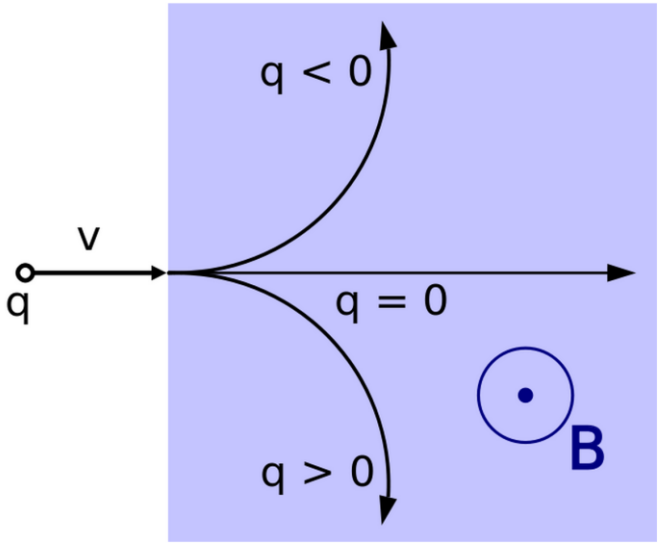
- I partoni che interagiscono portano solo una frazione *x* dell'energia totale del protone:
- Abbiamo bisogno di collisioni di protoni a **~6 TeV** per raggiungere 1 TeV
- Vantaggio: scan di un ampissimo range di energia $E<1/3(E(p)+E(p))$

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°), **8.3 T**
- ~9300 magneti in tutto
- Energia immagazzinata: **~10 GJ**

Il campo magnetico

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



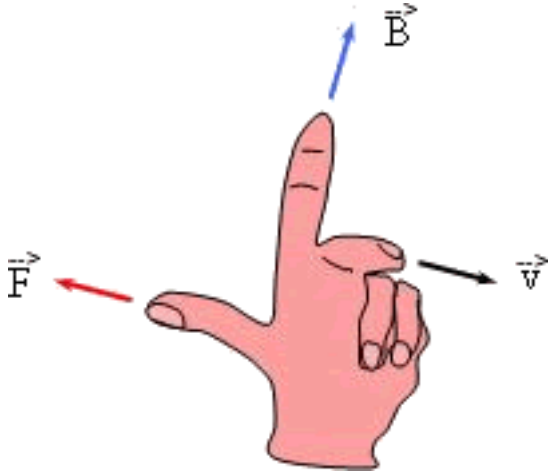
La forza di Lorentz

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

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

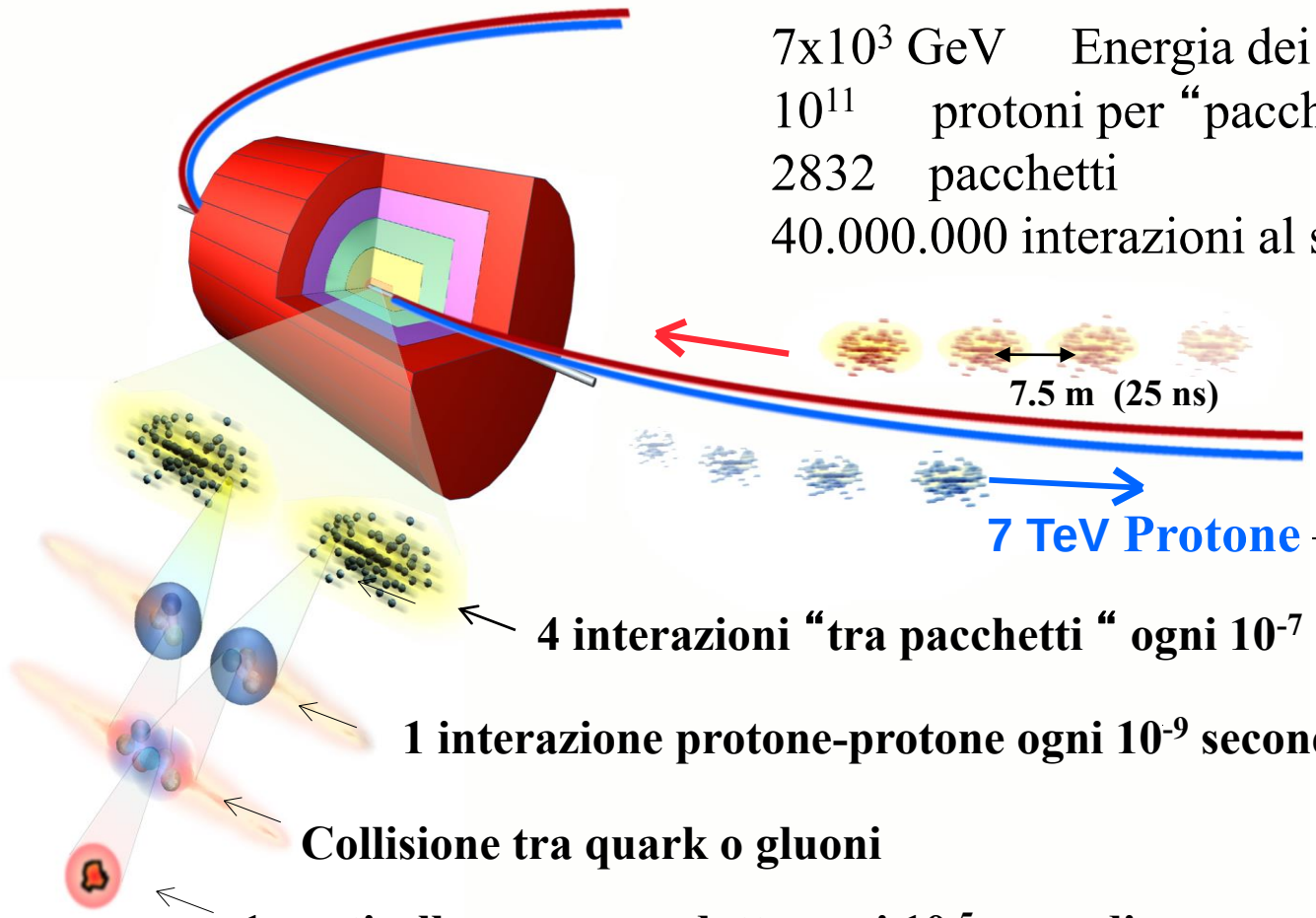
Un campo magnetico permette di:

- 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

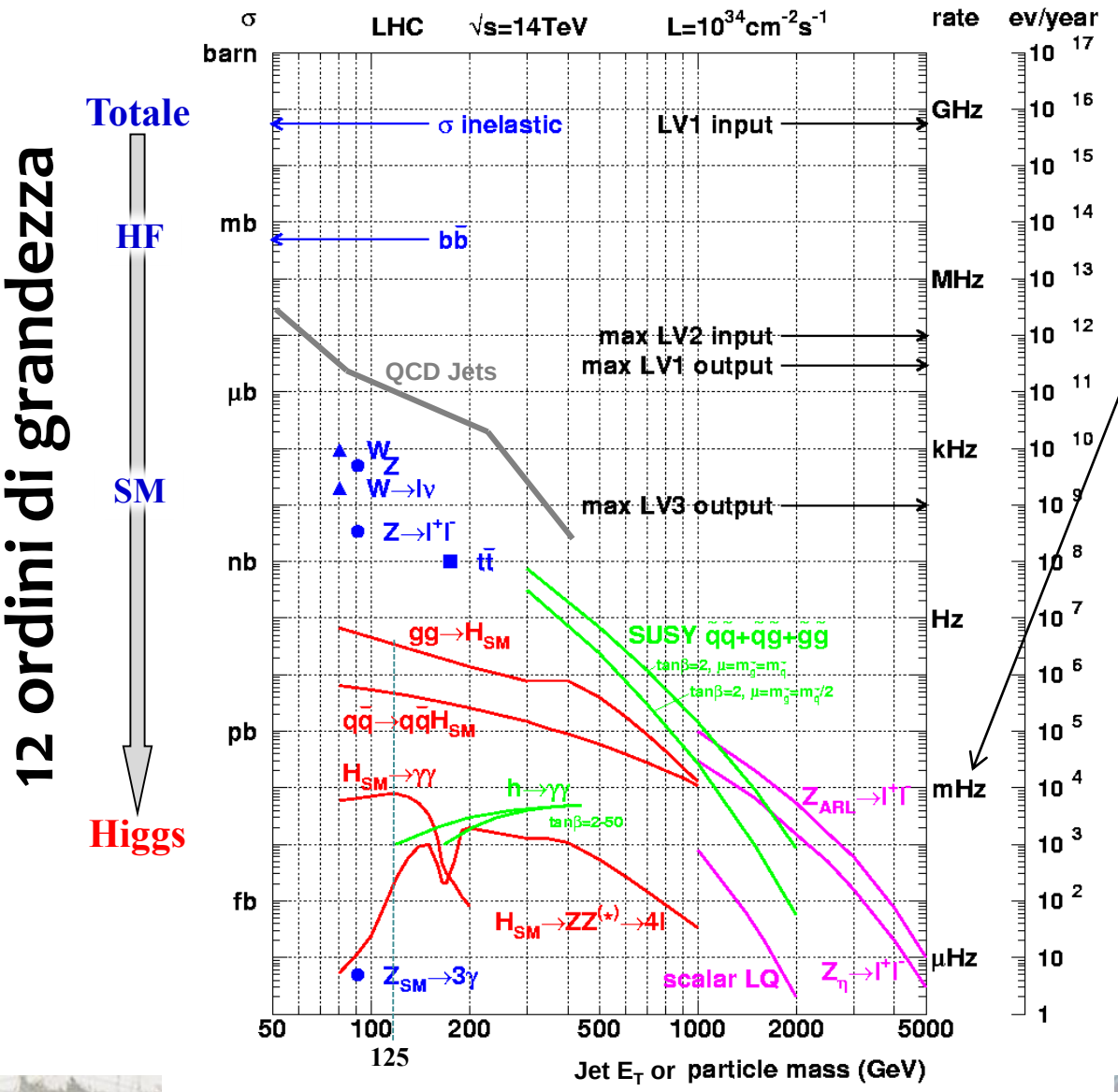
Costruito nel tunnel di LEP / urti protoni - protoni



7×10^3 GeV Energia dei protoni
10^{11} protoni per "pacchetto"
2832 pacchetti
40.000.000 interazioni al secondo

Quante interazioni facciamo?

Sezioni d'urto σ (a 14 TeV):



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

Processi **molto rari**

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

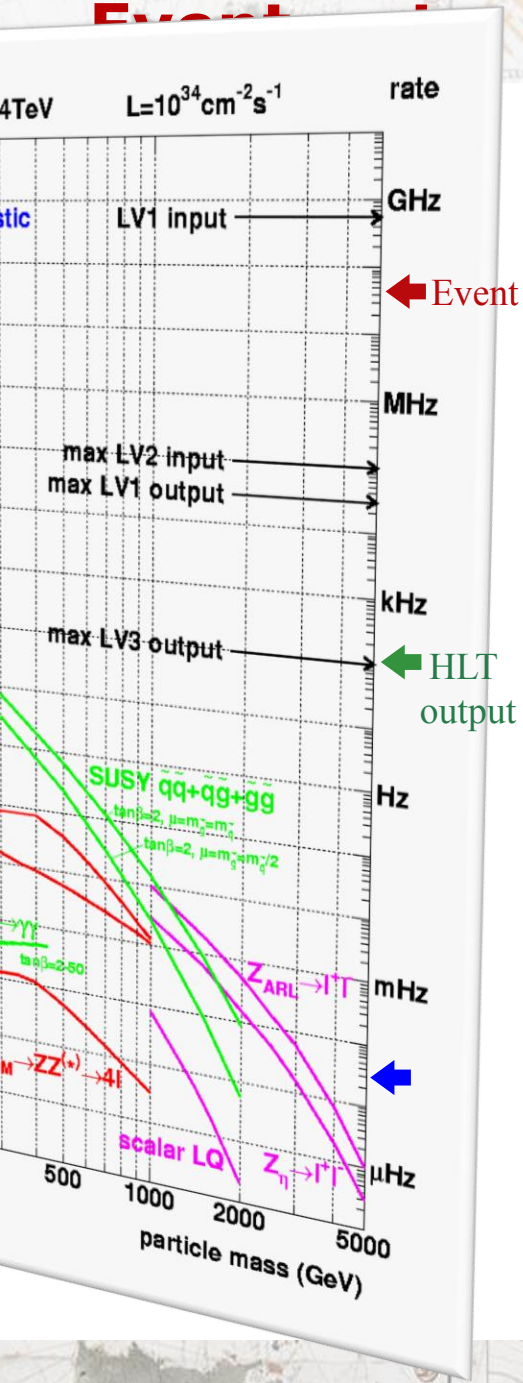
$$\mathcal{L} = f\frac{n_1 n_2}{A}$$

Numero di p nei fasci

Frequenza di collisione

Superficie in cui collidono

⇒ Si cerca la **massima luminosità** (L) possibile



ON-line

OFF-line

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

ovvero ogni 50 (25) ns

Dimensione eventi **~1 Mbyte**

- Impossibile salvarli tutti!
- Band width limit ~ 100 Gbyte/s

TRIGGER: Selezione in tempo reale

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

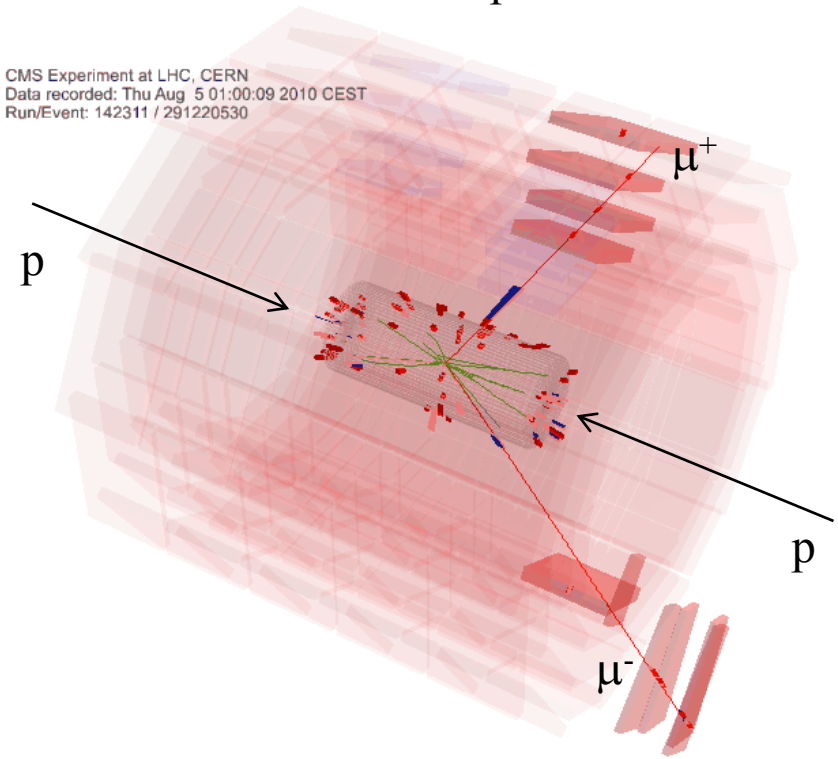
Analisi off-line: ulteriore selezione di 1 evento interessante ogni ~10^6

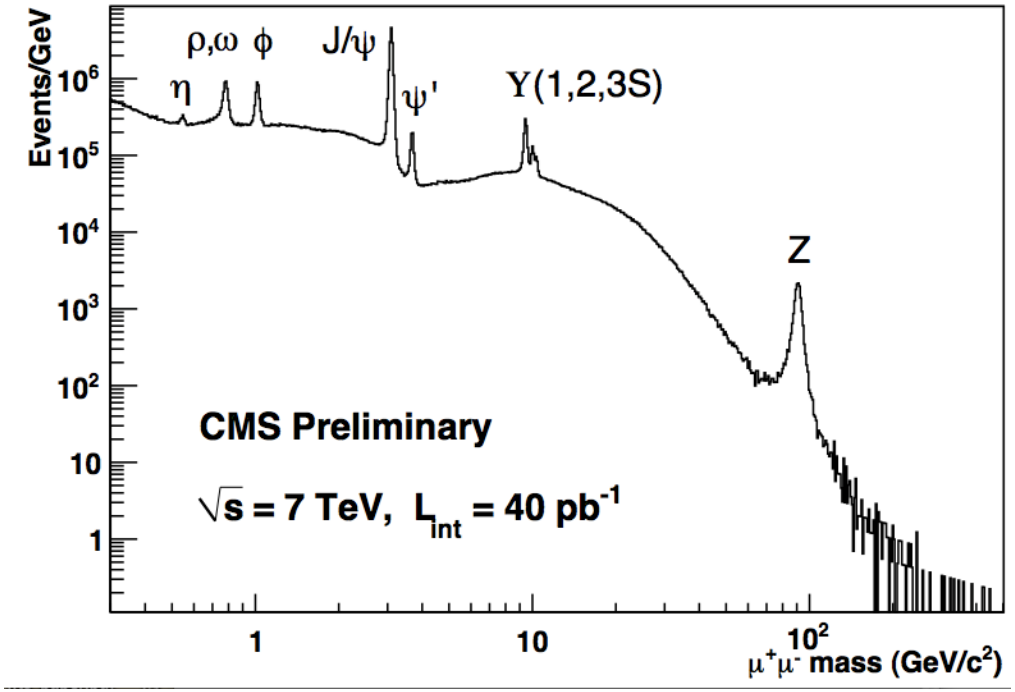
Eventi

Le particelle "interessanti" decadono istantaneamente

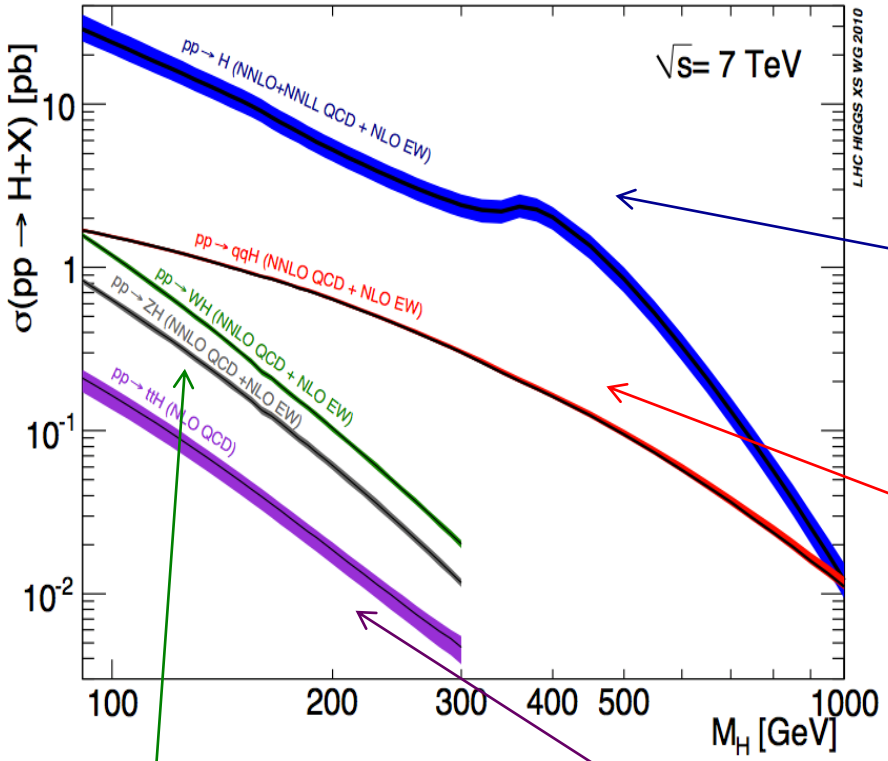
- Dobbiamo cercare i loro prodotti di decadimento
- Spesso in un fondo ("background") di eventi simili prodotti per es. da processi già noti

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

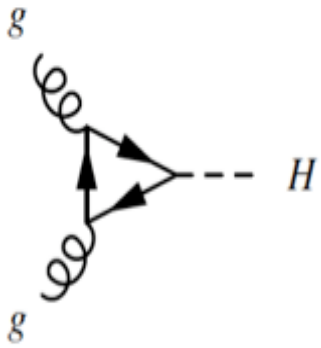




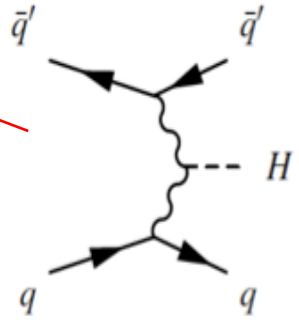
Processi di produzione di Higgs at LHC



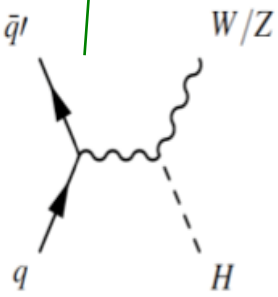
ggF: Fusione di due gluoni



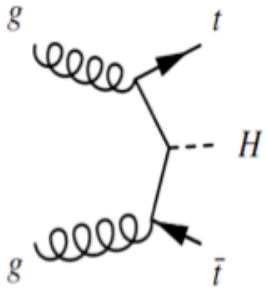
qqH: fusione di WW o ZZ



WH: ZH: Higgs-strahlung

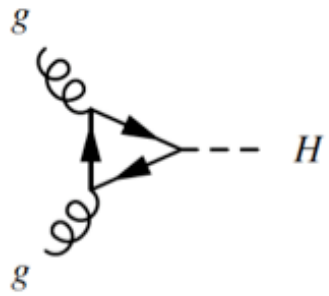


ttH: fusione di due quark



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:

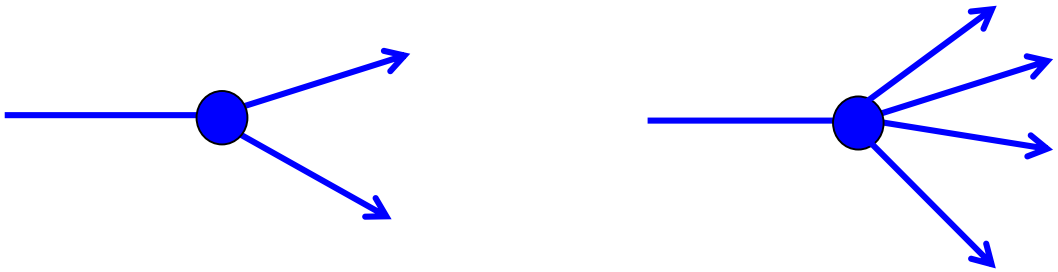


Il bosone di Higgs non e' una particella stabile

Decade in particelle elementari piu' leggere

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

- H→due fotoni (H→γγ)
- H→ quattro leptoni, per esempio quattro elettroni o quattro muoni (H→4l)

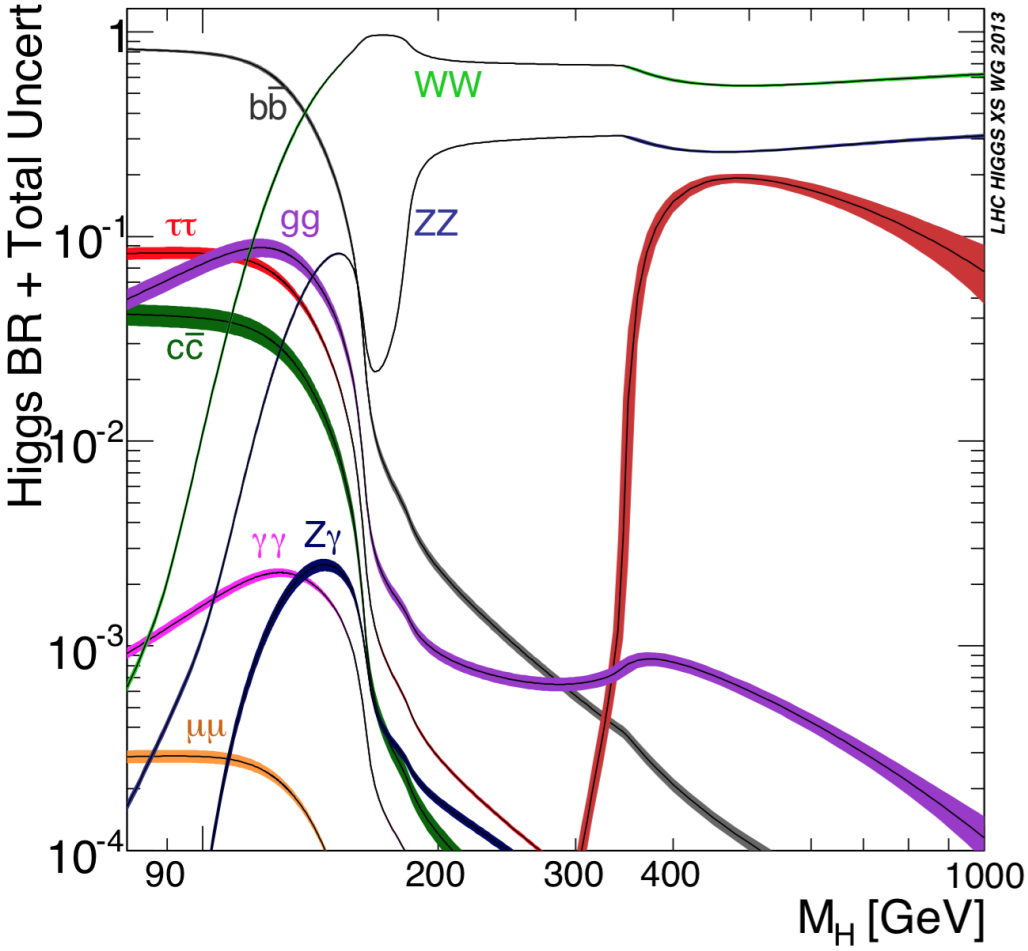


Come decade l'Higgs

5 modi di decadimento studiati

	Exp Sig (CMS) @125.7	σ_M/M
• bb	2.6σ	10%
• ττ	3.9σ	10-20%
• WW	5.4σ	16%
• ZZ	6.3σ	1-2%
• γγ	5.3σ	1-2%

• ricerche in Zγ, μμ



Produzione e decadimenti del bosone di Higgs

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

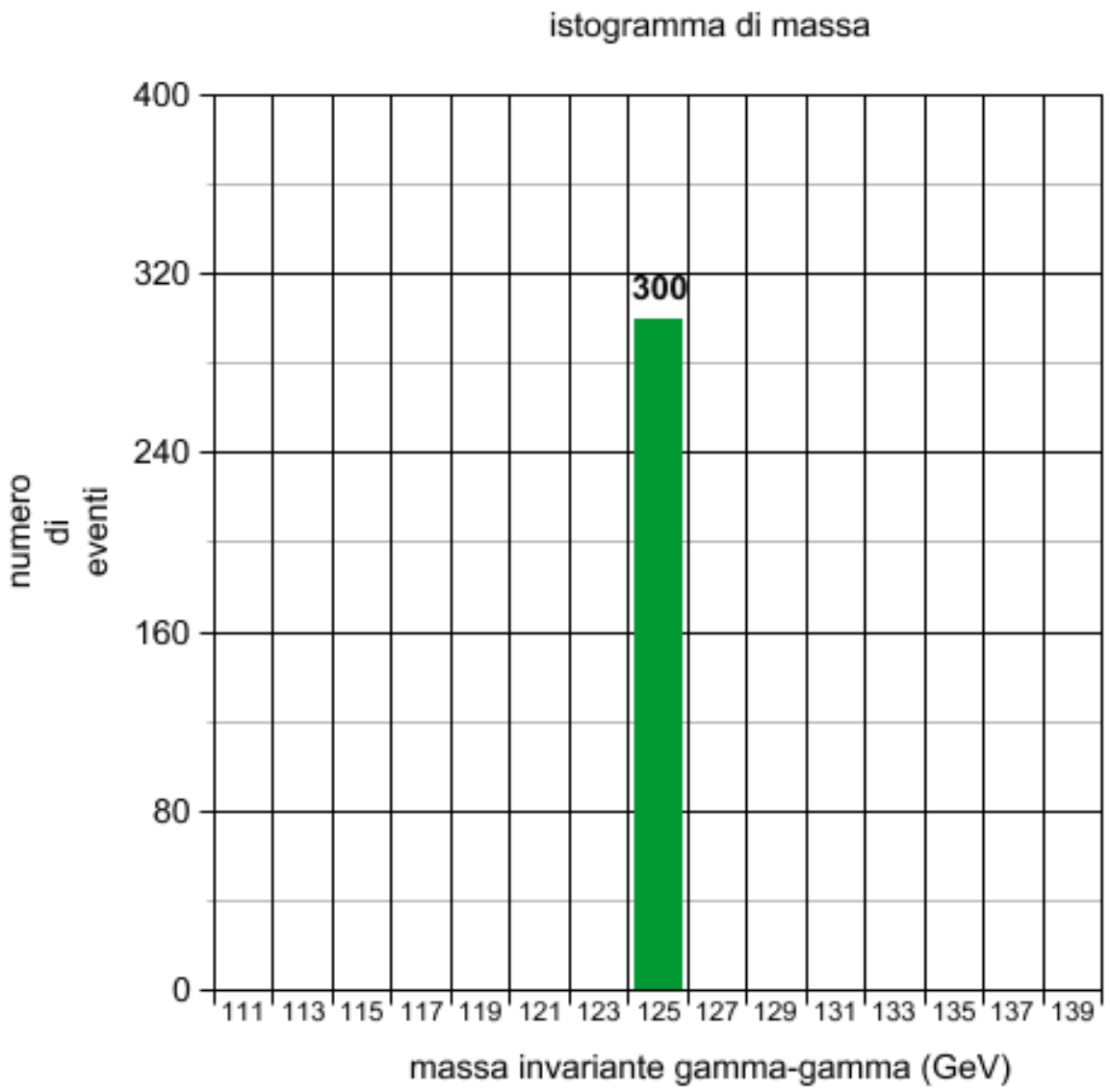
La teoria non fornisce previsione sulla massa del bosone di Higgs

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.

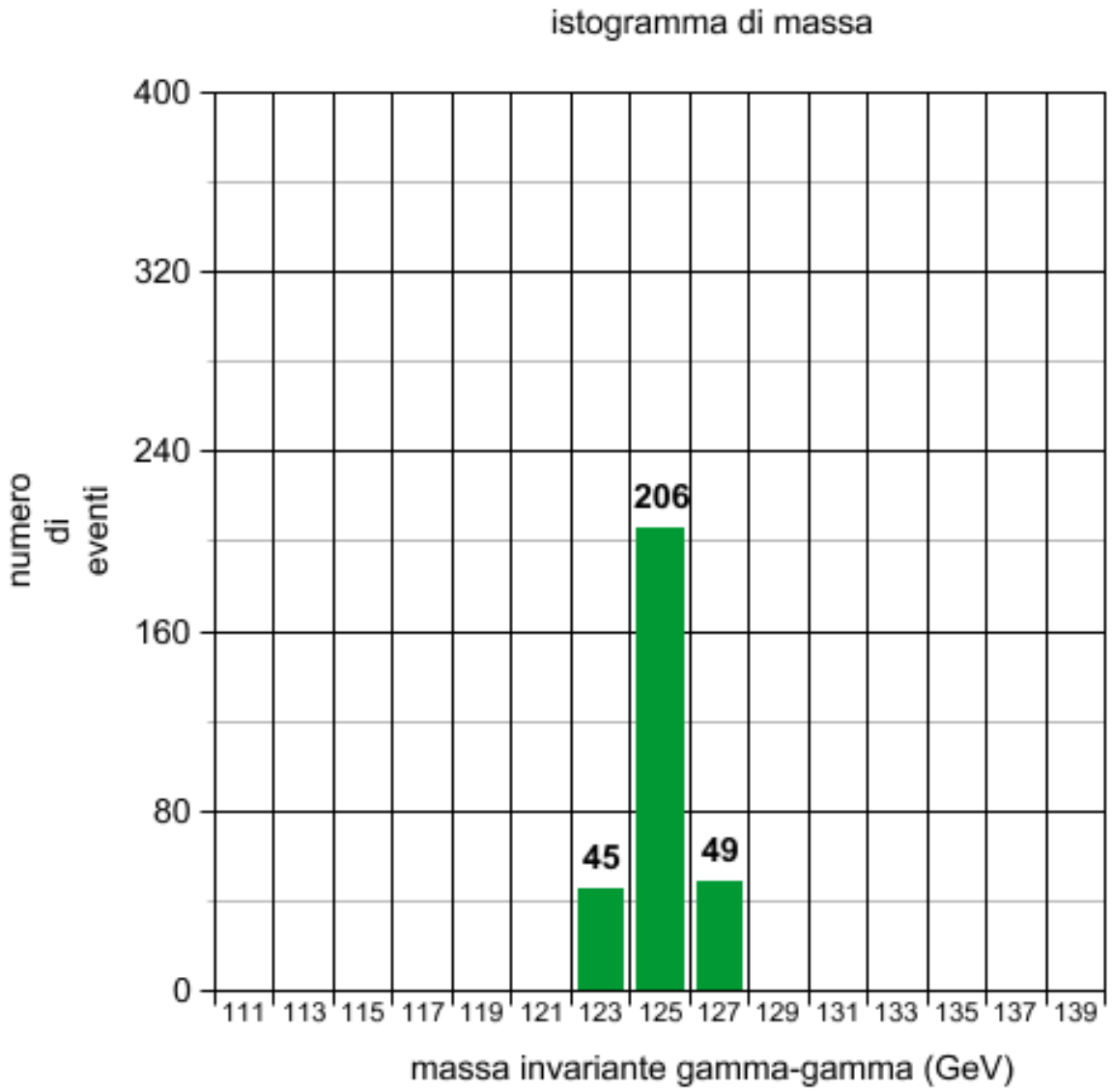
Decadimento di una particella di massa 125 GeV



Questa e' una simulazione

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

Decadimento di una particella di massa 125 GeV

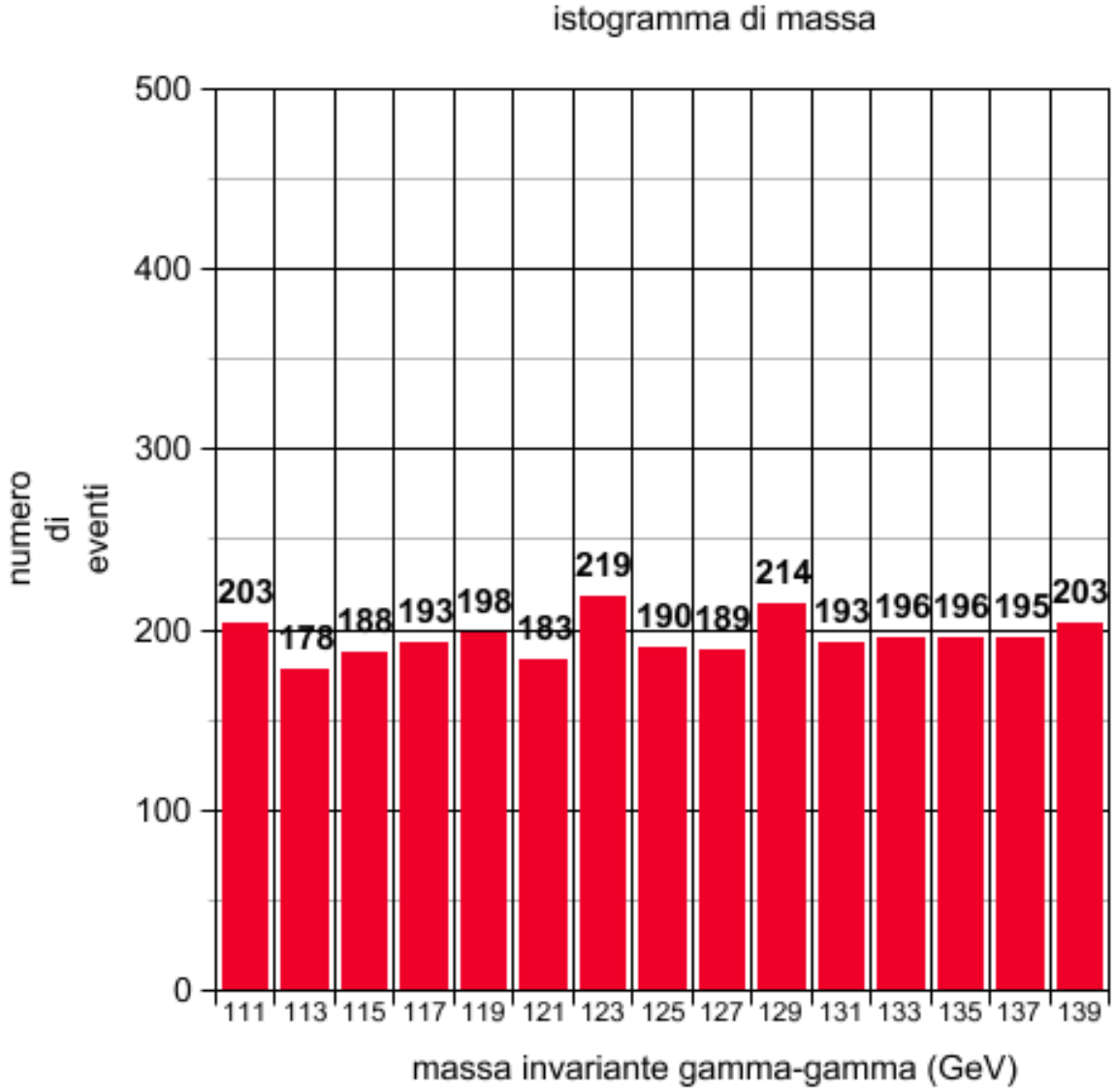


Questa e' una simulazione

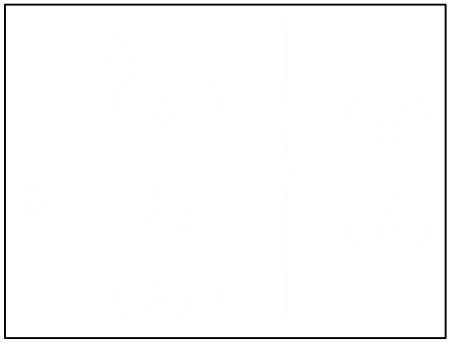
$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

Il fondo

Massa di 2 fotoni non associati al decadimento di una particella

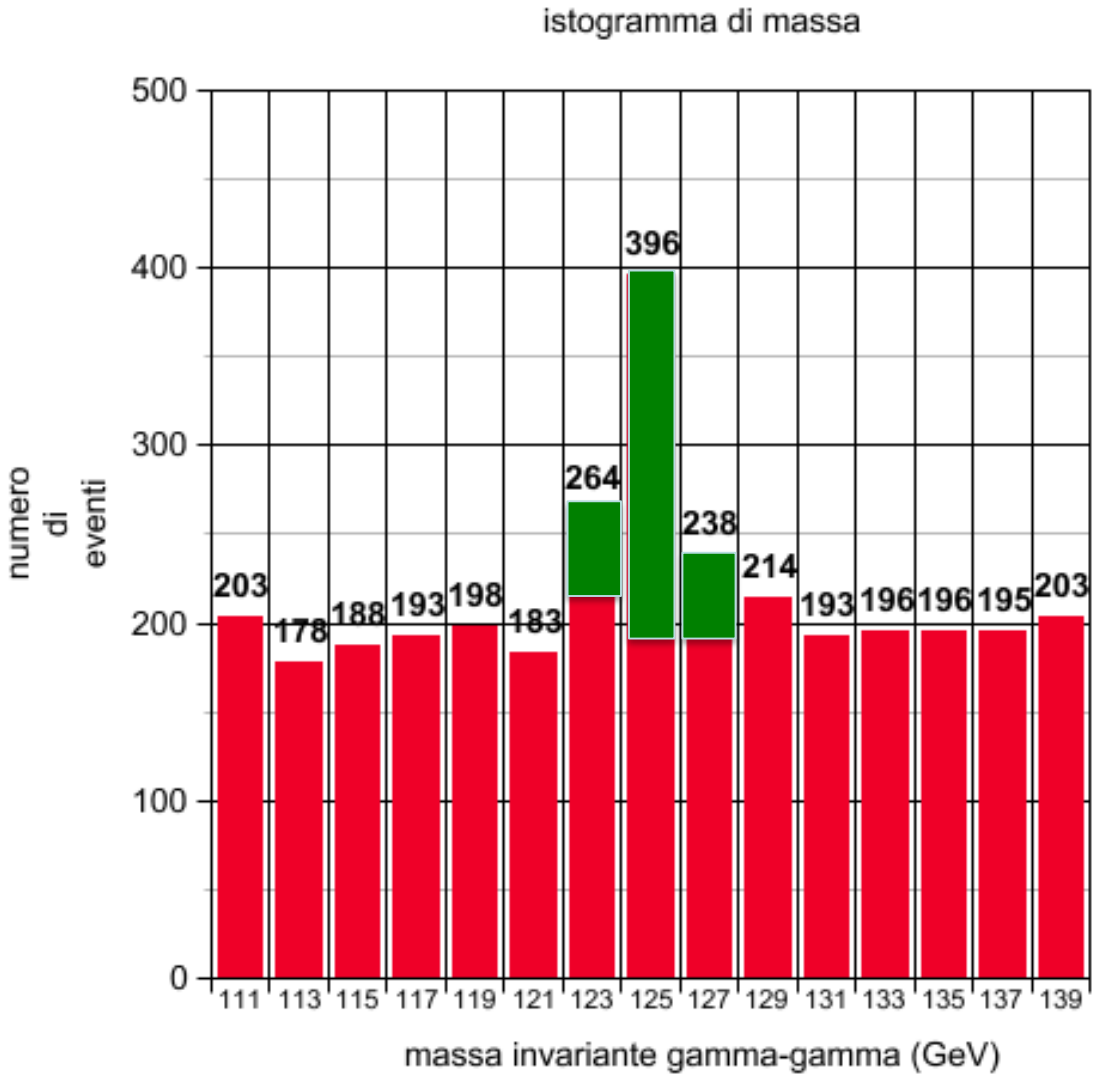


Questa e' una simulazione



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

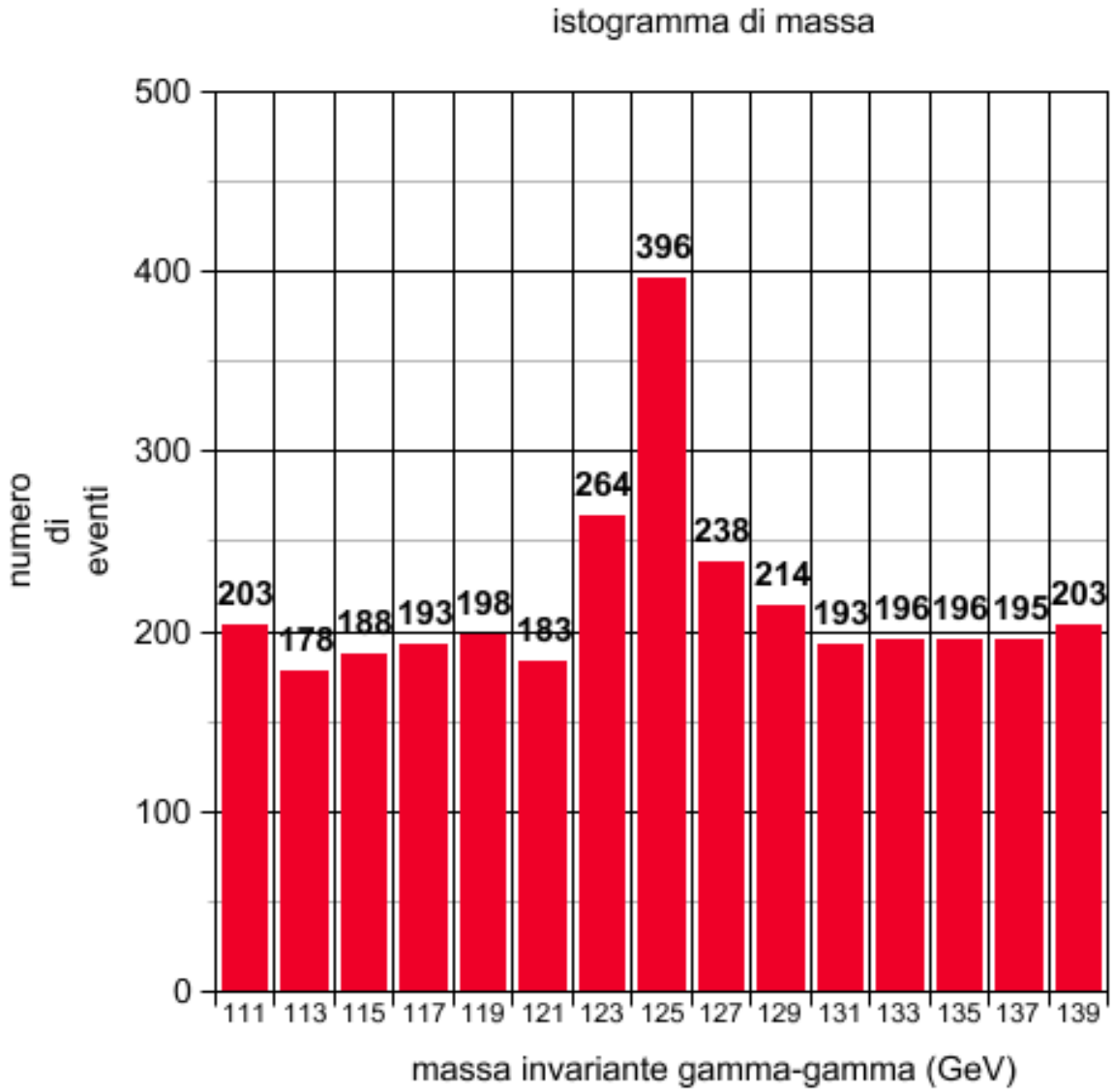
Fondo e Segnale



Questa e' una simulazione

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

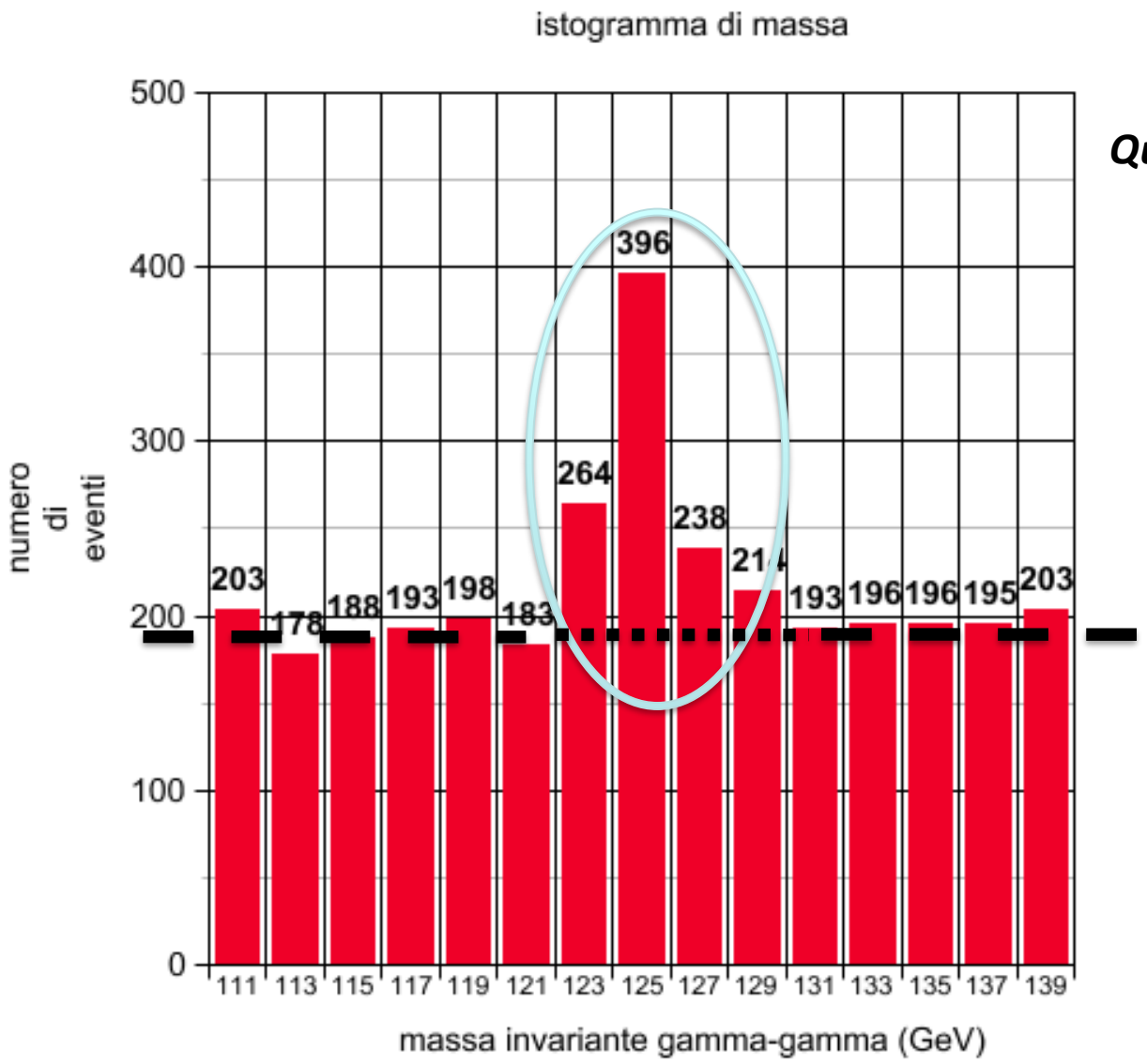
Fondo e Segnale



Questa e' una simulazione

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

Fondo e Segnale

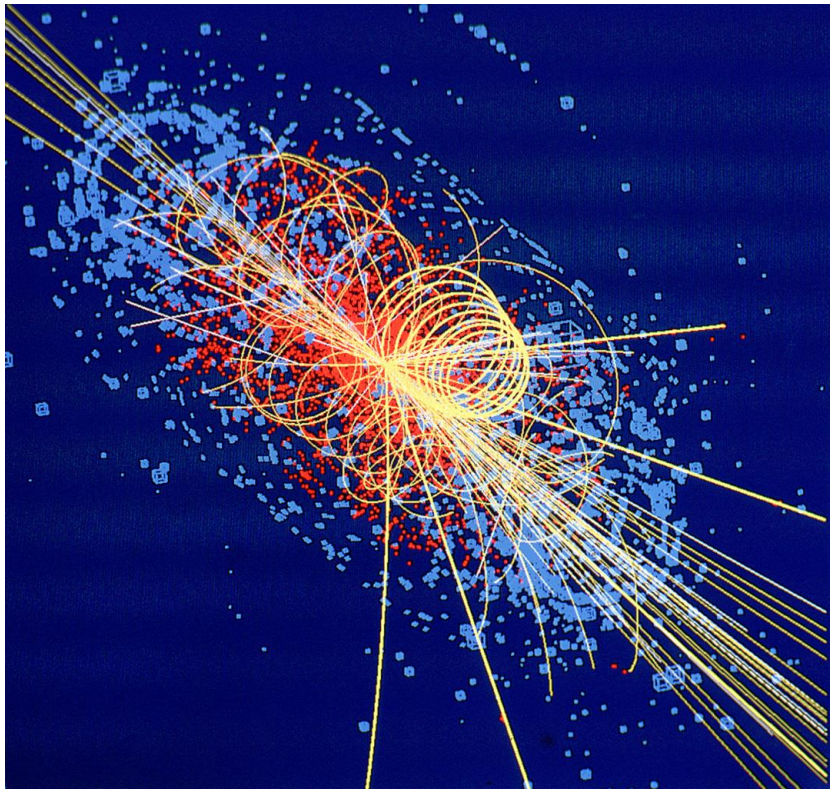


Questa e' una simulazione

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

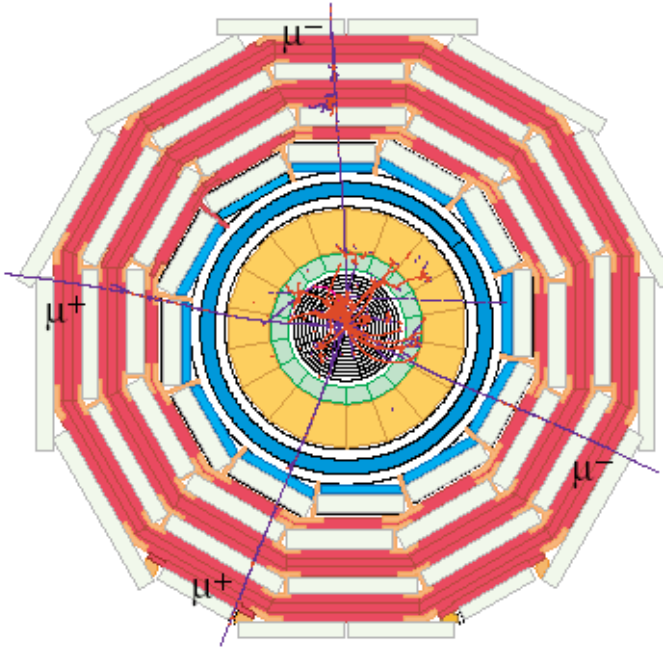
Higgs in 4 leptoni

Evento simulato di produzione di Higgs



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

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



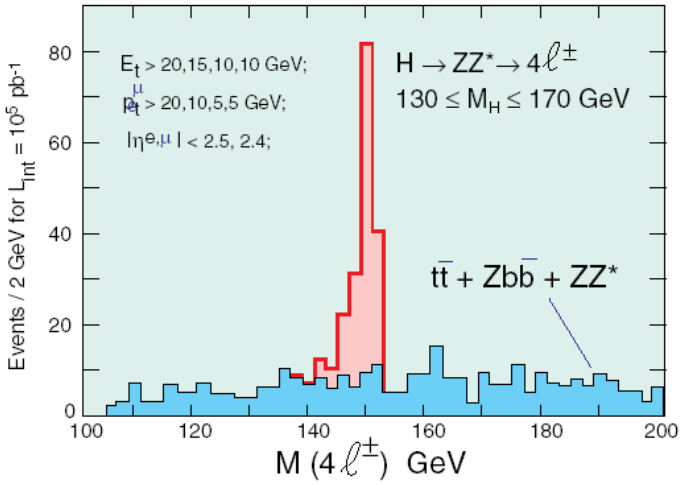
L'evento e' complesso perche' lo stato iniziale e' complesso: il protone e' una particella composta da particelle elementari che interagiscono tra loro. Nello stato finale avremo centinaia di particelle prodotte + (forse!) quella di interesse.

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 traccie 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<<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 ϕ 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 produrra' delle particelle con un p_T dell'ordine di M/2

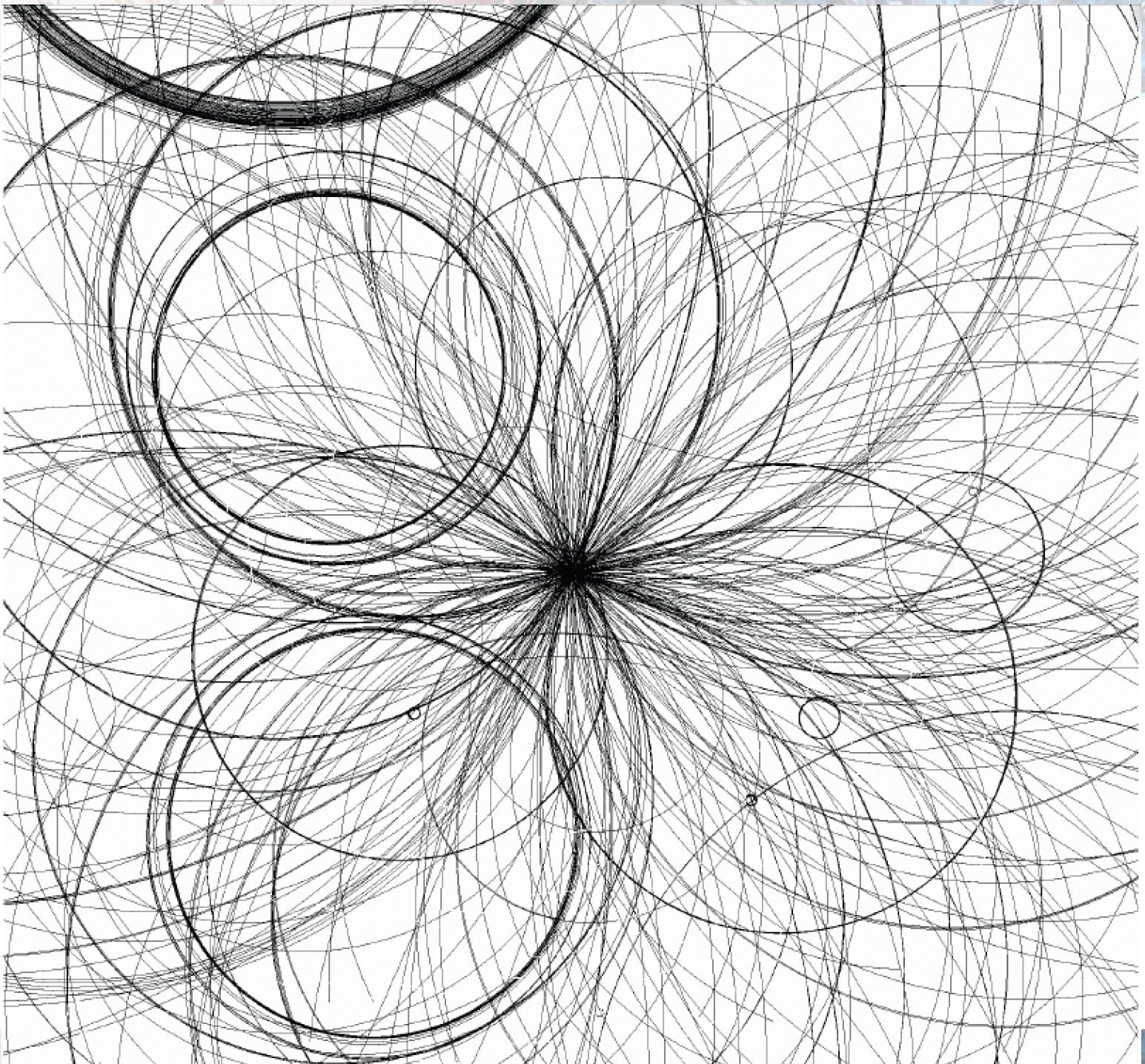
M(Z) = 90 GeV, M(W) = 80 GeV, M(H) = 125 GeV

Esercizio

18 collisioni pp sovrapposte a

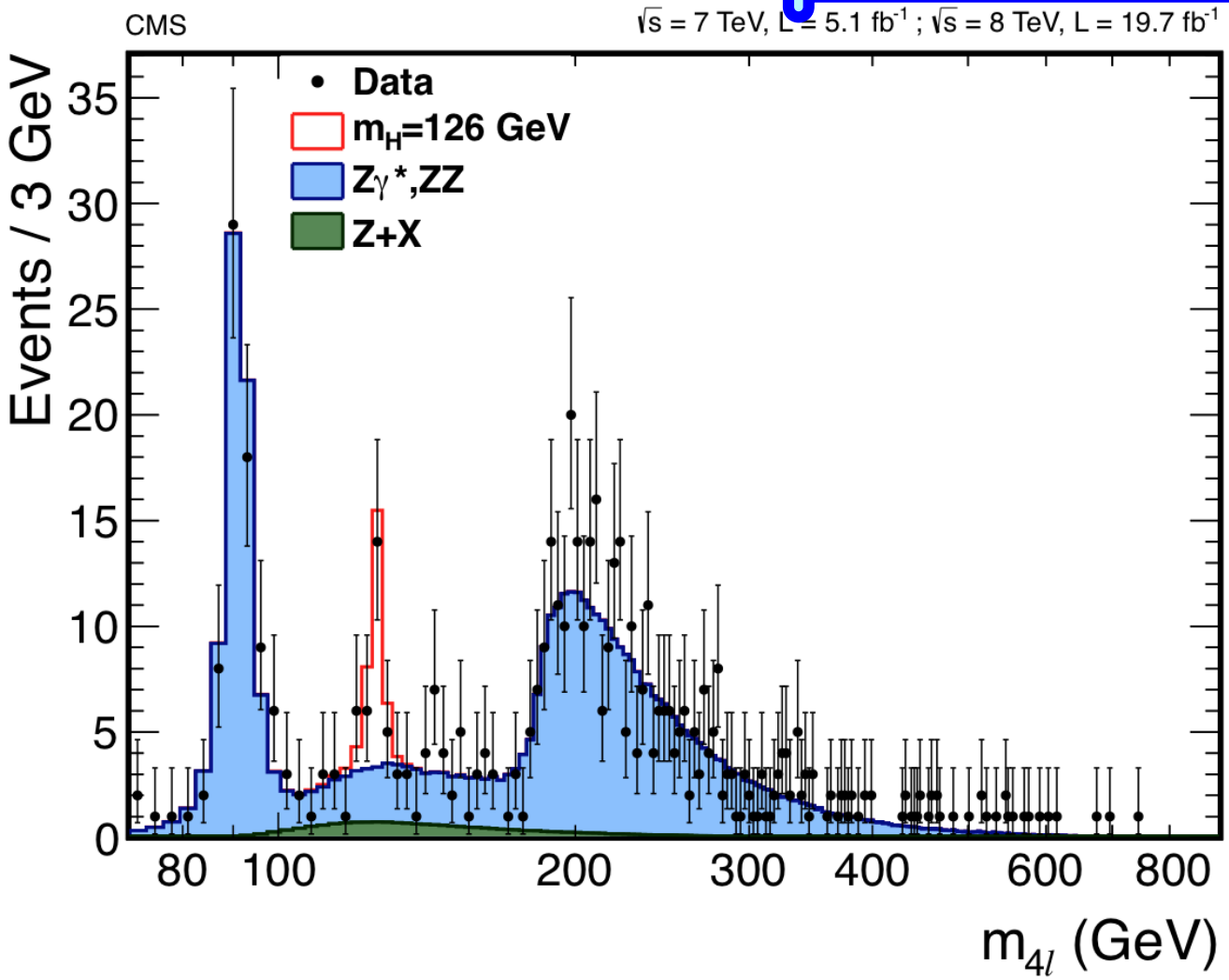
H → 4 muoni

Trova 4 traccie dritte



La scoperta dell'Higgs

THE NOBEL PLOT



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

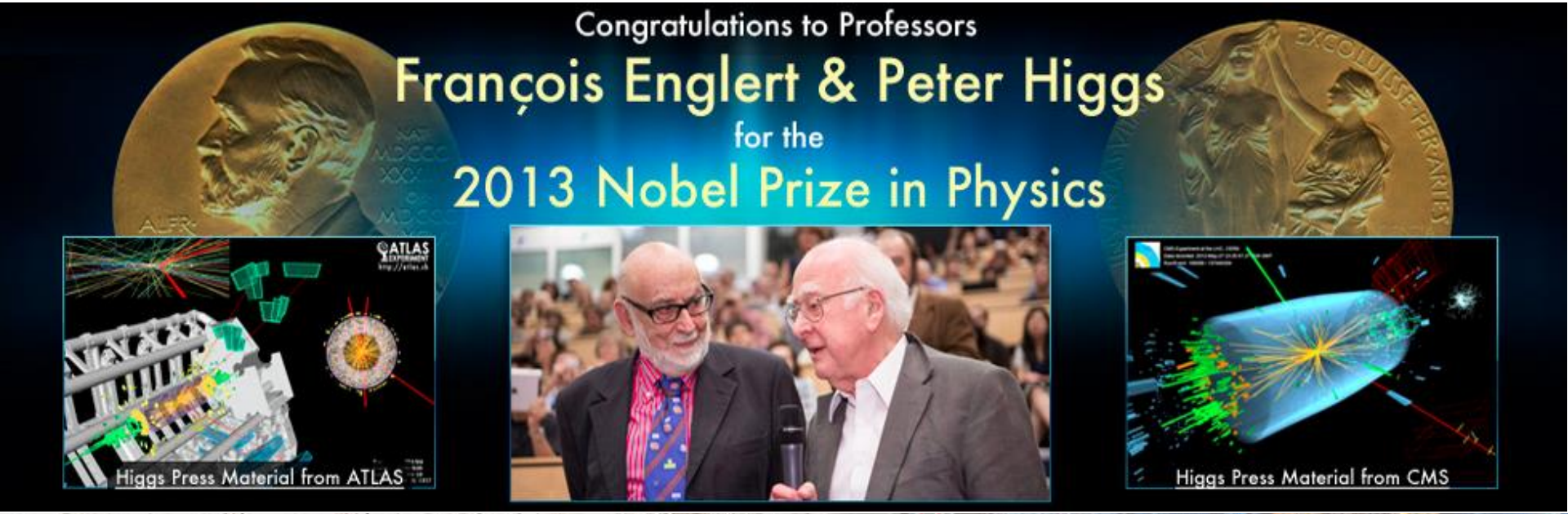
The Nobel Prize in Physics 2013

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"



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").

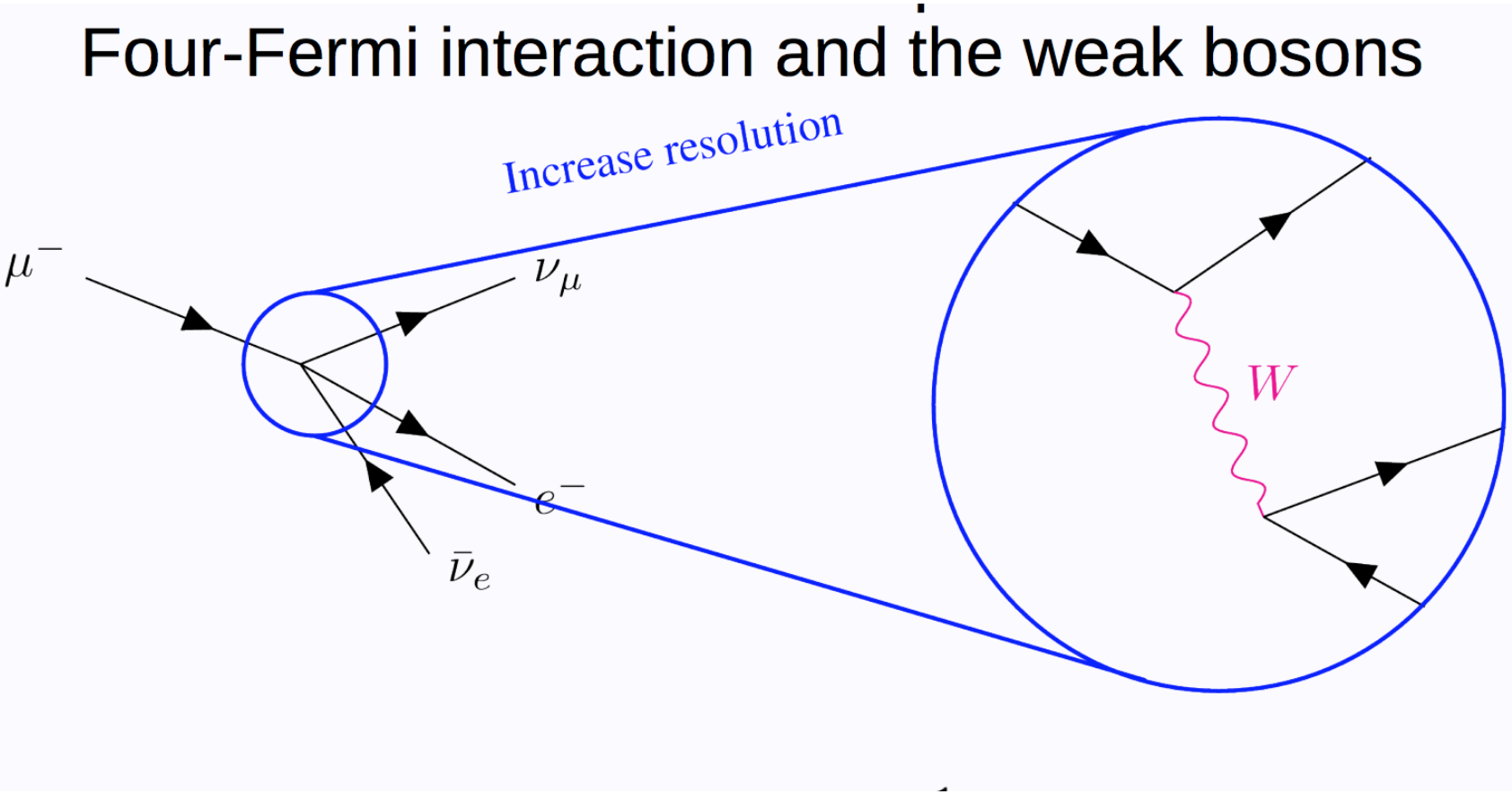
Misure di precisione

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.

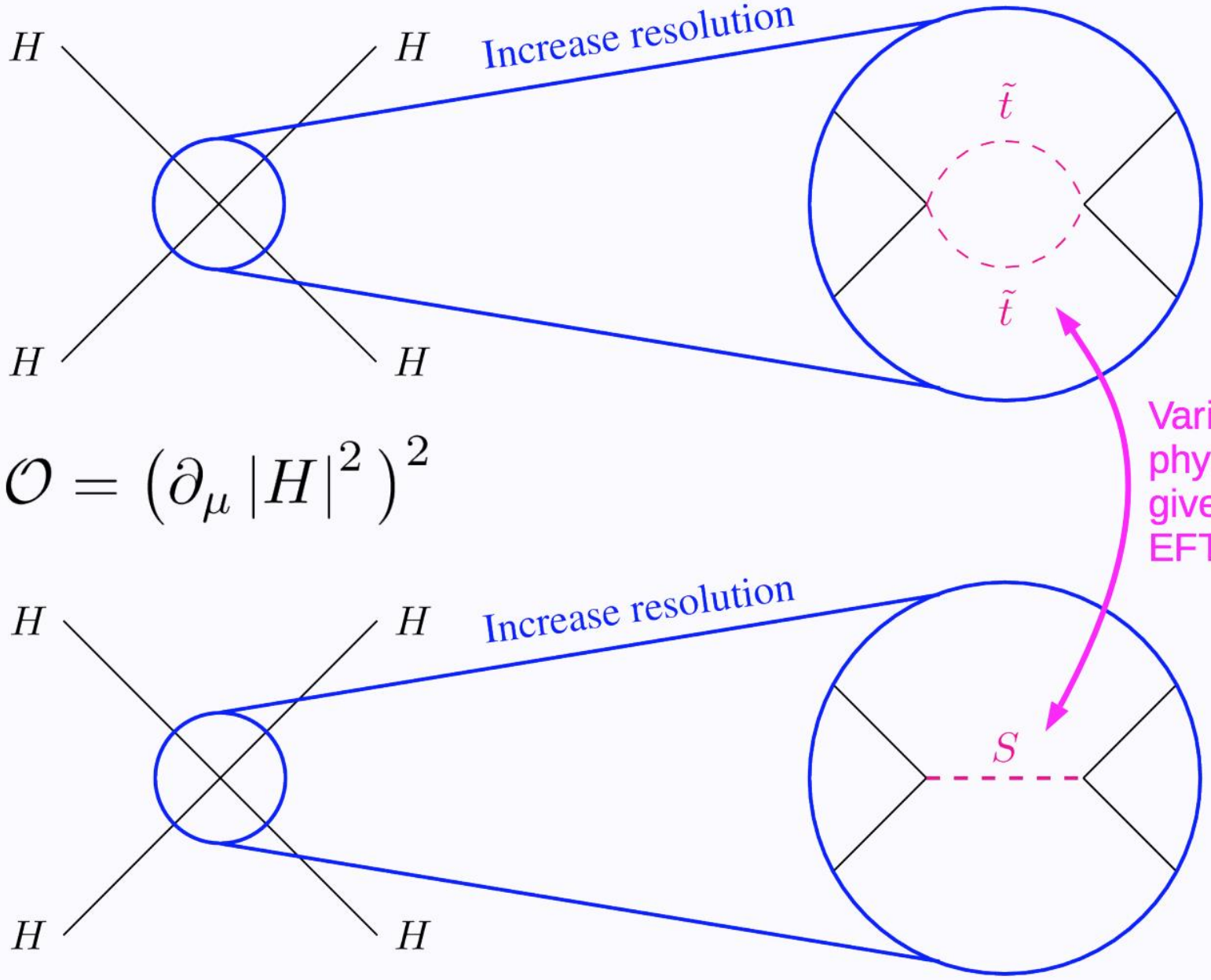
A LHC nonostante il collider sia adronico, sara' possibile arrivare a misurare al "percento" molte delle caratteristiche dell'Higgs.

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

Aumentare la precisione

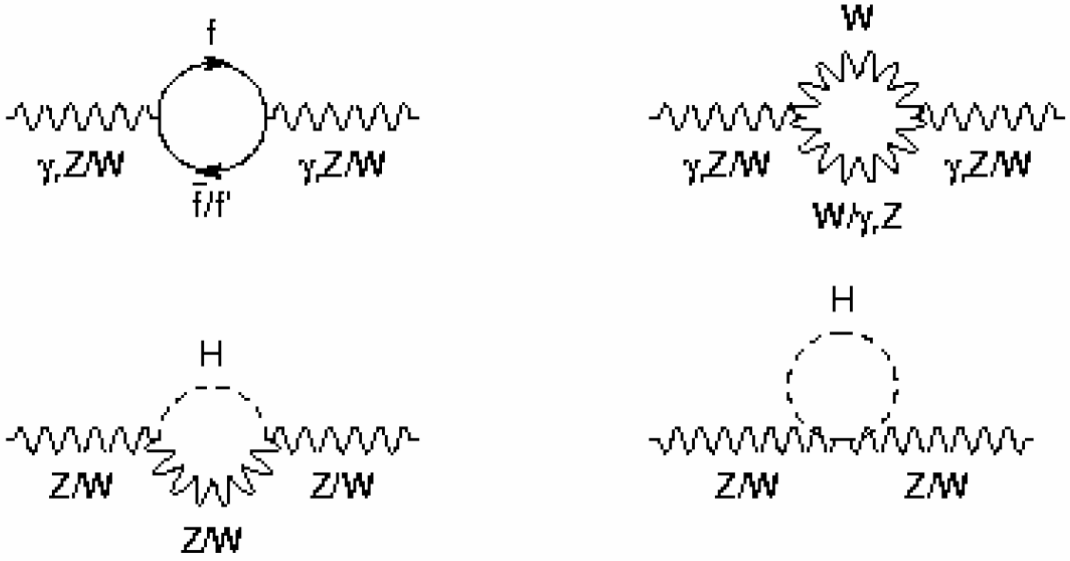


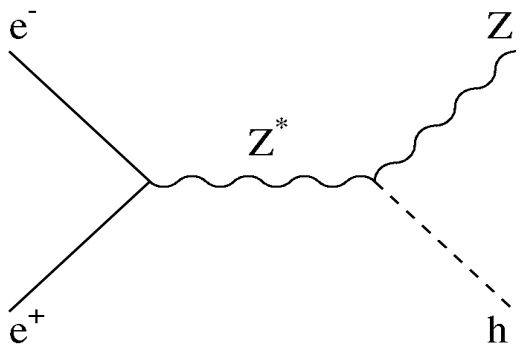
Aumentare la precisione



Loop

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





Ricerca diretta

Ricerca indiretta via misure di precisione

Ricerca nuovi Higgs

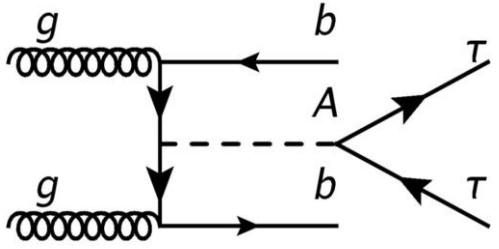
Nelle teorie supersimmetriche o nelle estensioni del Modello Standard, si postula l'esistenza di altri Higgs.

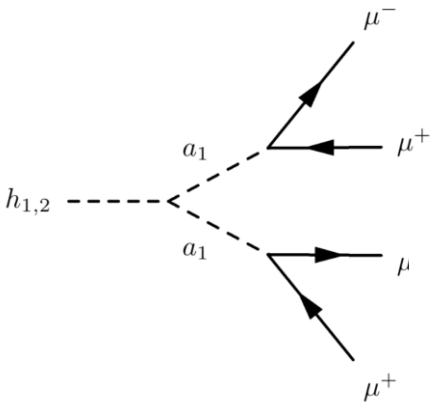
A LHC li stiamo cercando e li continueremo a cercare!

Li potremmo vedere il molte topologie diverse:

2HDM (or MSSM)

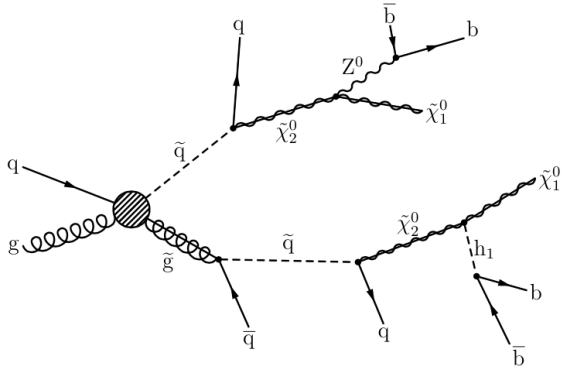
h, H, A, H+, H-

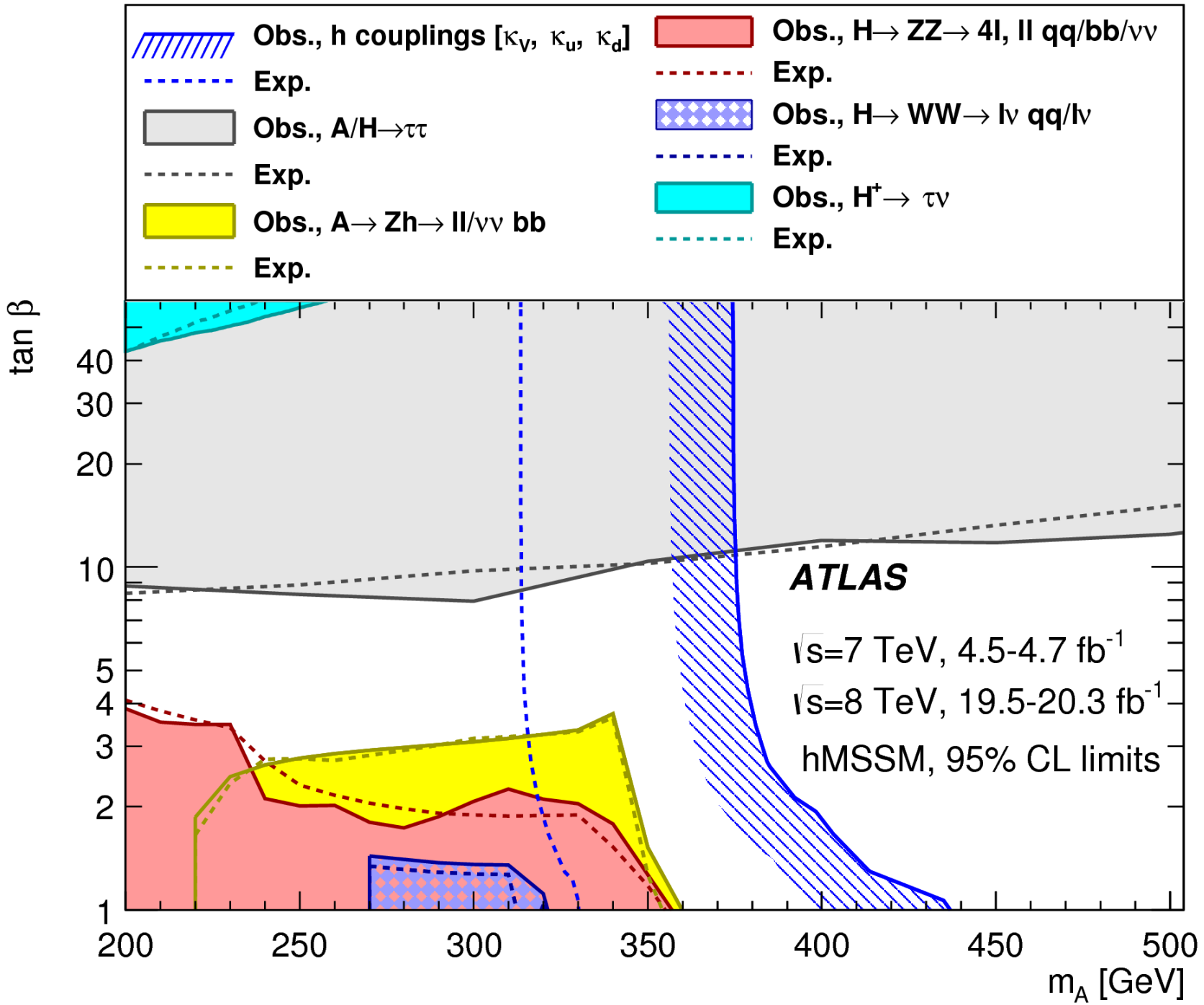




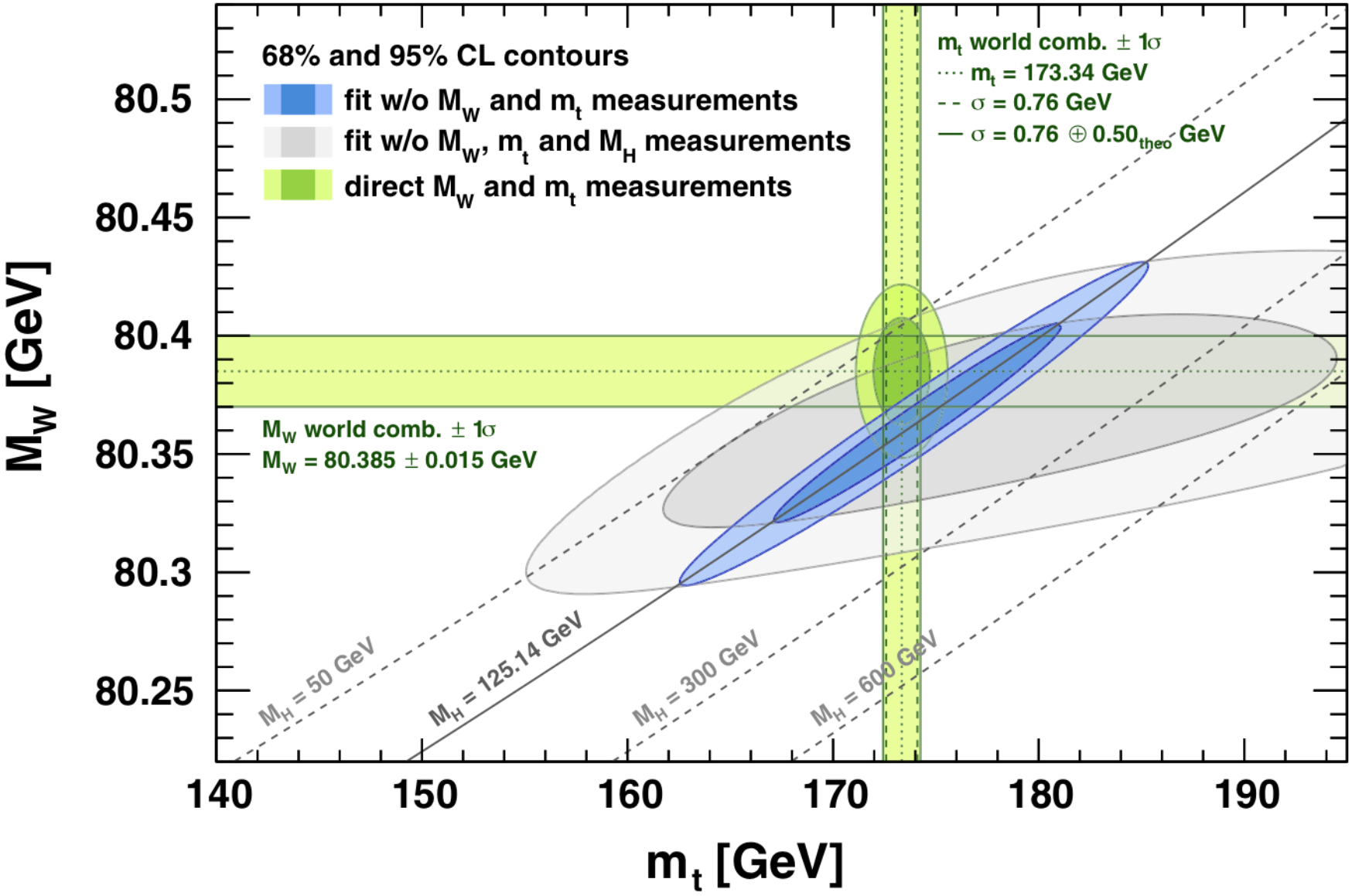
NMSSM

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

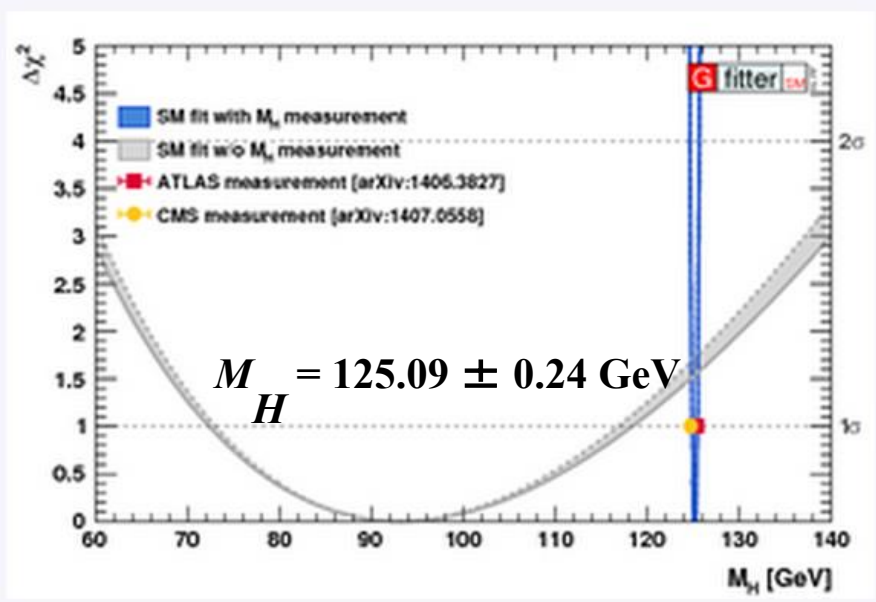


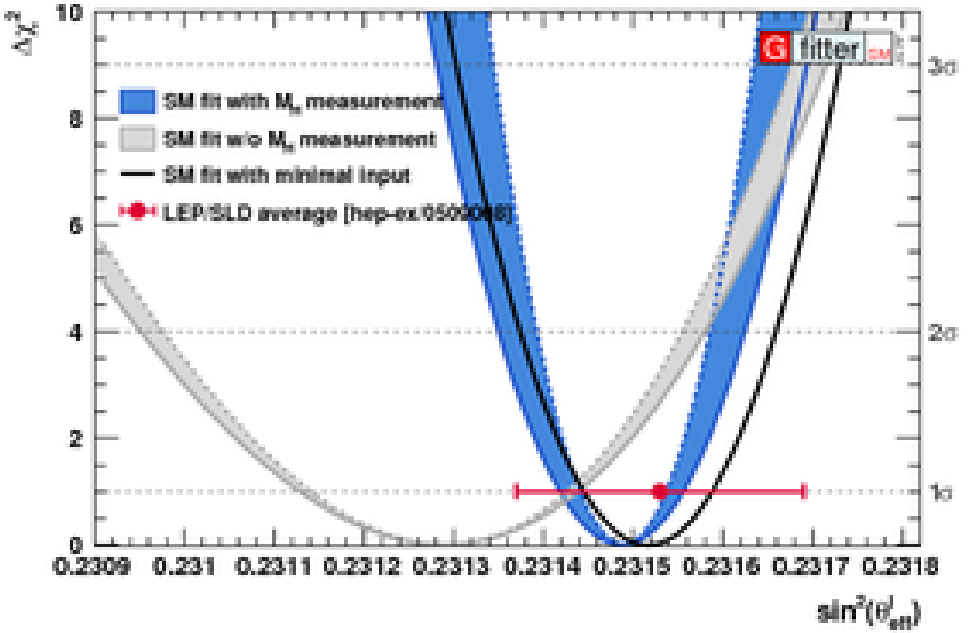

Obs., h couplings [κ_V, κ_u, κ_d]
Exp.
Obs., A/H→ττ
Exp.
Obs., A→ Zh→ ll/νν bb
Exp.
Obs., H→ ZZ→ 4l, ll qq/bb/νν
Exp.
Obs., H→ WW→ lν qq/lν
Exp.
Obs., H+→ τν
Exp.
tan β
40
30
20
10
5
4
3
2
1
200
250
300
350
400
450
500
m_A [GeV]
ATLAS
√s=7 TeV, 4.5-4.7 fb-1
√s=8 TeV, 19.5-20.3 fb-1
hMSSM, 95% CL limits

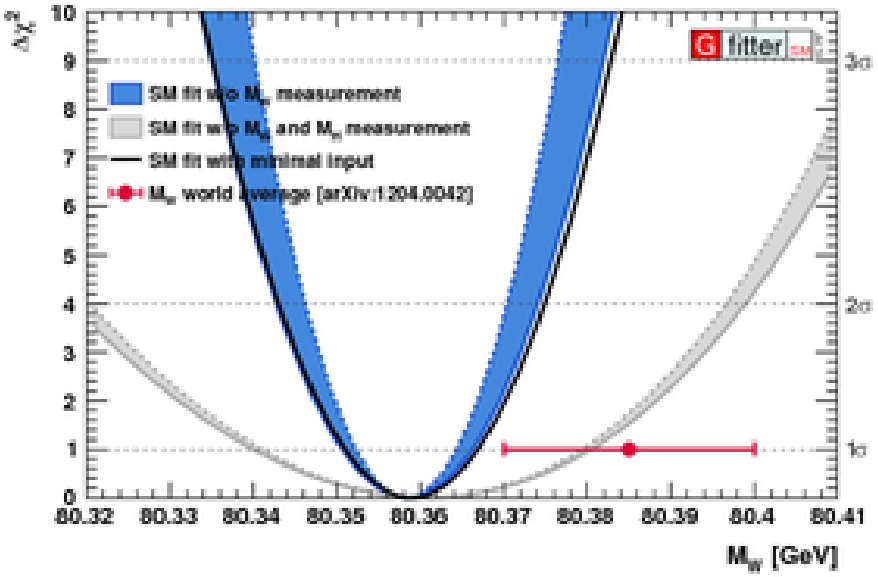
Tutto deve essere consistente

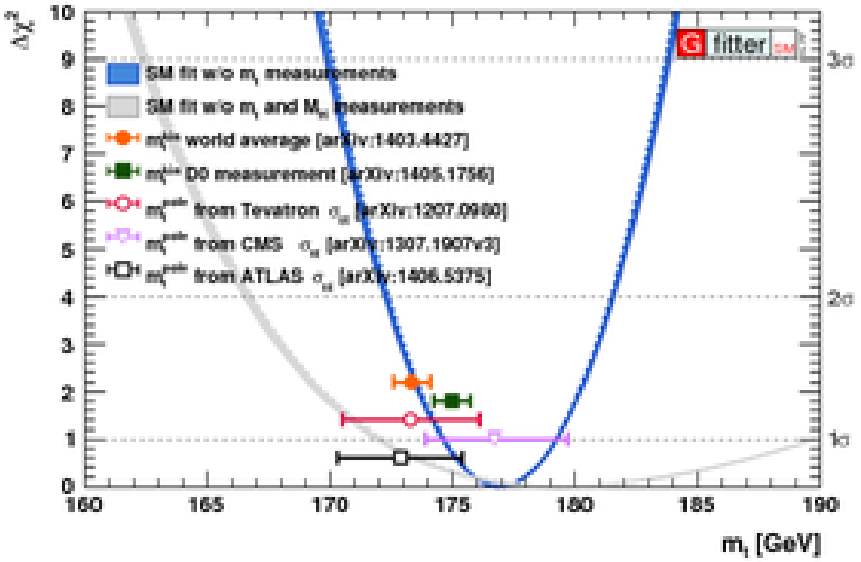


Misure dirette e indirette









Sappiamo molto poco e vorremmo saperne di più:

Proseguiamo per 2 strade

- **cercando cose nuove**

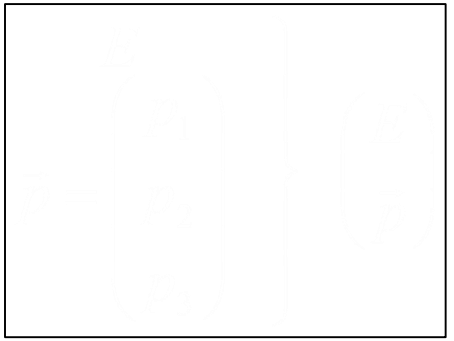
- **capendo a fondo quelle che abbiamo già trovato**

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:

$$\bar{p} = m\bar{v} \qquad E = mc^2$$



Quando lavoriamo con oggetti relativistici

la massa a cui ci riferiamo e' quella a riposo

i.e. l'energia a $v \to 0$ 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 posso avere m=0 e allo stesso tempo E ≠ 0 e p≠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 e' associata ad un campo e viceversa.

Il fotone e' la particella (messaggero o "particella forza") associata alla radiazione elettromagnetica. E' senza massa per definizione: la radiazione elettromagnetica viaggia nello spazio alla velocita' della luce.

Si capisce bene il perche' del valore della sua massa.

Il potenziale elettrostatico ha range infinito: la propagazione delle onde elettromagnetiche e' 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 $\rightarrow$ 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 e' che la propagazione del campo elettrico e magnetico (ovvero del fotone) interagisce con il mezzo. L'effetto risultante e' il "rallentamento" dell'onda che si propaga che e' 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 e' si': possiamo introdurre un campo tale che:

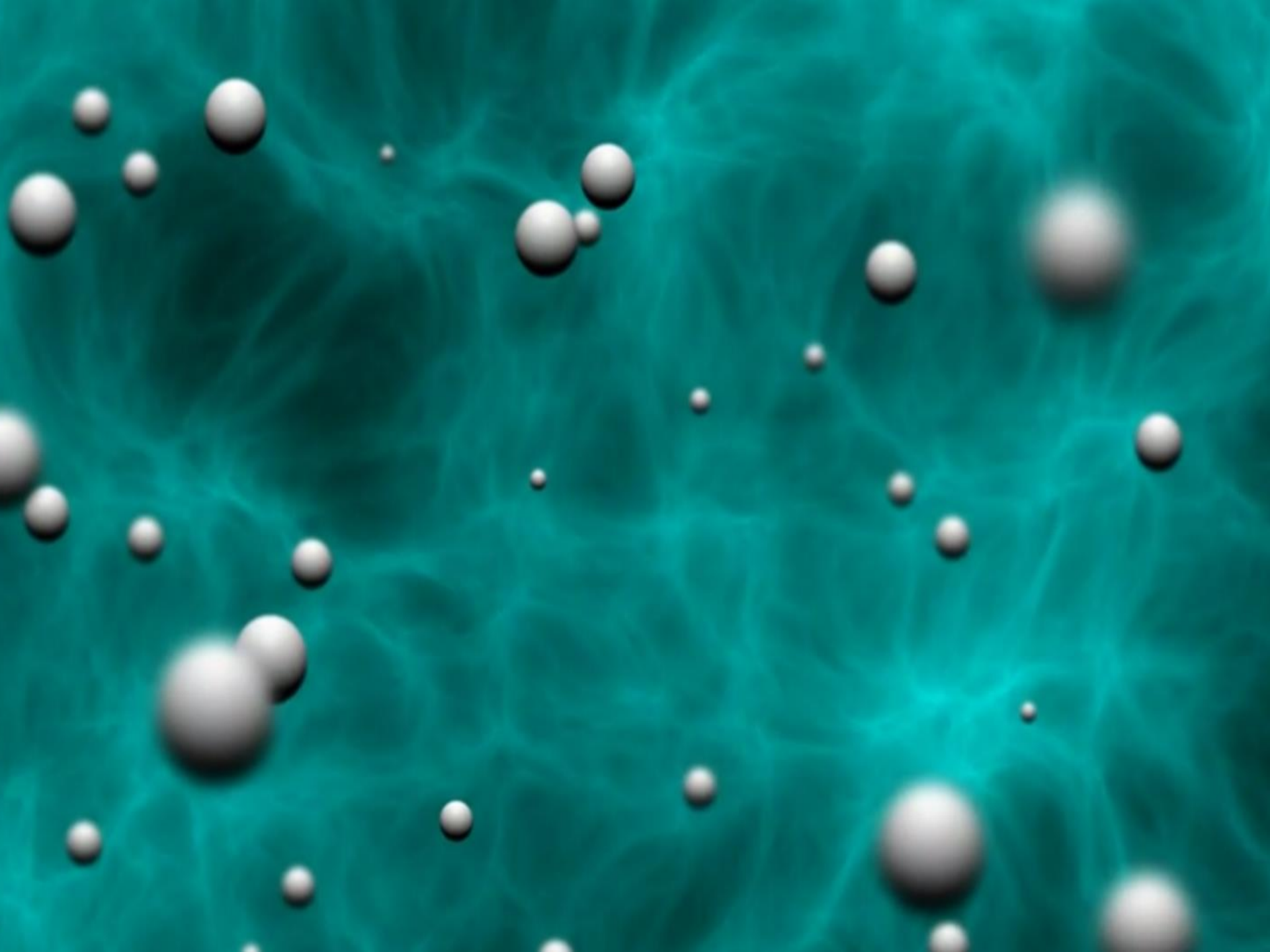
1. non abbia valore nullo quando "non accade nulla"
   (ovvero lo stato di minima energia /stato fondamentale non sia nullo)

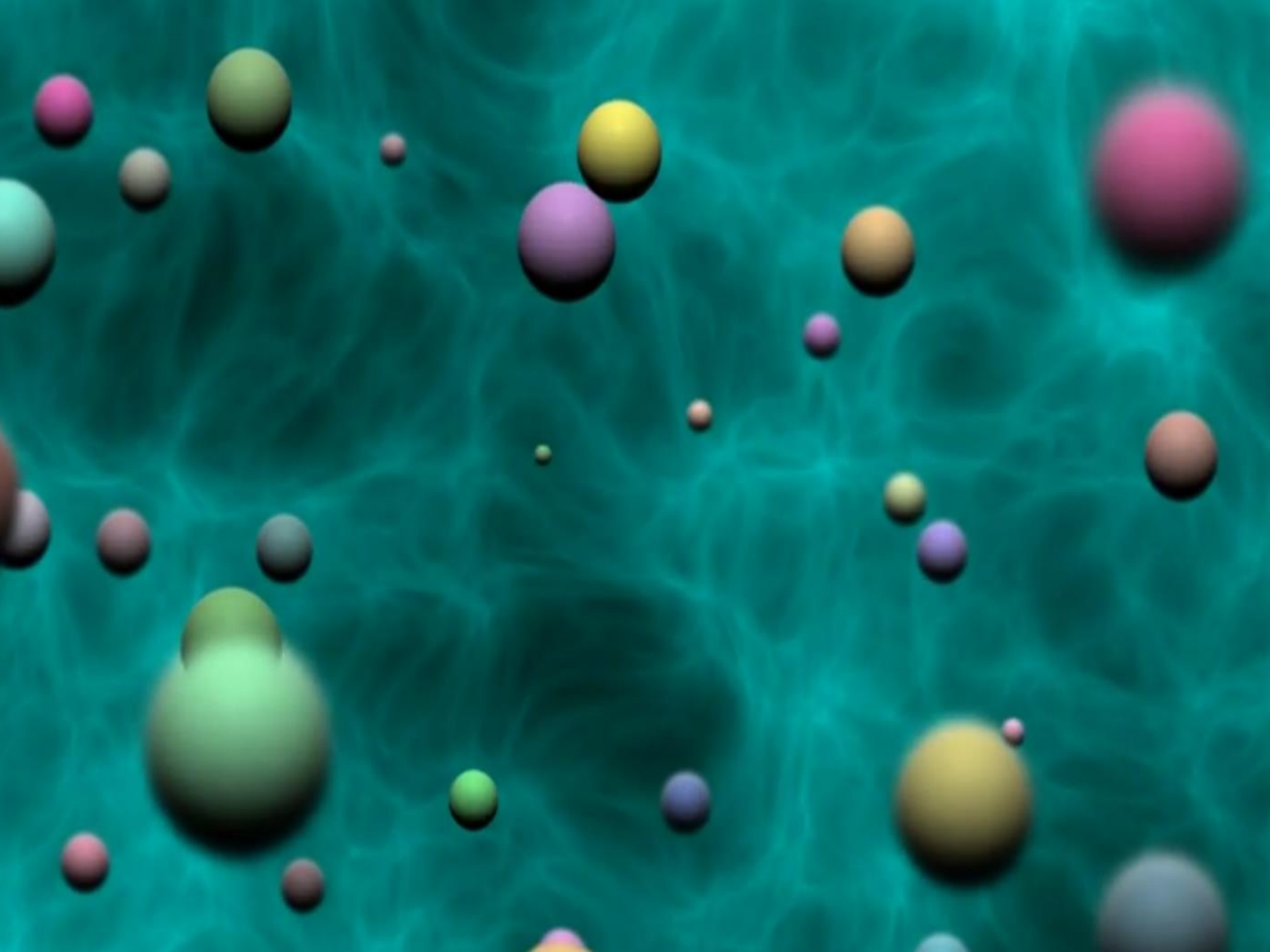
2. che non violi i principi di base della invarianza relativistica

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 e' presente, acquistano una massa effettiva**

Il punto 1 e' quello che chiamiamo "rottura spontanea di simmetria": lo stato fondamentale **non** corrisponde ad una configurazione totalmente simmetrica

10^{-10} SECONDS
AFTER BIG BANG

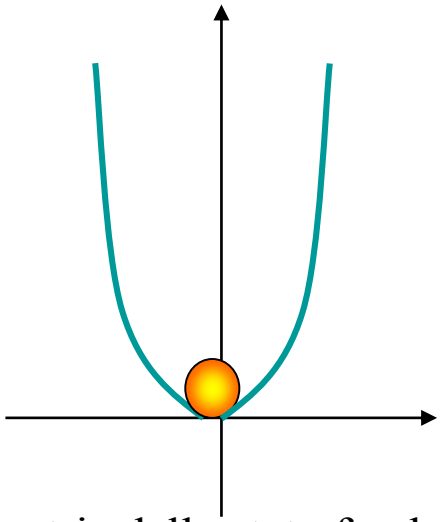




Rottura spontanea di simmetria

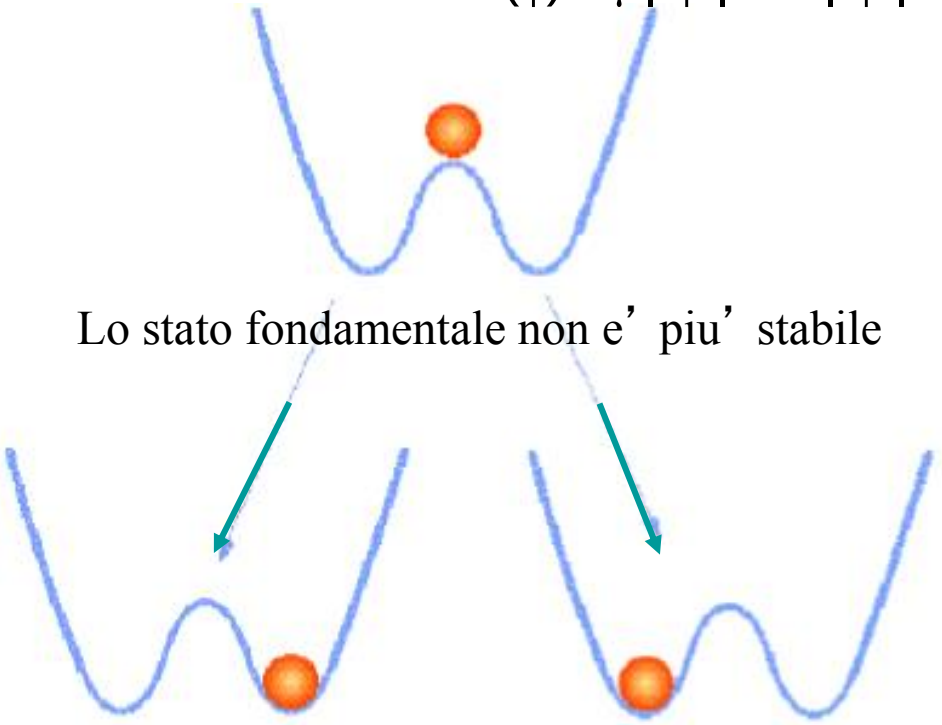
Graficamente possiamo illustrarlo cosi:

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



Simmetria dello stato fondamentale

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



Lo stato fondamentale non e' piu' stabile

Per andare nello stato stabile, deve scegliere destra o sinistra. La scelta rompe la simmetria in modo "spontaneo"! Lo stato stabile non e' piu' 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" perche' interagisci con un mezzo che e' tutto attorno a te.

Il campo di Higgs e' 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

Il campo di Higgs

"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