

Pagina web con molto materiale:

www.to.infn.it/~mariotti/particelle2.html

Le lezioni del “primo ciclo”

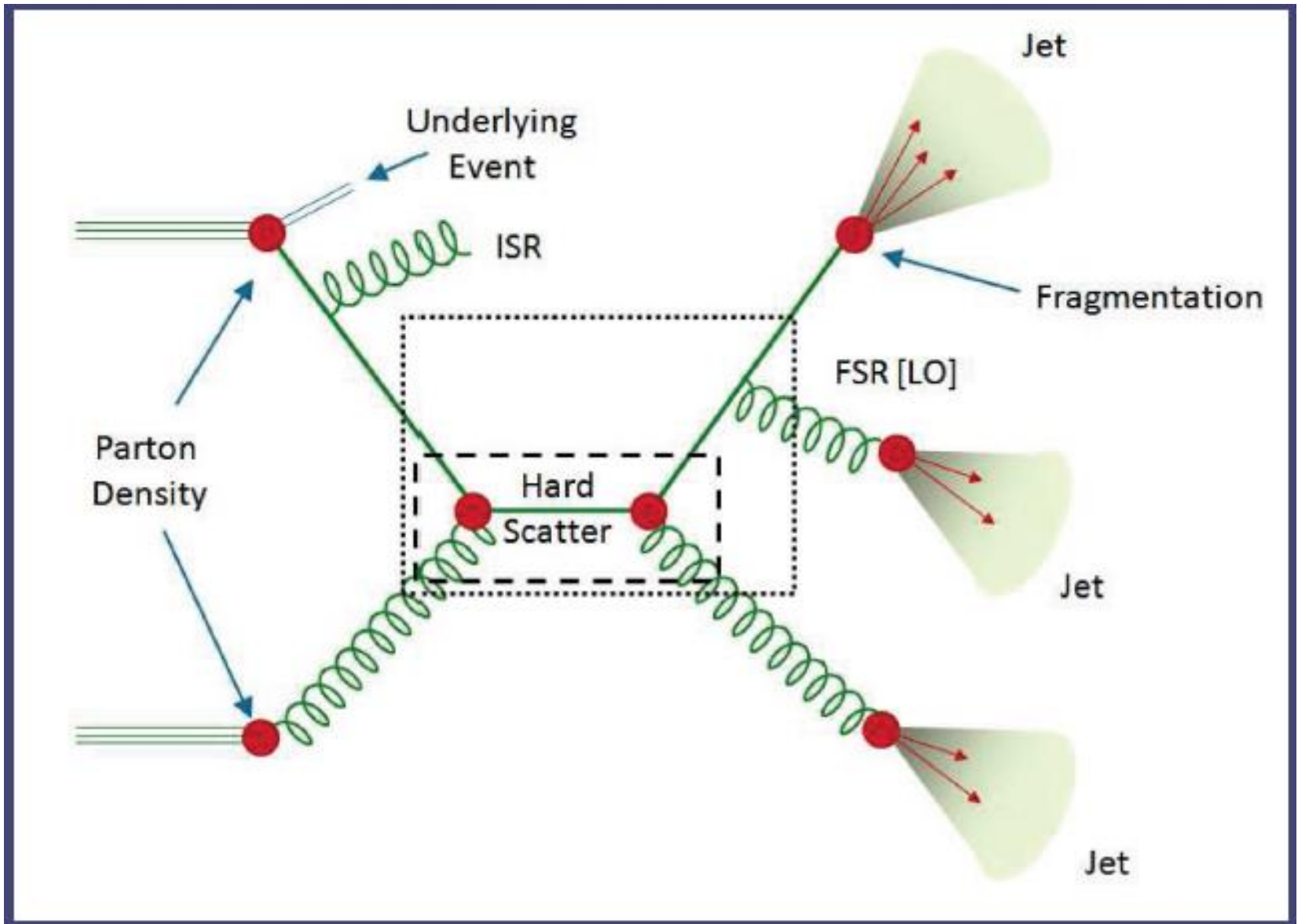
https://www.dropbox.com/s/t8zwjv60hhkrtnz/lezioni_cern_settembre2014_1.pptx?dl=0

https://www.dropbox.com/s/2123cyzs1d63qw4/lezioni_cern_settembre2014_2.pptx?dl=0

https://www.dropbox.com/s/08q8us2ha2mkndo/lezioni_cern_settembre2014_3.pptx?dl=0

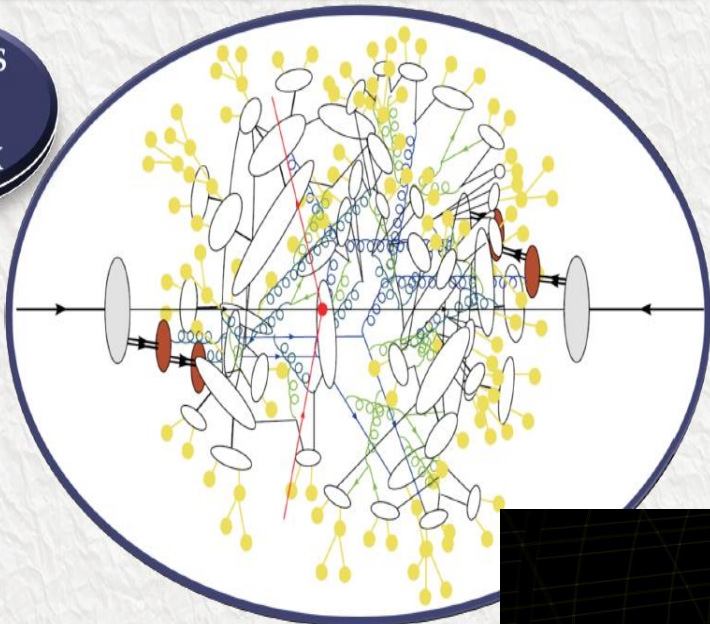
“Secondo ciclo”:

https://www.dropbox.com/s/aeac886lkhh18y7/lezioni_2ciclo_cern_settembre2015.pptx?dl=0

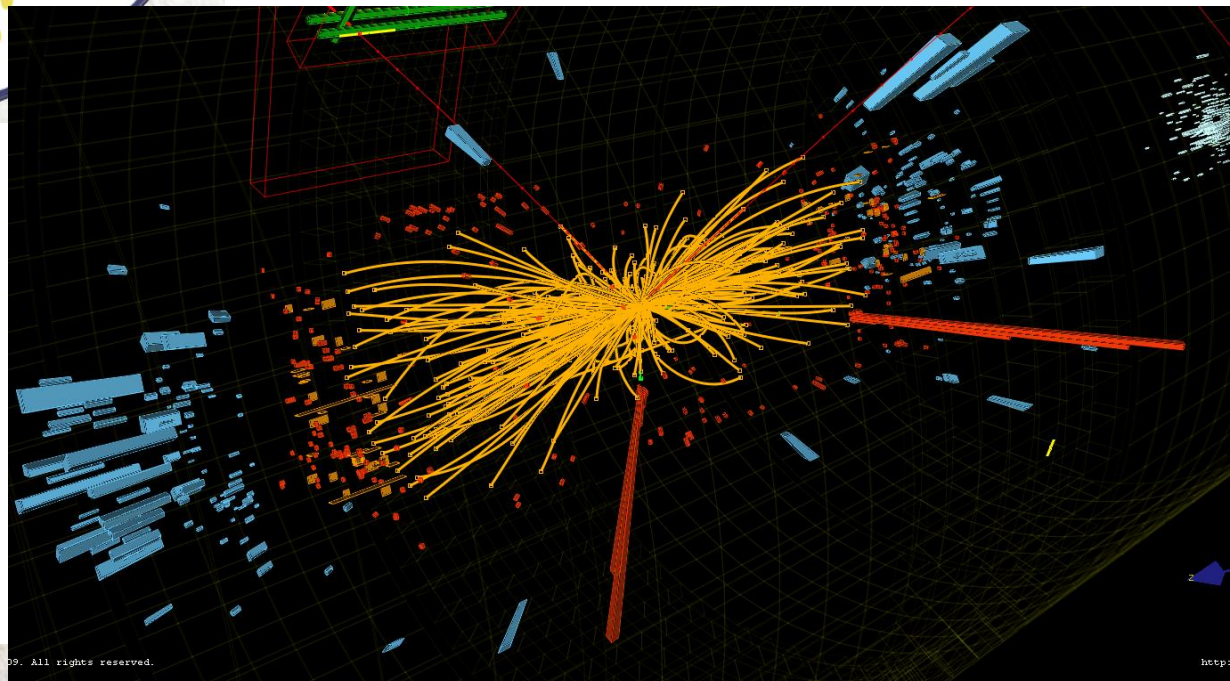


La realta' e piu' complessa

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

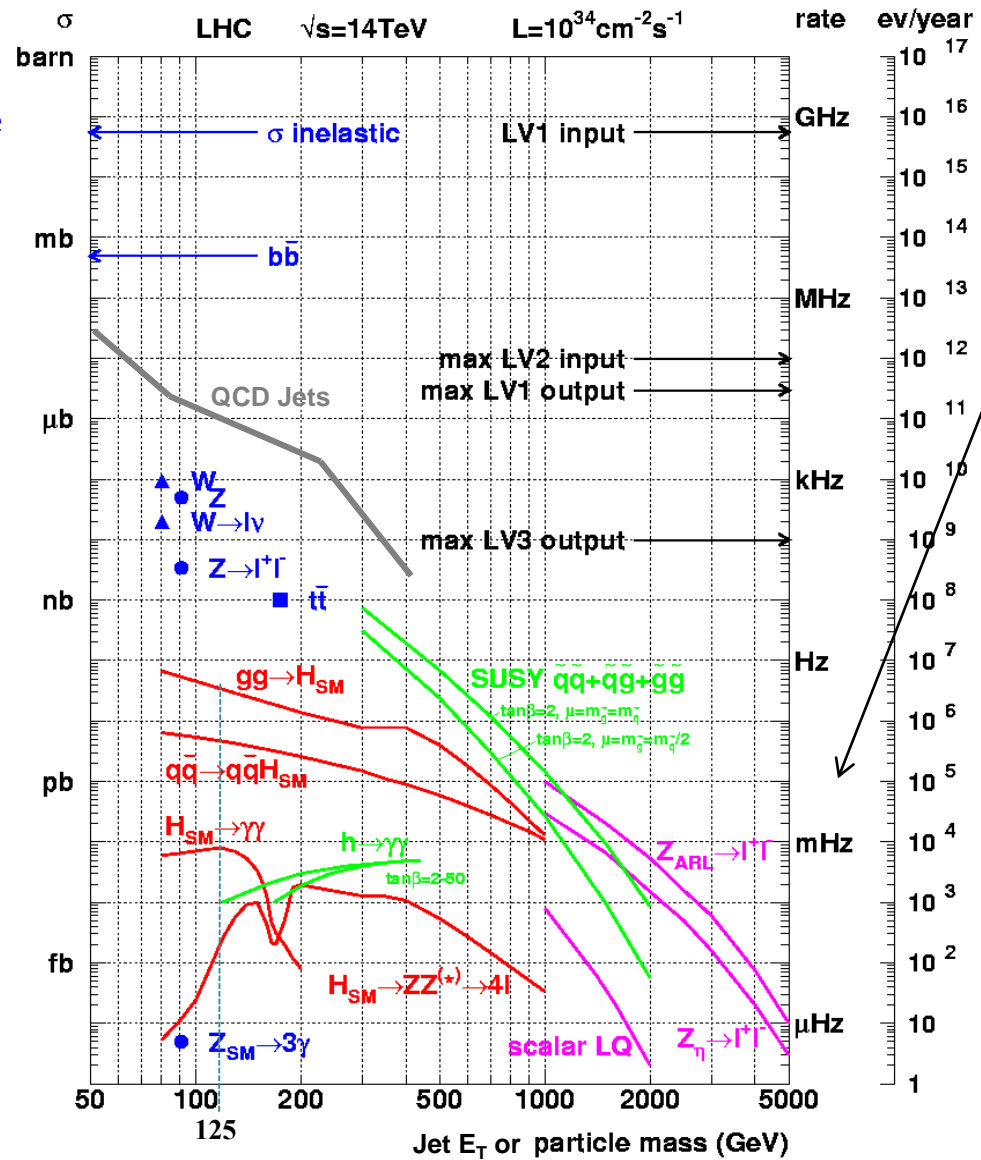
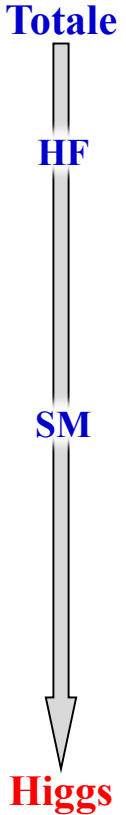


Sezioni d'urto

Sezioni d'urto σ (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

bb	10^5	eventi/sec
tt	0.8	
$W \rightarrow e\nu$	15	
$Z \rightarrow ee$	1.5	
H	0.001	

Trigger

Nel run a 8 TeV si aveva una interazione ogni 50ns
→ 20 Mega Hertz

Si possono trasferire al centro di calcolo e registrare su disco intorno a ~ 300 Hertz

si puo' tenere ~ 1 evento su 10000 !

Il "trigger" ci permette di fare questa selezione:

Il trigger analizza (parte del)l'evento, e decide se e' interessante o meno.

p.ex: selezione basata sul p_T dei leptoni

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 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 $M/2$

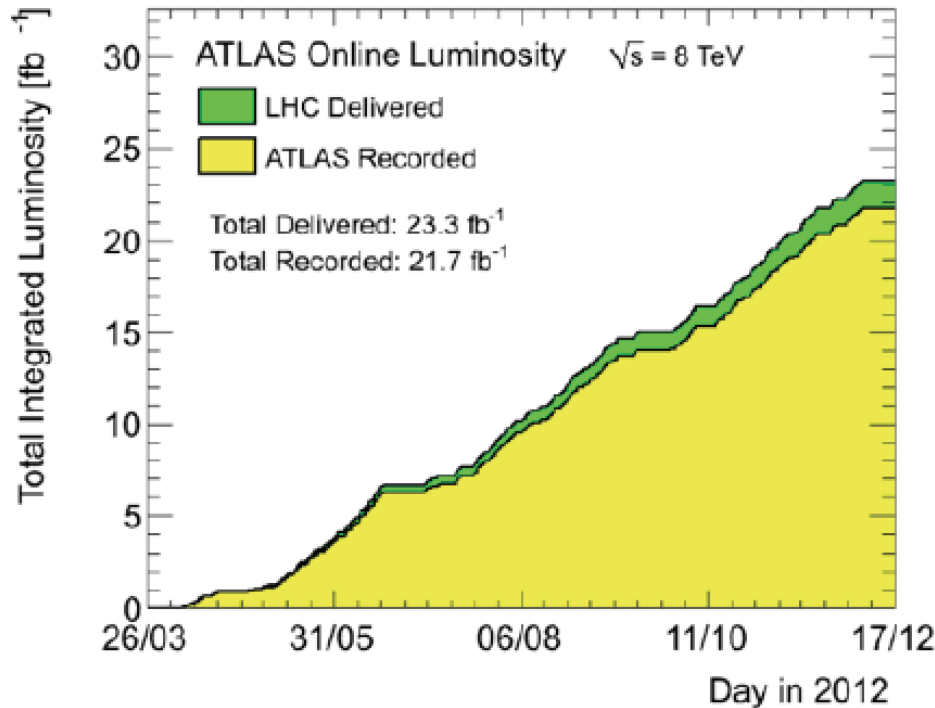
$$M(Z) = 90 \text{ GeV}, M(W) = 80 \text{ GeV}, M(H) = 125 \text{ GeV}$$

4 luglio 2012

Annuncio della prima scoperta degli
esperimenti Atlas e CMS:

Una nuova particella di ~ 125 GeV di massa

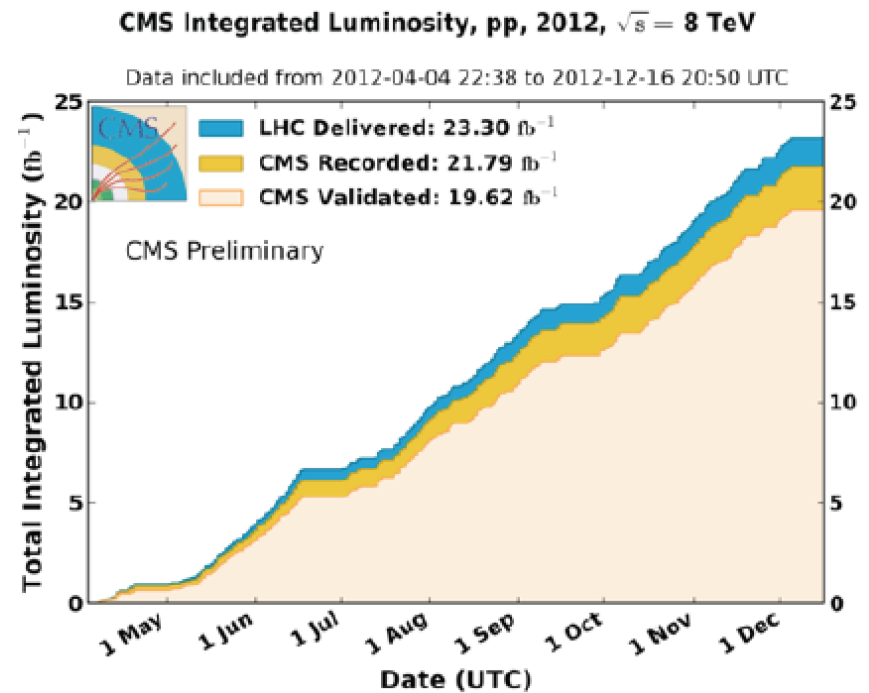
LHC in 2010-2011-2012



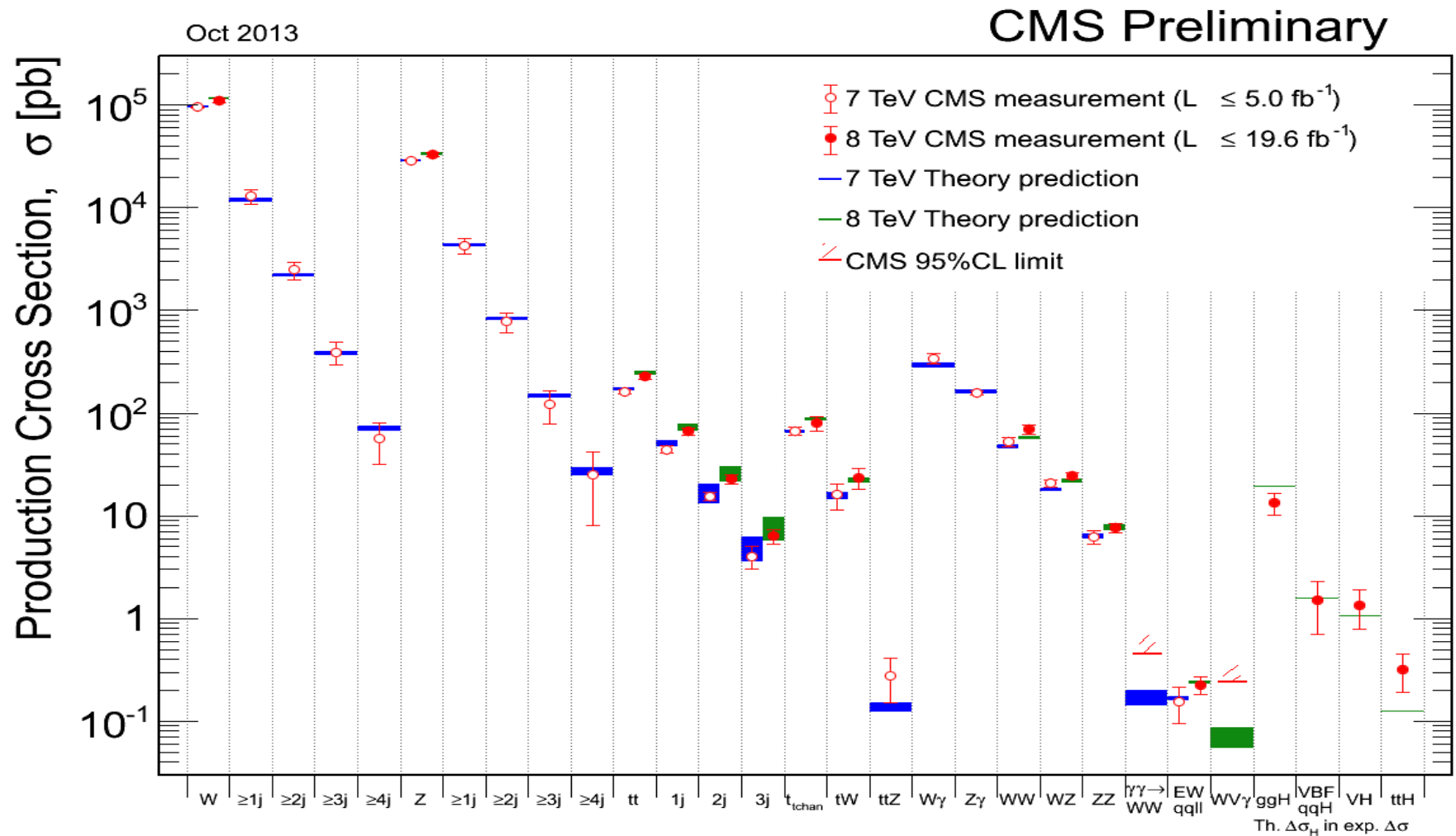
Peak Lumi 7×10^{33}
Run can last up 24 hours

L = 0.07 fb^{-1} in 2010 @ 7 TeV
L = 5.6 fb^{-1} in 2011 @ 7 TeV
L = 23.3 fb^{-1} in 2012 @ 8 TeV

Simply magnificent !!!



Precise SM measurements



Good understanding of the detector + accurate theory predictions

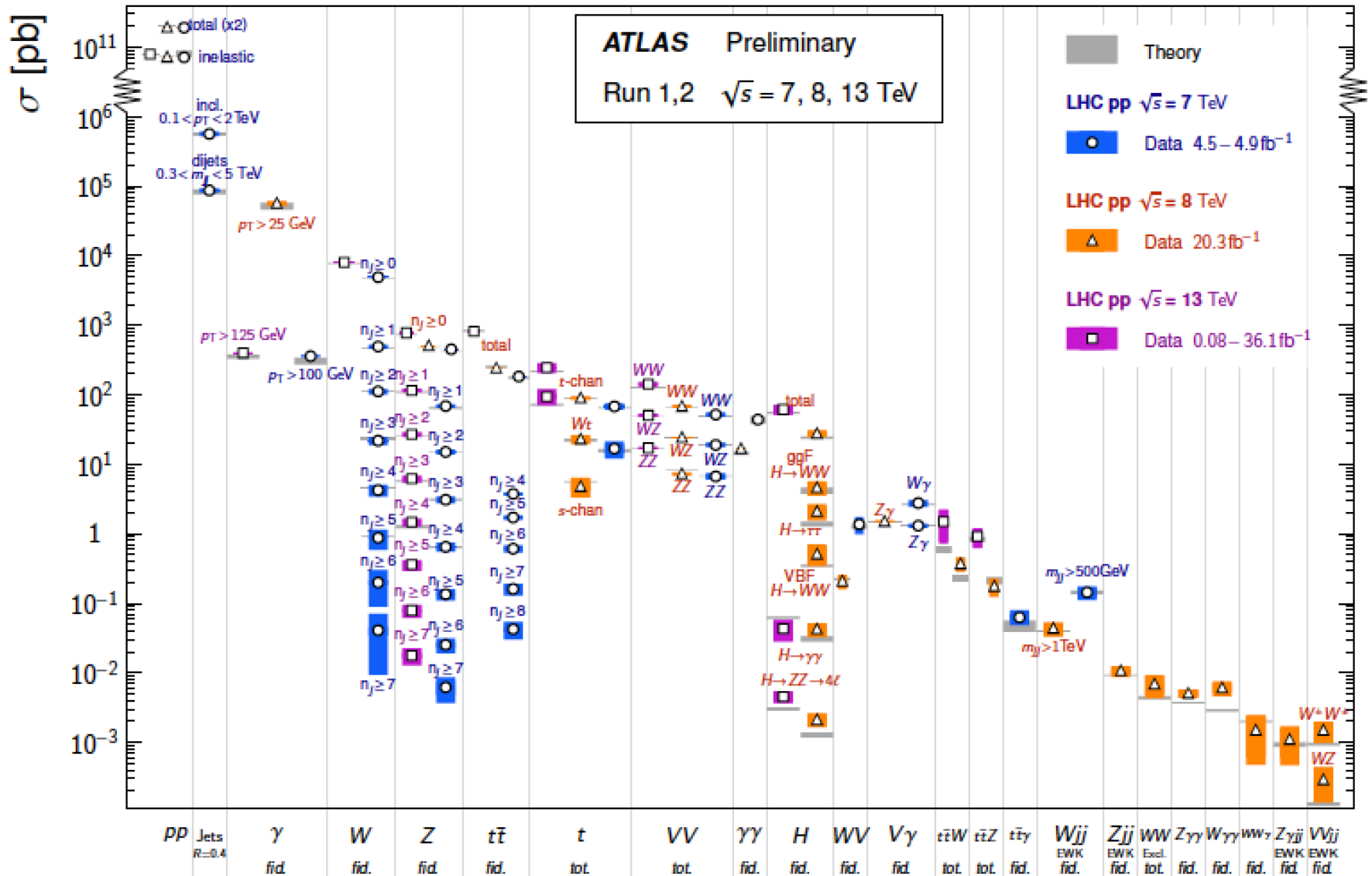
→ Precise measurements of the SM processes over many orders of magnitude

→ Good knowledge of the background to Higgs analyses

Precise SM measurements

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: May 2017



Verso l'Higgs

Misuriamo con alta precisione tutti i processi note del modello standard su parecchi ordini di grandezza.

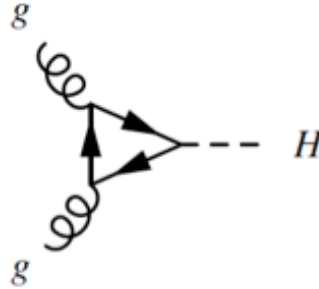
Questo significa che stiamo capendo bene la risposta del nostro rivelatore

E che la simulazione riproduce correttamente i nostri dati.

Possiamo dunque cercare processi e particelle nuove, mai visti fino ad ora

La ricerca dell'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

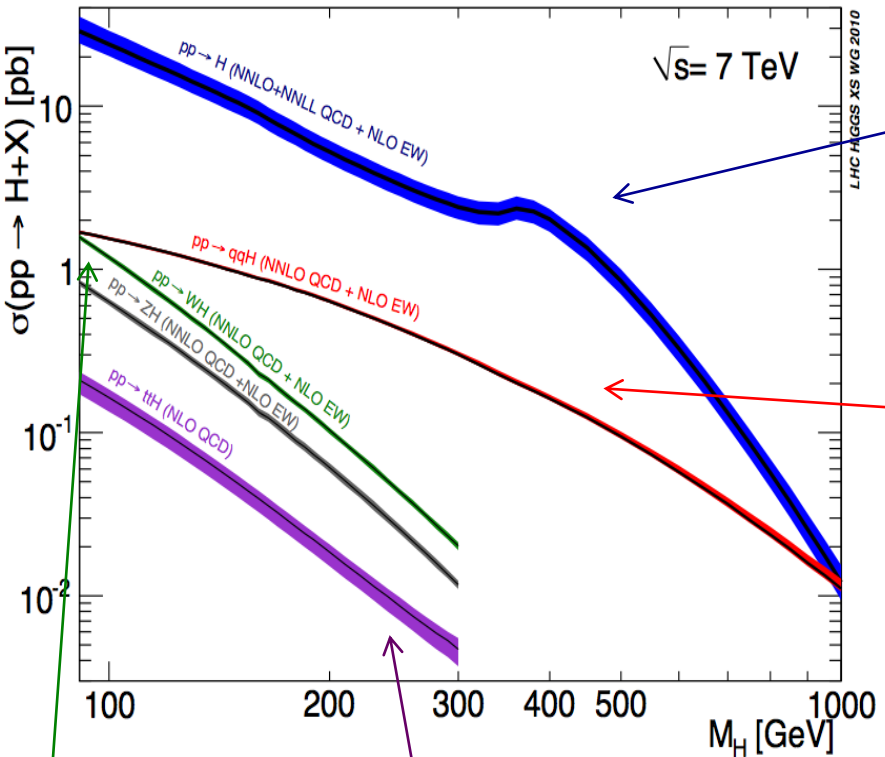
Gli "stati finali" sono molteplici; i piu' importanti sono:

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

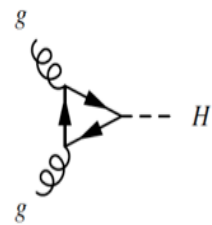


Higgs production at LHC

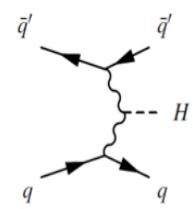
The LHC Higgs Cross Section WG YR1, YR2, YR3



ggF: NNLO+NNLL QCD + NLO EW

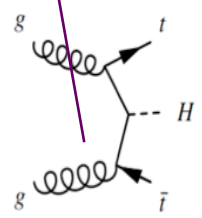
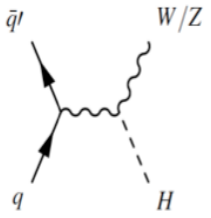


qqH: NNLO QCD + NLO EW



WH: NNLO QCD + NLO EW

ZH: NNLO QCD + NLO EW



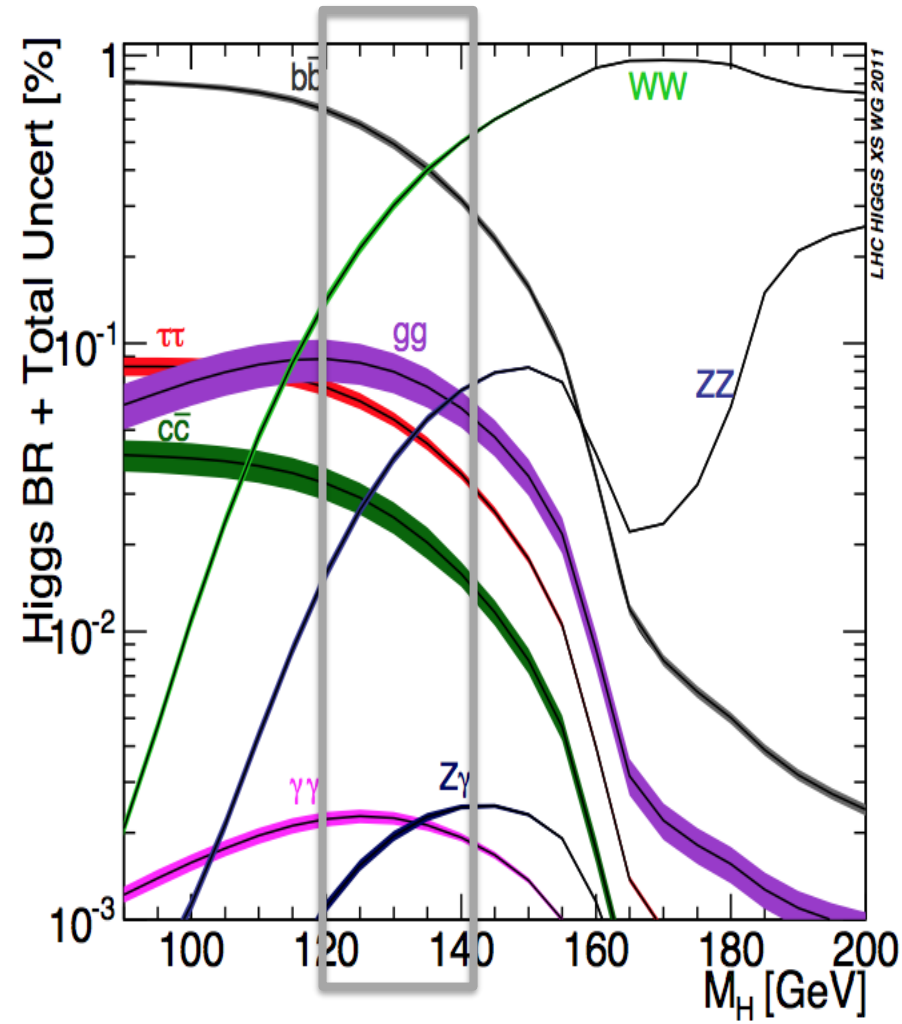
ttH: NLO QCD

	$K_{\text{NNLO/NLO}}$ ($K_{\text{NLO/LO}}$)	Scale	PDF+ a_s	Total error
ggF	+25% (+100%)	+12% - 7%	$\pm 8\%$	+20 - 15%
VBF	<1% (+5-10%)	$\pm 1\%$	$\pm 4\%$	$\pm 5\%$
WH/Z H	+2-6% (+30%)	$\pm 1\%$	$\pm 4\%$	$\pm 5\%$
ttH	- (+5-20%)	+4% - 10%	$\pm 8\%$	+12 - 18%

The channels at LHC

5 decay modes exploited

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



Improved treatment of the uncertainties on the BR, news from LHCHSWG

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($l=e, \mu$)

La probabilita' che $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ e' molto piccola,
l'Higgs decade in $4l$ sono il 10% circa delle volte.

Gli eventi sono molto "puliti":

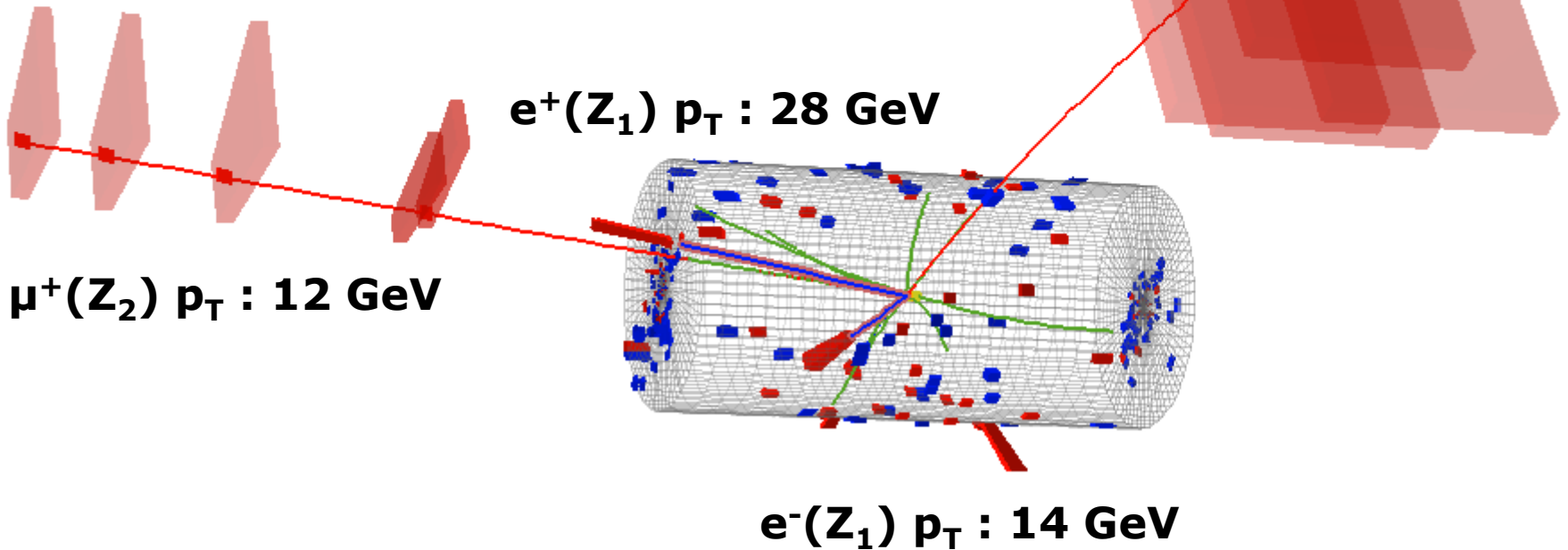
- 4 leptoni (elettroni o muoni)
con altissima efficienza di identificazione e
ricostruzione
- provenienti dal punto dell'interazione (l'Higgs
decade immediatamente)
- con alto valore del momento trasverso ($p_T \sim 45$ GeV)
- isolati



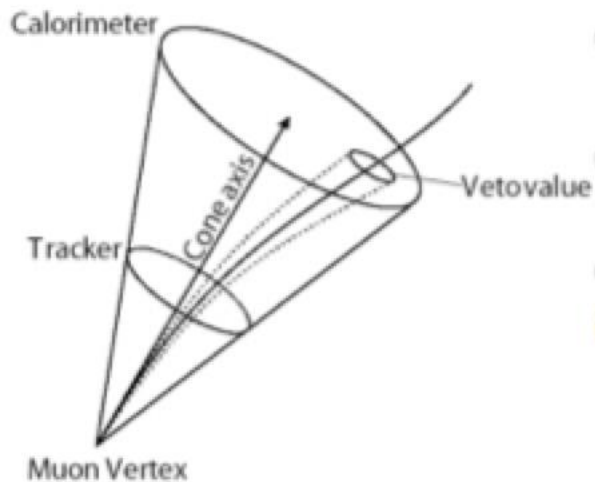
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Tue Oct 4 00:10:13 2011 CEST
Run/Event: 177782 / 72158025
Lumi section: 99

$\mu^-(Z_2) p_T : 15 \text{ GeV}$

4-lepton Mass : 125.8 GeV



Isolamento



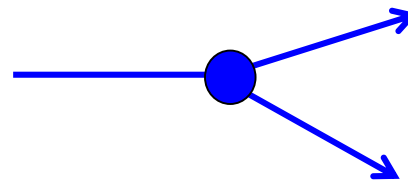
Il leptone (elettrone o muone) puo' essere prodotto isolato o dentro un jet.

Se proviene dal decadimento dell'H, della Z o W, sara' isolata

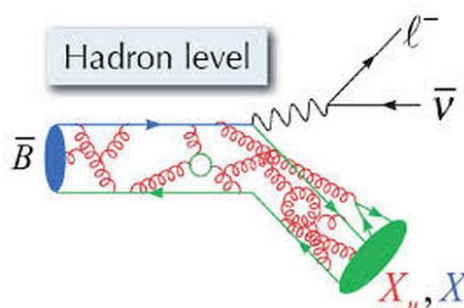
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$$

$$Z \rightarrow ll$$

$$W \rightarrow lv$$

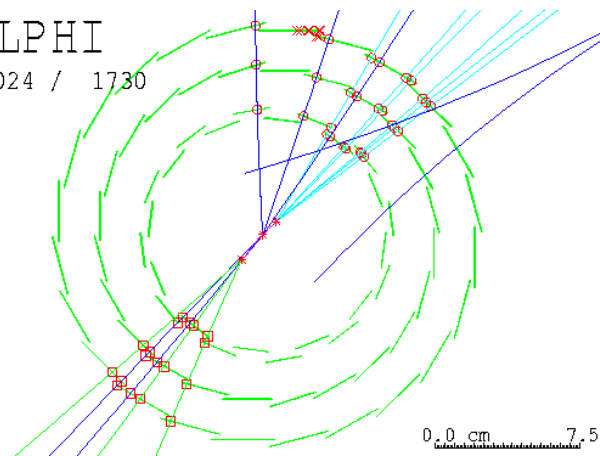


Se invece il leptone proviene dal decadimento di un adrone, per esempio B, sara' dentro un jet – fatto di particelle che vengono dalla "adronizzazione" dei quark del vertice primario e dei quark che compongono il B

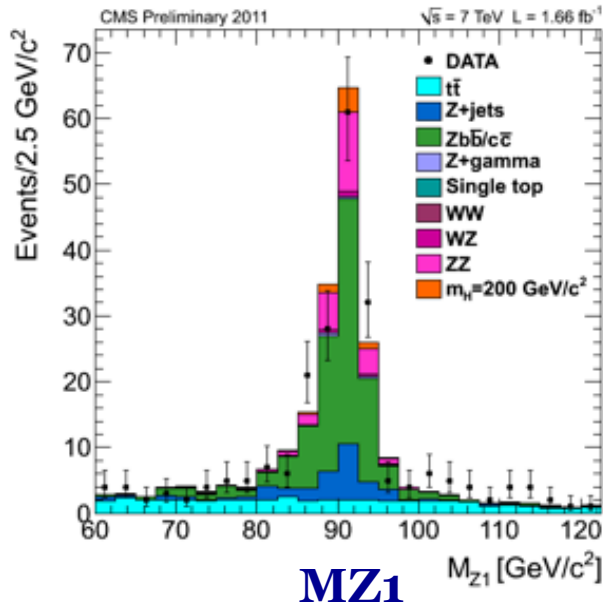


DELPHI

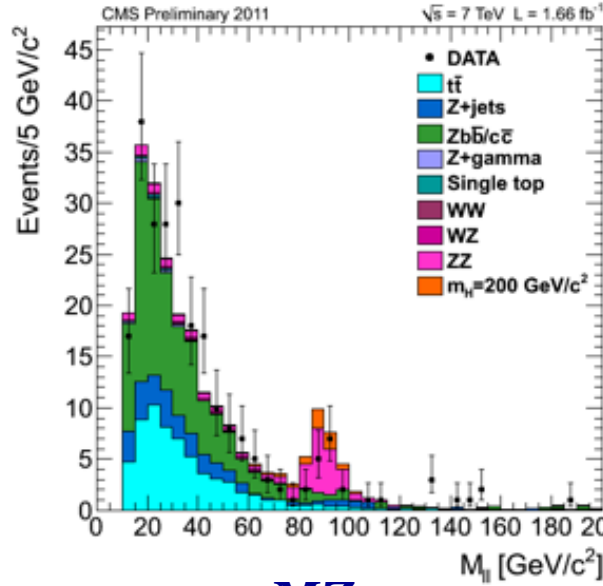
26024 / 1730



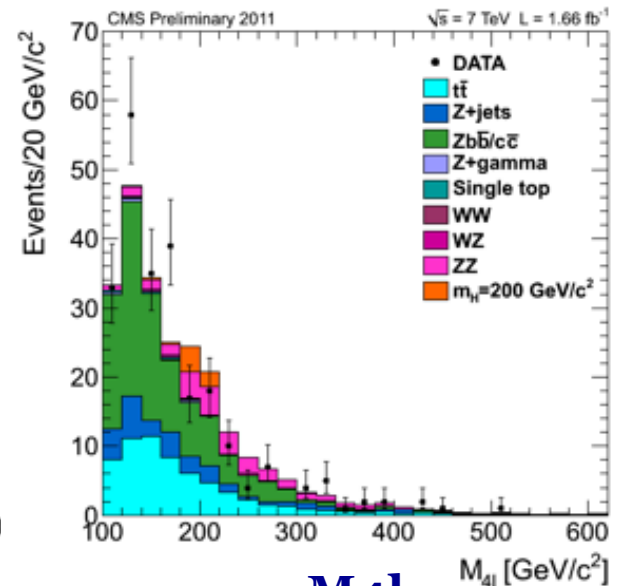
H → ZZ → 4l



MZ1



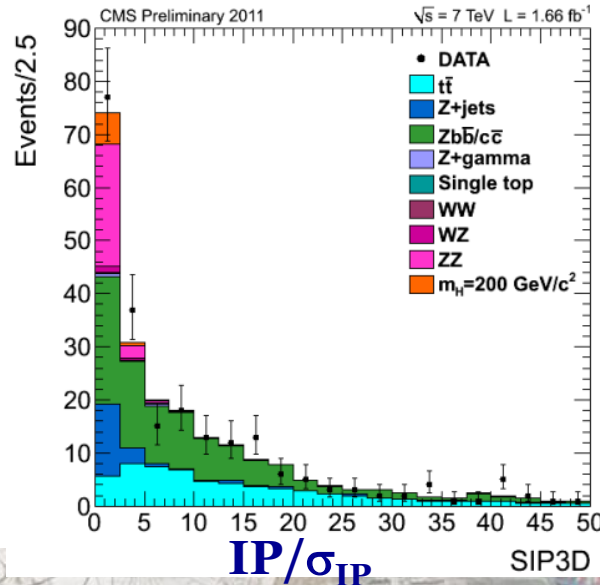
MZ2



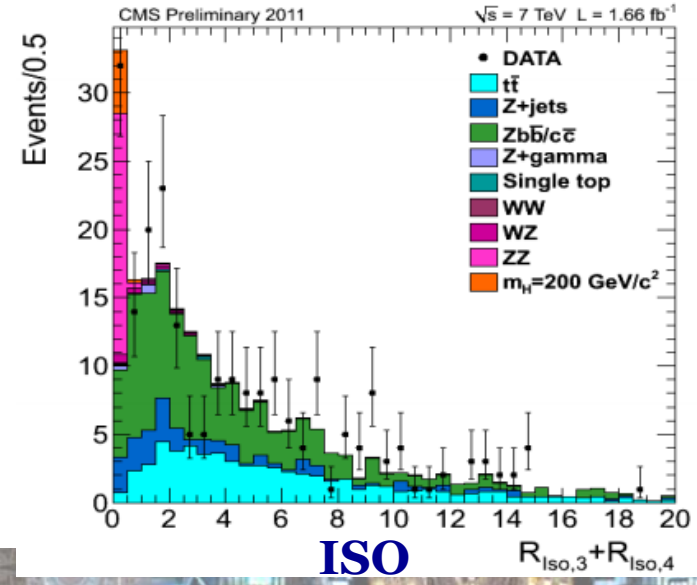
M4l

2 leptons of $p_T > 20, 10 \text{ GeV}$
 Isolated and from PV
 the couple closest to MZ

PLUS
 2 leptons of $p_T > 5 (7) \text{ GeV}$
 with $M > 12 \text{ GeV}$
 Isolated and from PV

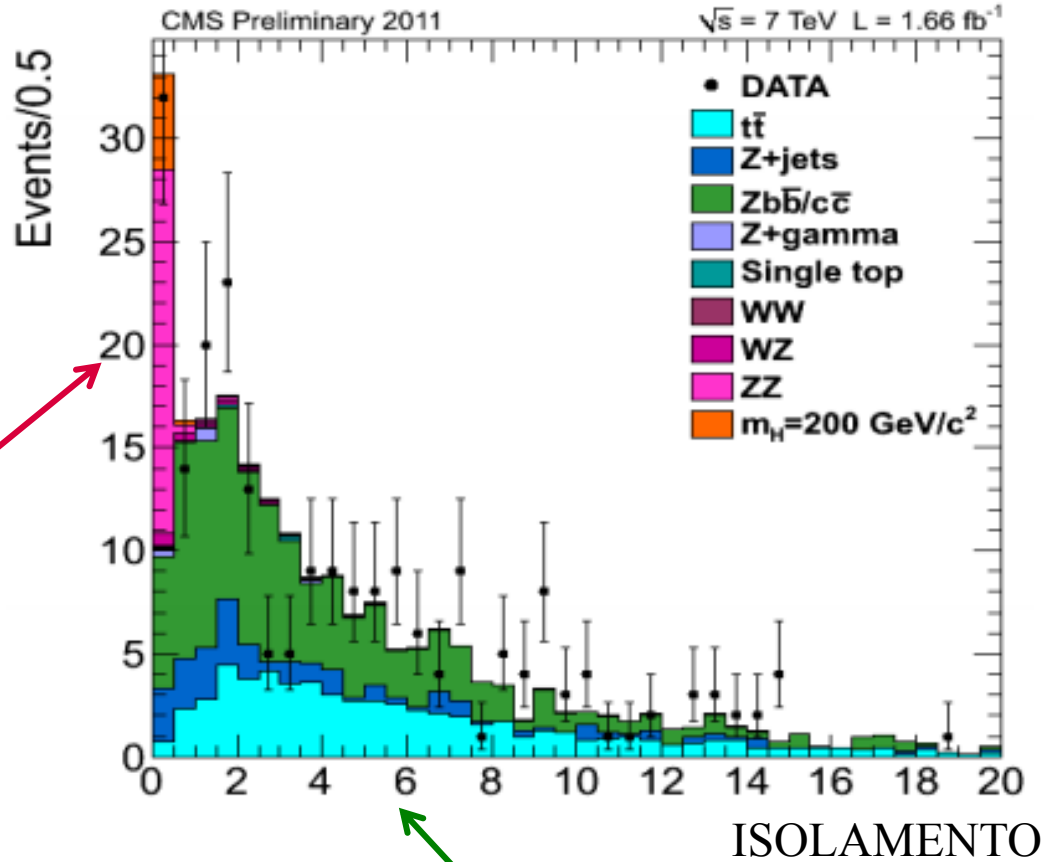


IP/σ_{IP}



ISO

Isolamento

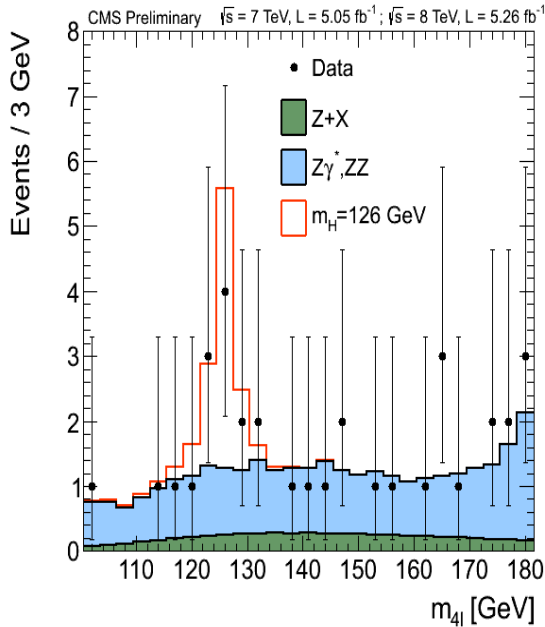


Segnale

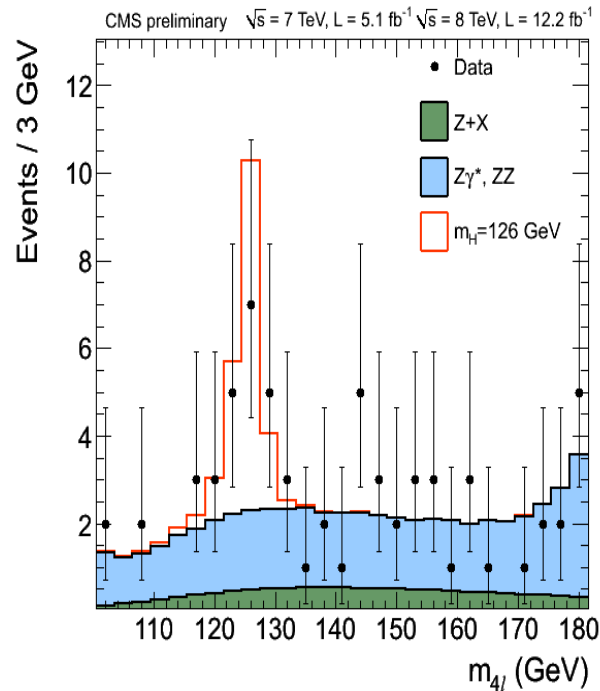
Fondo

Un bellissimo picco

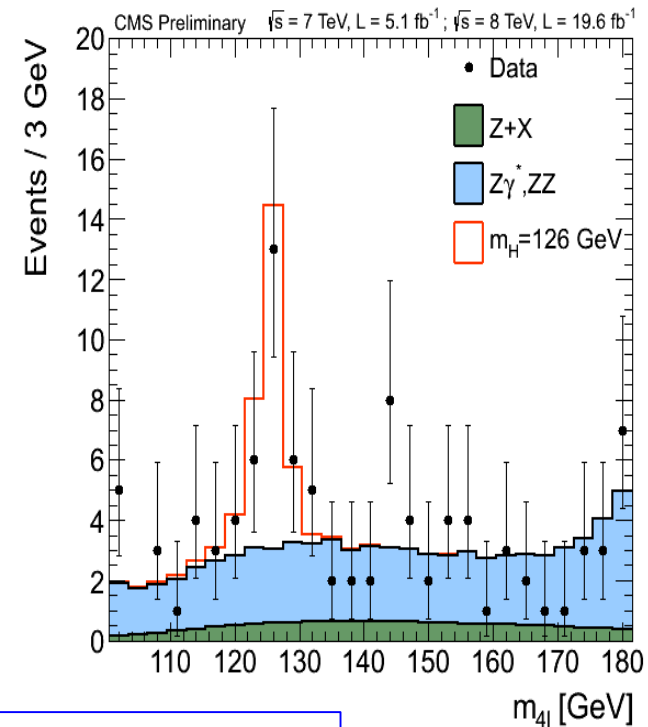
4 July



Nov 2012

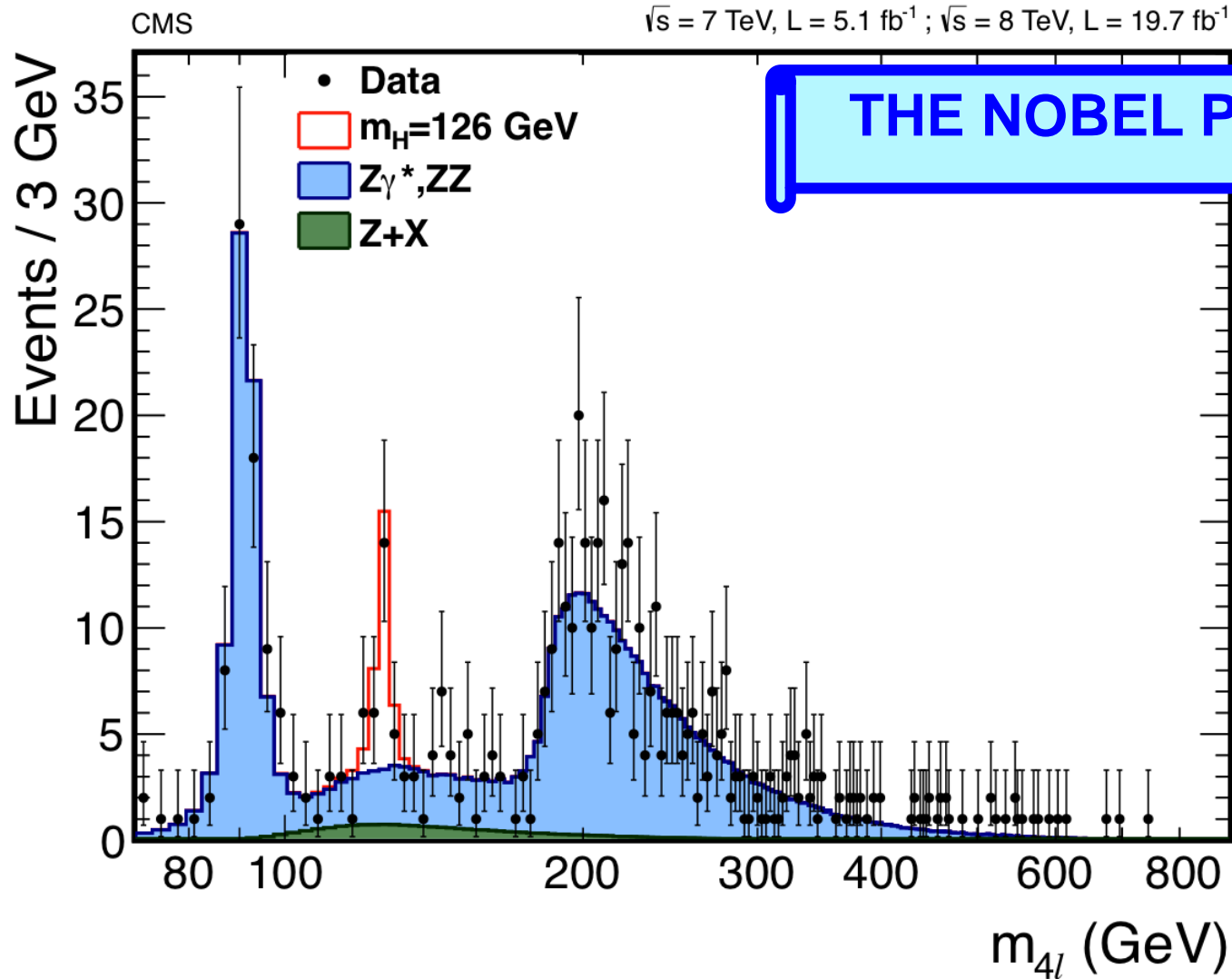


Dic 2012

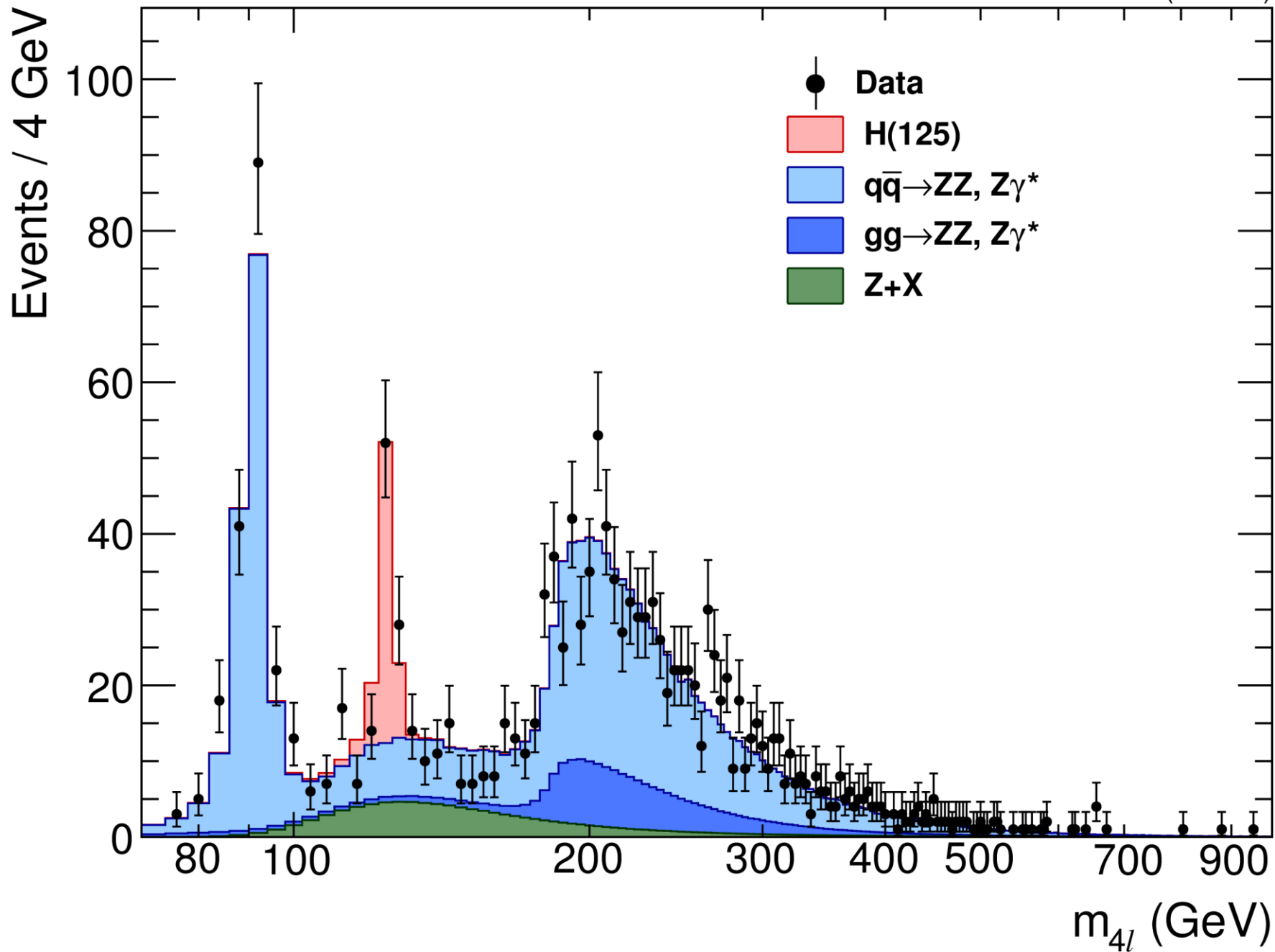


La bellezza di un'equazione è più importante della sua esattezza,
nel senso che se un'equazione è bella, prima o poi si dimostrerà esatta.
Paul Dirac

Lo spettro di massa

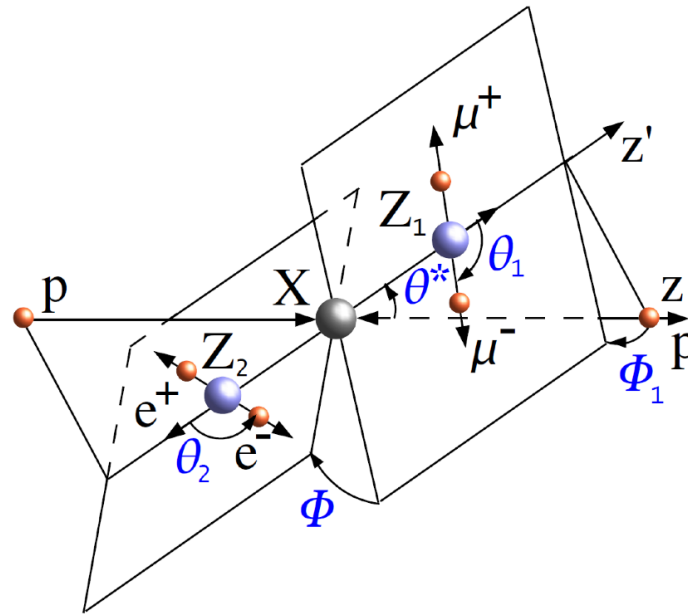


The experimental resolution is excellent, we measure with high precision muons and electrons.



Le proprietà

Il canale 4l permette di misurare le "proprietà" dell'Higgs (Spin, Parità, massa)



Gli esperimenti hanno misurato la compatibilità dei dati con le varie ipotesi e con altissima probabilità (98-99%) i numeri quantici misurati sono quelli di un bosone di Higgs ($S=0, P=+$)

Spin e parità

Most known particles have a property which physicists call "spin": in some experiments they behave as they were macroscopical objects rotating about some axis. Electrons, protons, photons and even neutrinos have a spin.

The Higgs boson is not allowed to have a spin: it must be what physicists call a "**scalar**" particle, a particle with zero spin. Why?

The reason is somewhat technical.

The first idea to understand is that particles (all particles) are interpreted as excitations of some underlying field, something like a long string with its two endpoints fixed: if you tickle the string at one endpoint, a deformation of the original string is created, and propagates along the string until it reaches the opposite endpoint, where it is absorbed. Photons, for example, are excitations of electric and magnetic fields. Needless to say, when the string is left untouched (when there are no electric or magnetic fields around), there is no propagating deformation (no photons): fields are zero in the lowest-energy state. This is true for all fields, except the one associated with the Higgs boson: the mechanism by which particles acquire masses is precisely the fact that the Higgs field is different from zero (it takes some constant value) even when there are no Higgs bosons around.

Spin e parità

The numerical value of this constant field is long known, and it is a fundamental constant of Nature, much like the proton charge or the Planck constant.

The second important idea is what we call "relativistic invariance", a difficult name

for a very simple thing: the fundamental laws of physics must look the same for all observers, even if they choose different reference frames. We call a "scalar" any physical quantity which has just the same value for all observers. The mass of an object, for example, is a scalar quantity. A vector, such as for example an electric or magnetic field, or the spin vector, does not share the same property: vectors look different to different observers.

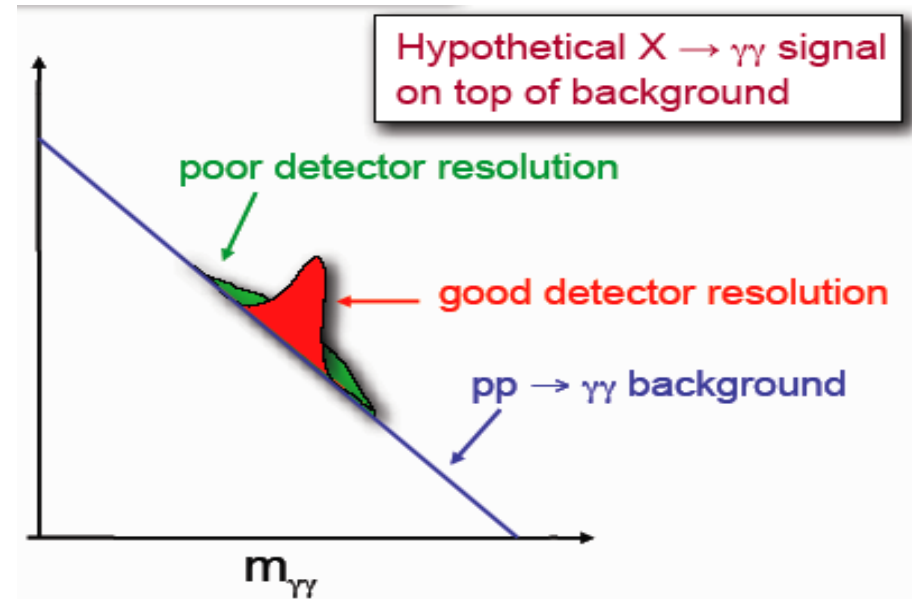
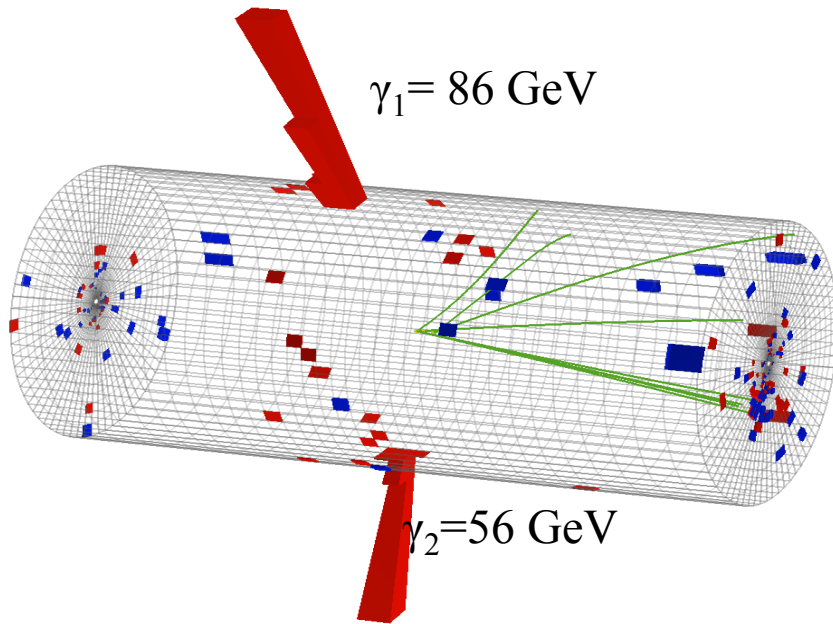
This is why the Higgs field must be a scalar field: because it takes a constant non-zero value in the lowest-energy state, this constant must take the same value in all reference frame. This is only possible if the Higgs boson carries no spin.

from Prof Giovanni Ridolfi (Genova)

Spin e parita'

The particle's parity, a property which characterizes how differently the Higgs behaves when observed in a mirror. With the Higgs, there should be no difference; otherwise, the interaction of other particles with it, and so the mass they acquire, would depend on the speed and direction with which they travel through the Higgs field

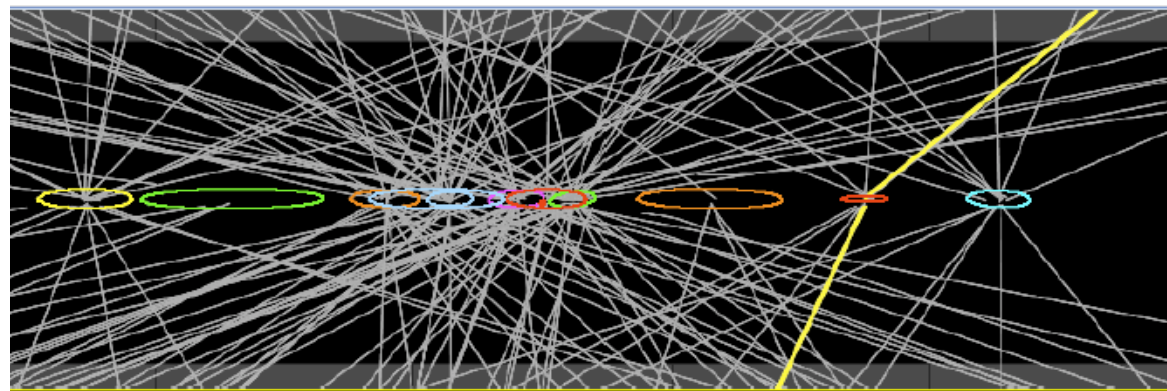
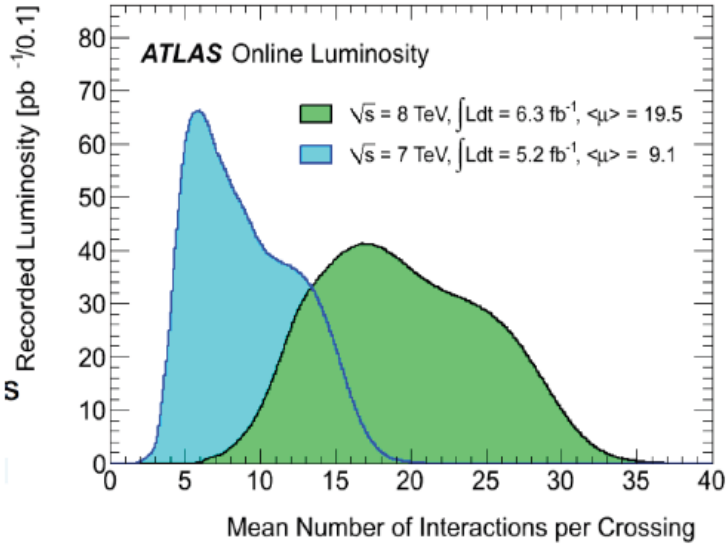
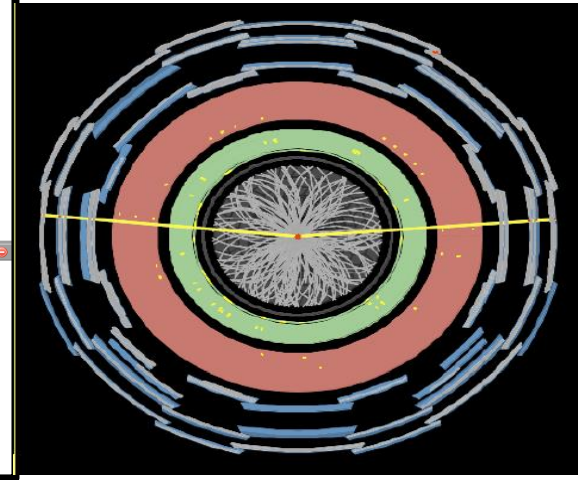
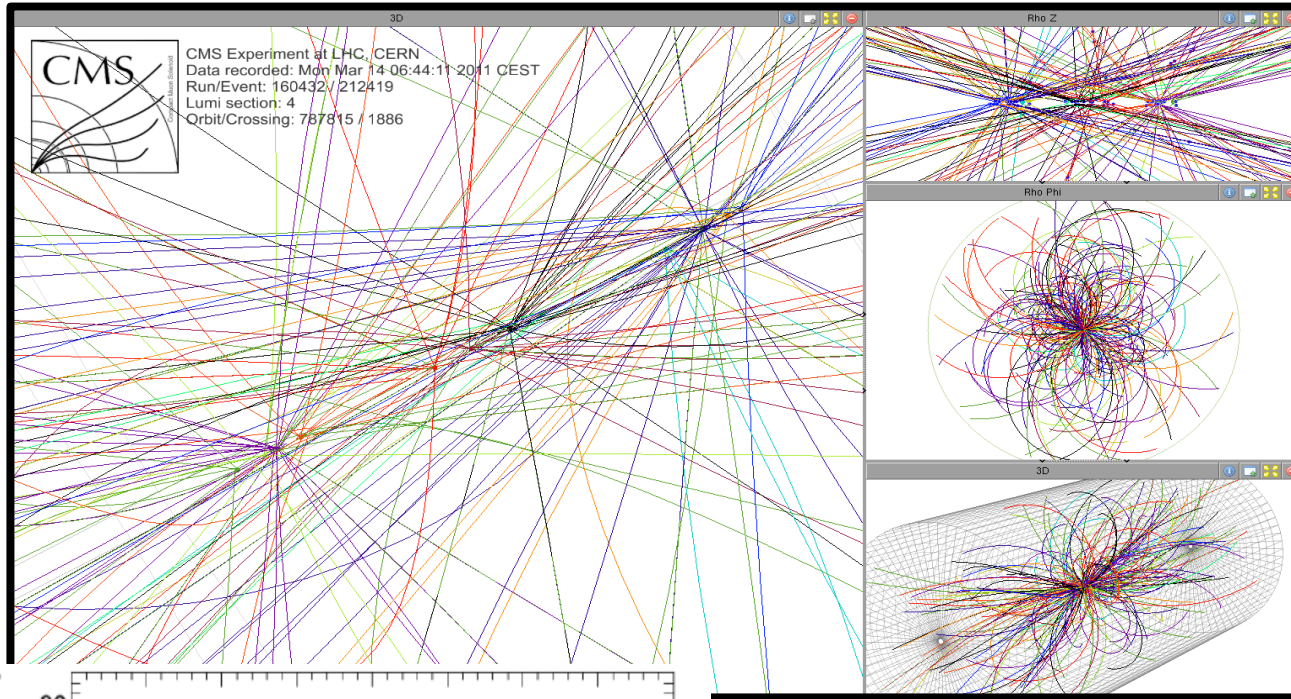
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



Rispetto ai 4l e' uno stato finale dove domina il fondo (2 fotoni prodotti da interazione dei quark).

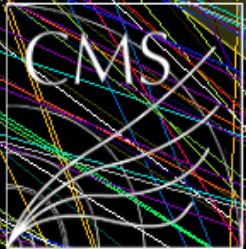
I due fotoni non lasciano traccia nel tracciatore e dunque il loro "vertice primario" non e' noto con precisione \rightarrow problema per quando si hanno molti eventi sovrapposti (=pile-up, alta luminosita' istantanea)

Pile-up

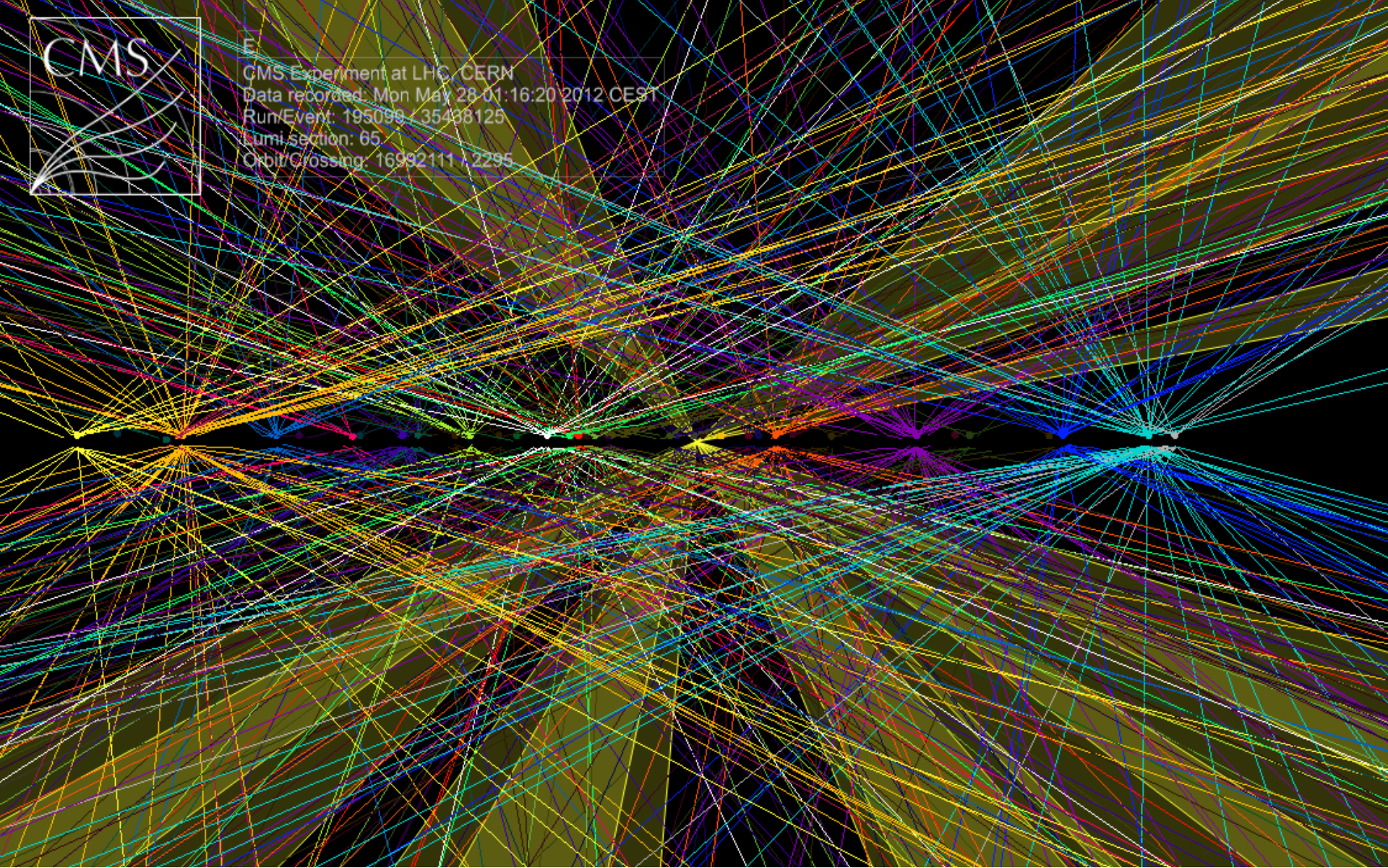


$Z \rightarrow \mu\mu$ event with 11 primary vertices

Pile-up

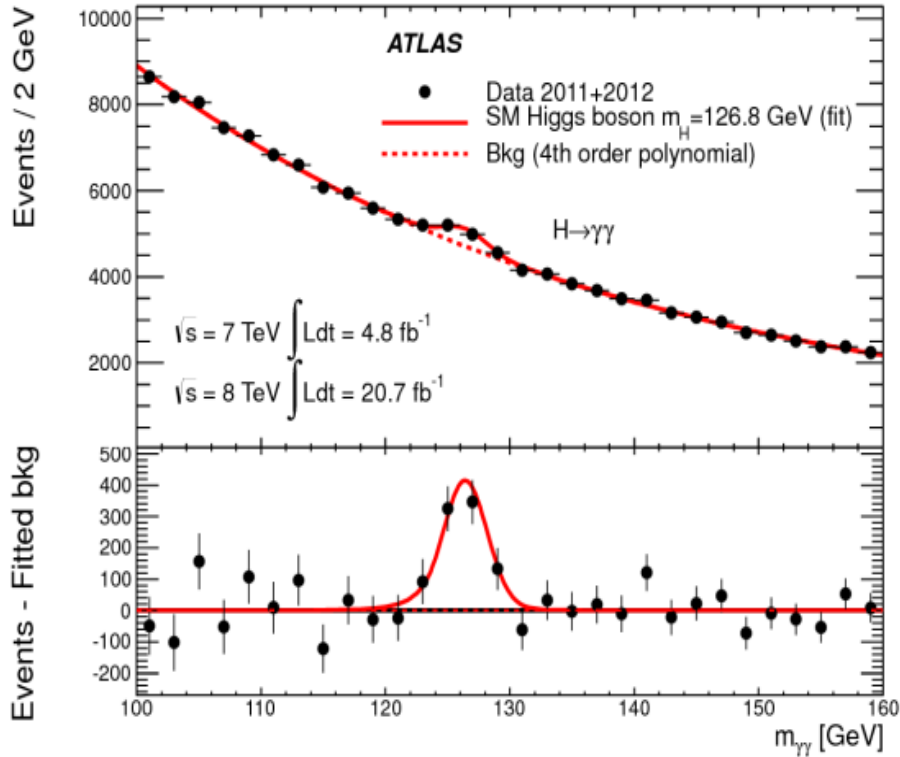


E
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon May 28 01:16:20 2012 CE3T
Run/Event: 195099 / 35438125
Lumi section: 65
Orbit/Crossing: 16992111 / 2295

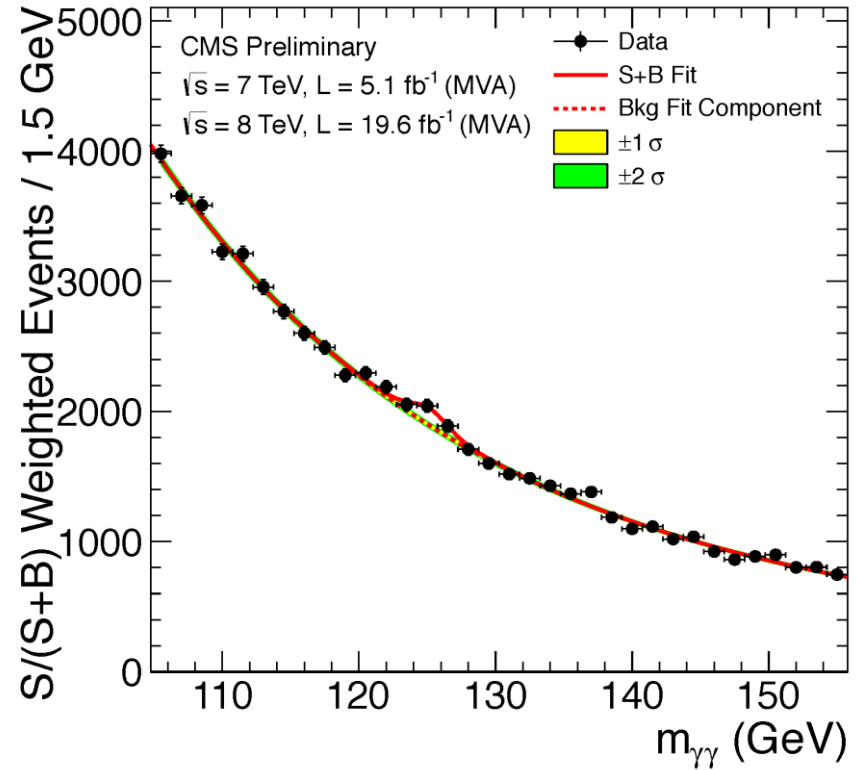


$H \rightarrow \gamma\gamma$

ATLAS



CMS



ATLAS fit \pm stat. \pm syst

CMS fit \pm stat. \pm syst

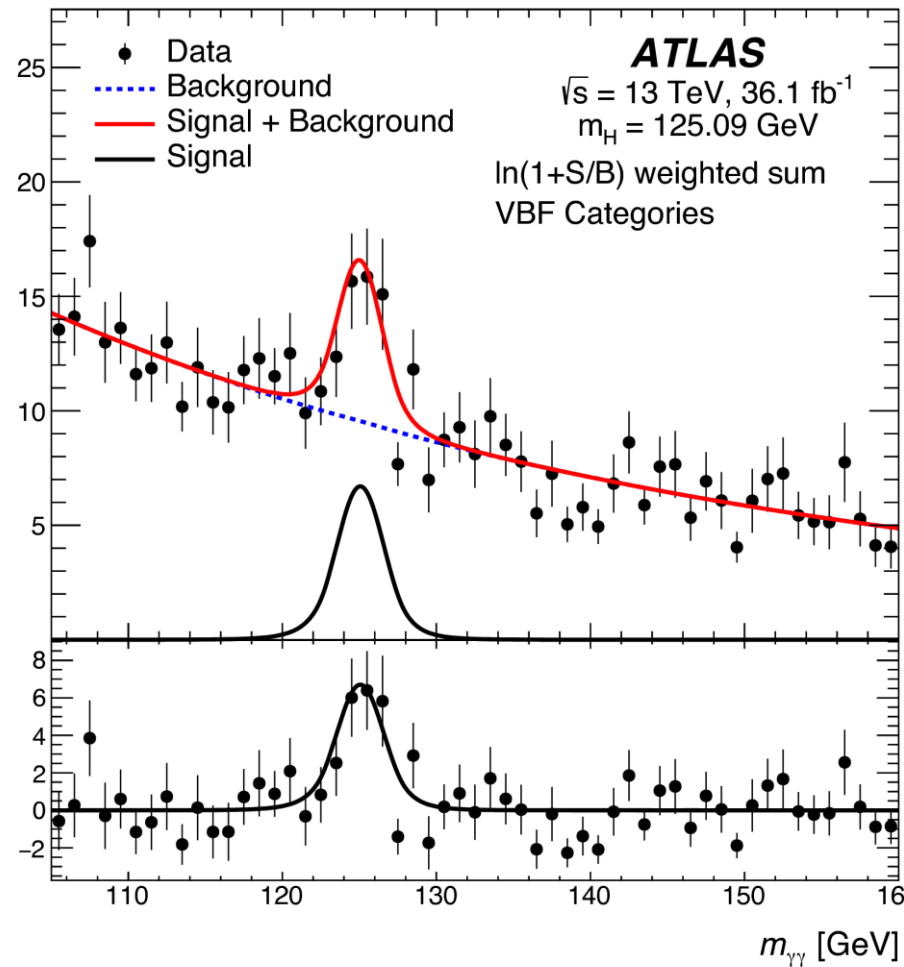
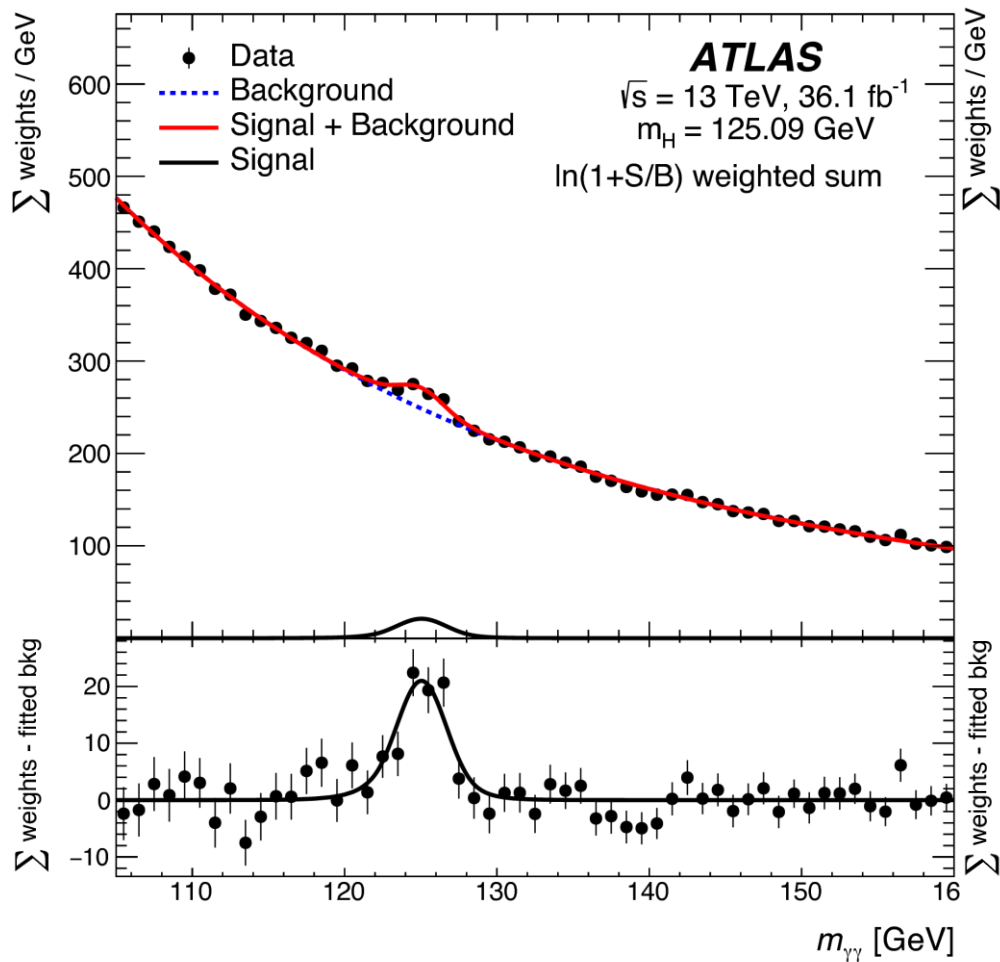
$\gamma\gamma$ $125.98 \pm 0.42 \pm 0.28$
GeV

$124.70 \pm 0.31 \pm 0.15$ GeV

4ℓ $124.51 \pm 0.52 \pm 0.06$
GeV

$125.8 \pm 0.4 \pm 0.2$ GeV

H $\rightarrow \gamma\gamma$

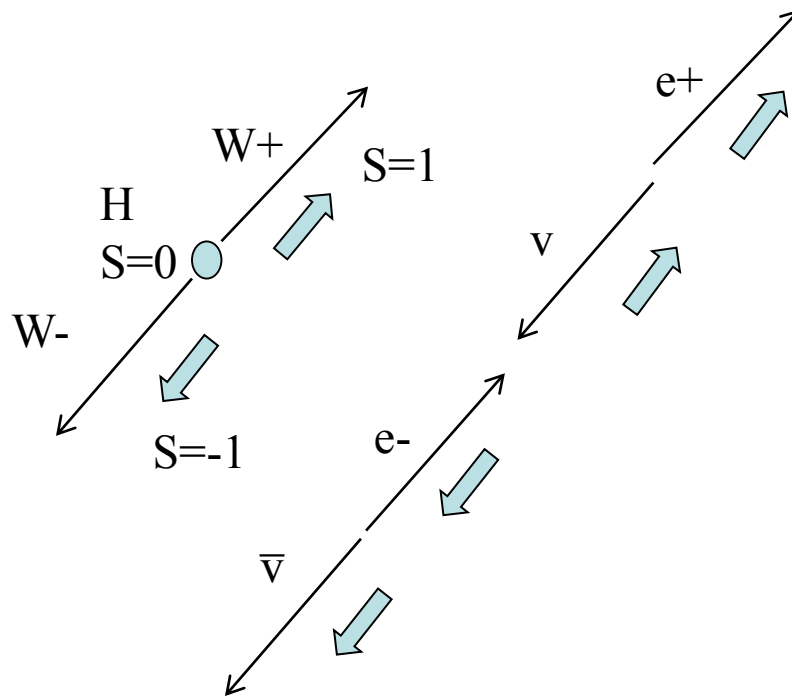


$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$

Canale molto complicato per la presenza dei due neutrini e quindi di grande "energia mancante".

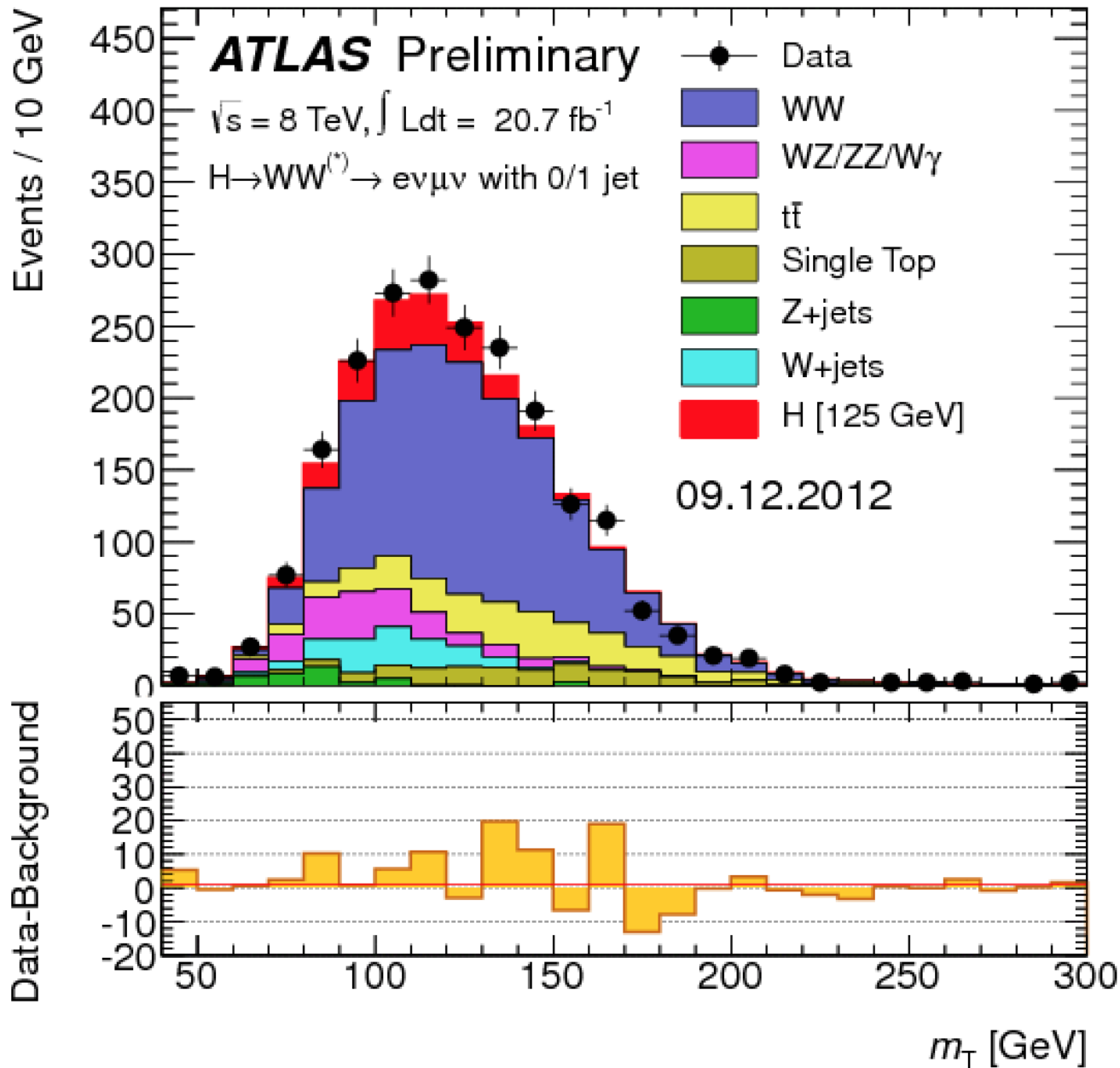
Il fondo e' anche dominante.

Un grosso aiuto viene dal fatto che i neutrini essendo a $m \sim 0$ esistono solo con lo spin orientato in direzione opposta al momento:



- H $S=0$
- W $S=1$
- ν_e $S=-1/2$
- E^+ $S=1/2$
- Ve $S=1/2$
- Ve $S=-1/2$

H \rightarrow WW \rightarrow $l\nu l\nu$



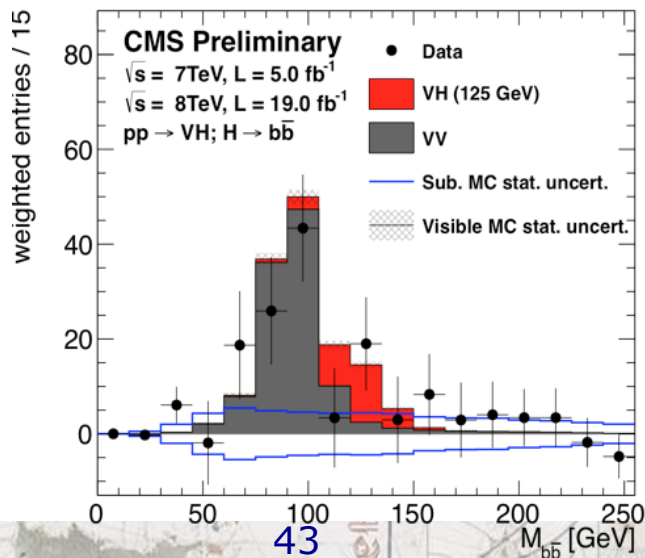
H → bb

L'Higgs decade anche in quark.

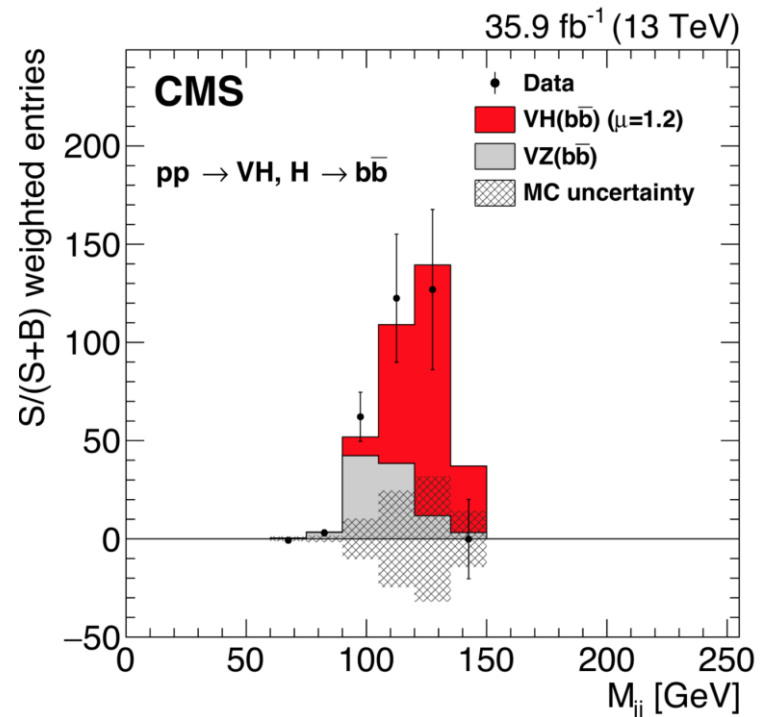
Tende a decadere nel quark piu' pesante disponibile (il quark top e' troppo pesante, $m_{\text{top}} > m_H$, dunque $H \rightarrow b\bar{b}$)

Il b quark si puo' identificare tramite i suoi decadimenti, ma non con un alta efficienza e purezza. Il fondo e' dominante $\sigma(bb) \sim 10^7 \sigma(H \rightarrow b\bar{b})$

CMS eccesso di ~ 2 sigma a 8 TeV



osservato
→ a 13 TeV



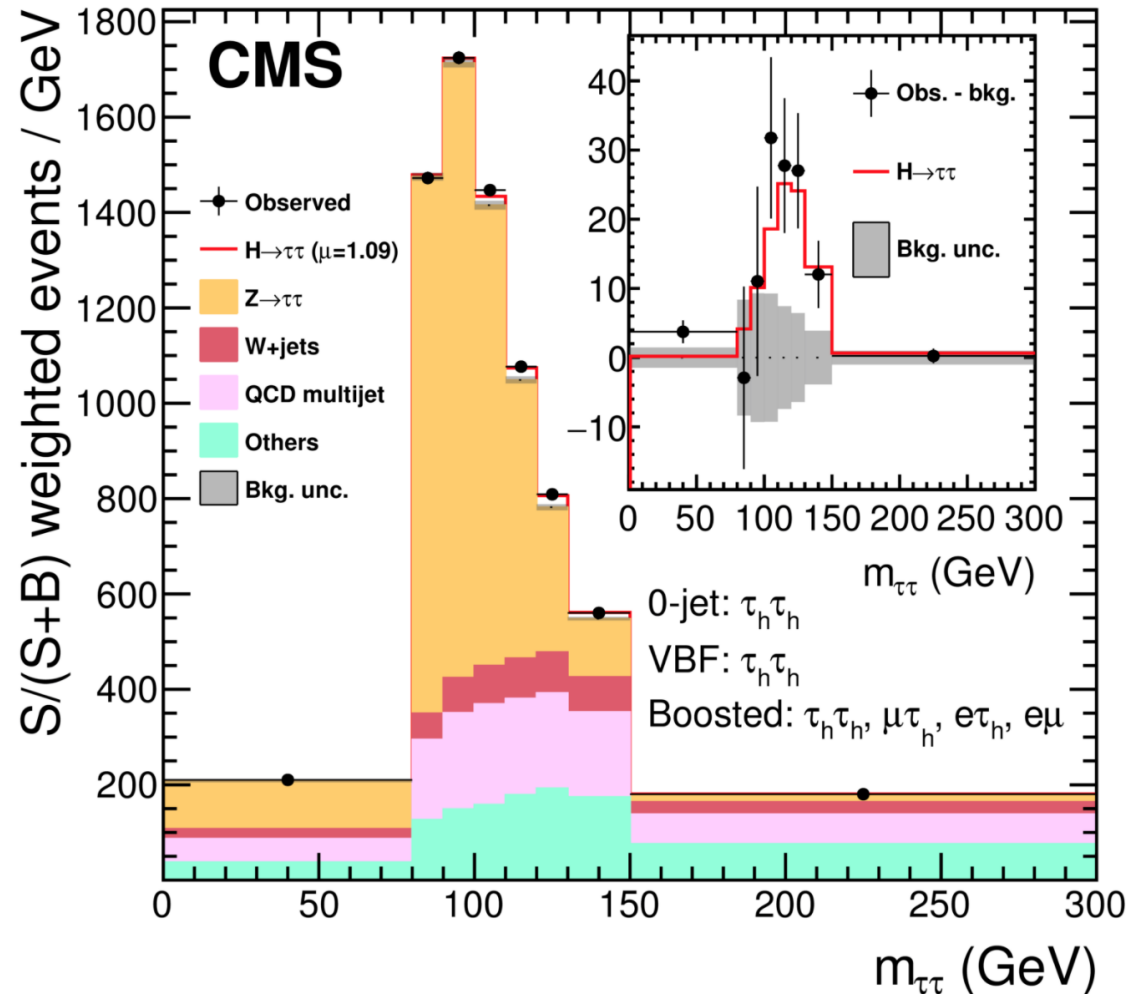
H → leptoni tau

Tau → $\nu_\tau \nu e(\mu)$
 Tau → $\nu_\tau \pi \pi \pi$ (k...)

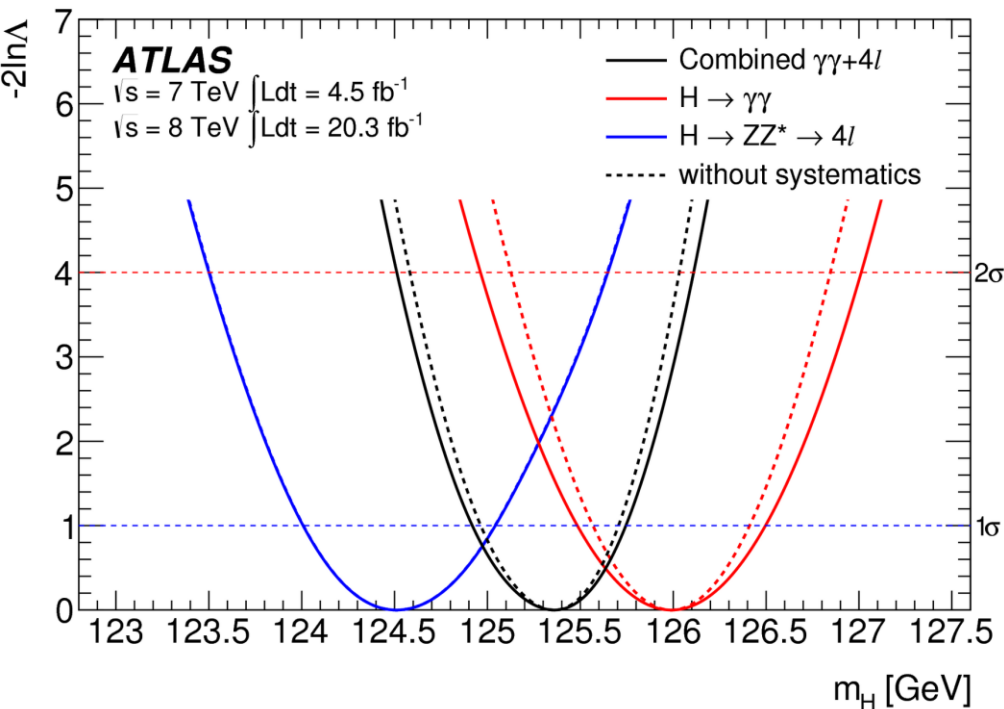
Molti neutrini
 "mini" jets
 Risoluzione in massa
 molto povera.
 Picco vicino a Z...

CMS e ATLAS hanno
 osservato questo
 decadimento

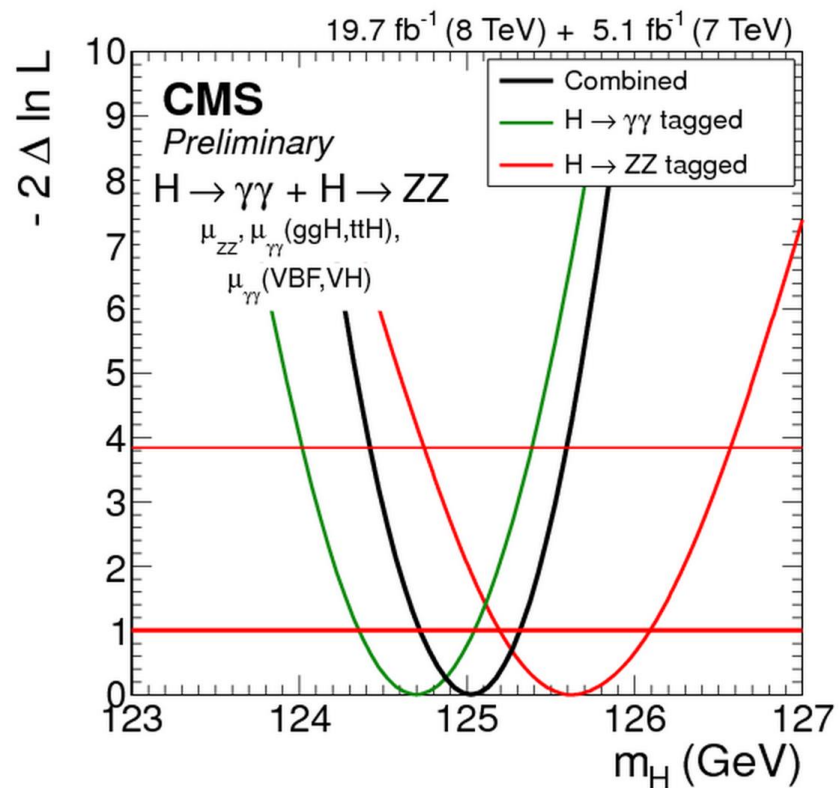
35.9 fb⁻¹ (13 TeV)



La misura della massa

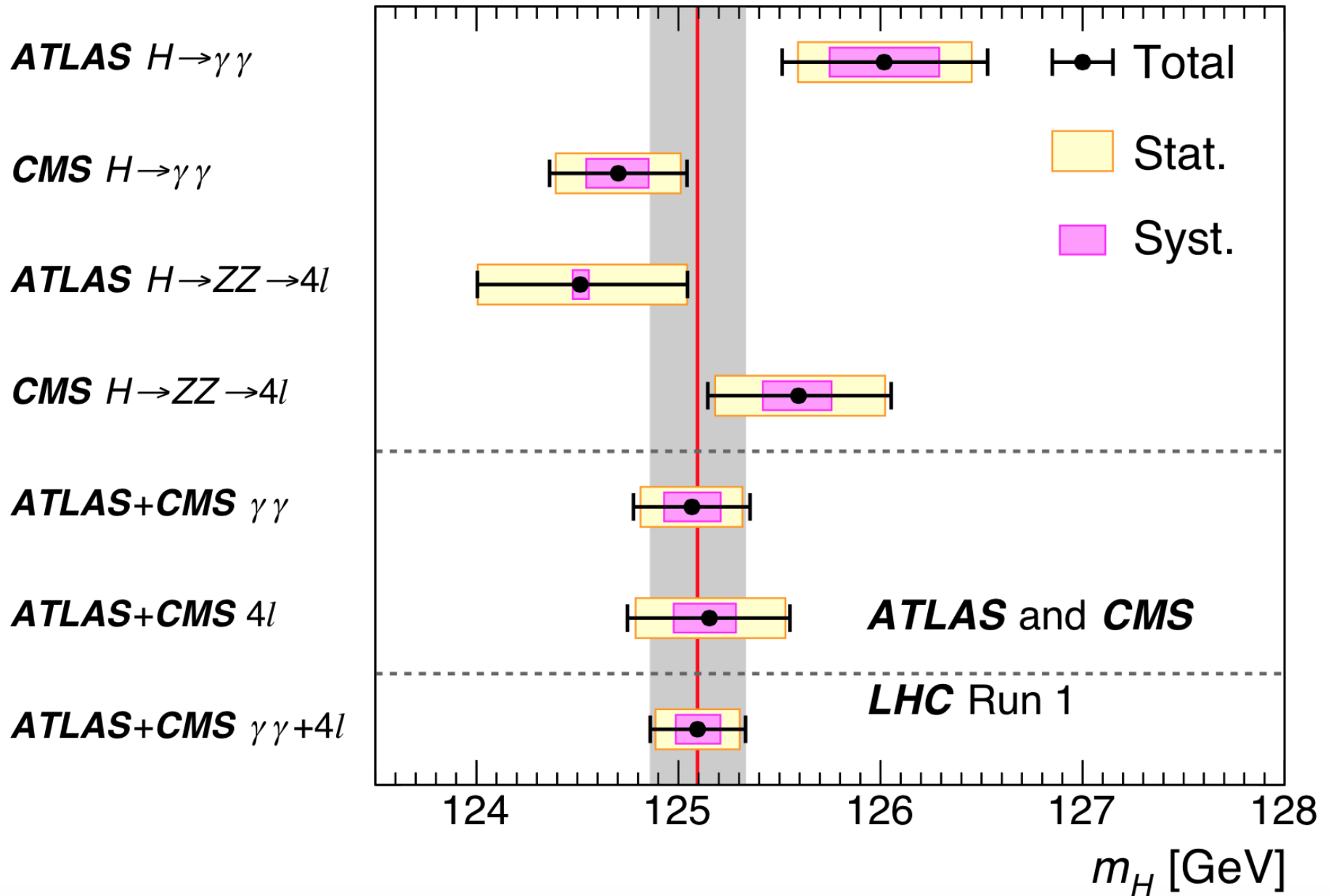


$$125.36 \pm 0.37 \text{ (stat)} \pm 0.18 \text{ (syst)}$$



$$125.03^{+0.26}_{-0.27} \text{ (stat.) }^{+0.13}_{-0.15} \text{ (syst.) GeV,}$$

$$m_H = 125.09 \pm 0.24 (\pm 0.21 \text{ stat} \pm 0.11 \text{ syst}) \text{ GeV}$$



The result

Systematic contributions are evaluated sequentially “freezing” nuisance parameter groups to their best values and re-scanning the likelihood ratio

$$\begin{aligned} m_H = 125.09 & \pm 0.21 & (\text{stat}) \\ & \pm 0.11 & (\text{scales}) \\ & \pm 0.02 & (\text{others}) \\ & \pm 0.01 & (\text{theory}) \\ & & \text{GeV} \end{aligned}$$

Uncertainty is mostly statistical

E/p scale uncertainties dominate the systematic

Theory uncertainties do not include interference

< 0.2 % precision

“Verso un nuovo mondo”

Abbiamo costruito apparati sofisticati ed enormi, “le cattedrali della scienza”, per cercare una particella puntiforme che spiega il perché le particelle elementari hanno massa.

La scoperta del bosone di Higgs è una scoperta di enorme importanza, forse addirittura più sconvolgente della scoperta dell'elettrone.

È un grande successo di una comunità di migliaia di fisici: è un lavoro di gruppo, ma dove ognuno ha dato il suo personale contributo.

Sappiamo molto poco e vorremmo saperne di più:

Proseguiamo per 2 strade

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

Il CERN e':

La voglia di capire

La curiosità di scoprire

Le sempre continue sfide intellettuali, tecnologiche

Costruire e far funzionare

Misurare con precisione

Un'avventura umana senza precedenti



Backup introduzione

CERN – storia...

II CERN: cosa è e perché ?

Consiglio Europeo per la Ricerca Nucleare

È il più grande laboratorio al mondo per la ricerca nel campo della fisica delle particelle.

Come laboratorio fornisce i mezzi agli scienziati per le loro ricerche:

gli ACCELERATORI e i RIVELATORI

Al CERN si studiano le leggi principali che governano la natura, si fa ricerca fondamentale (“pura”), con lo scopo di imparare di più riguardo al nostro universo.

Le eventuali applicazioni possibili e i benefici per la società arrivano a posteriori!

II CERN



Gli Stati Membri

Il livello di sofisticazione degli studi sulla natura e' tale che un singolo stato (e ancor meno un singolo istituto universitario) non puo' permettersi le competenze e le risorse necessarie a realizzare gli strumenti necessari alla ricerca.














Il CERN fu fondato nel 1954 per permettere agli scienziati europei di avere accesso a strutture di ricerca competitive che gli stati europei che uscivano dalla 2nda Guerra Mondiale non potevano permettersi.

Oggi il ruolo del CERN e' diventato piu' globale e permette accesso a tutti gli scienziati del mondo (al di la' di frontiere religiose o politiche).

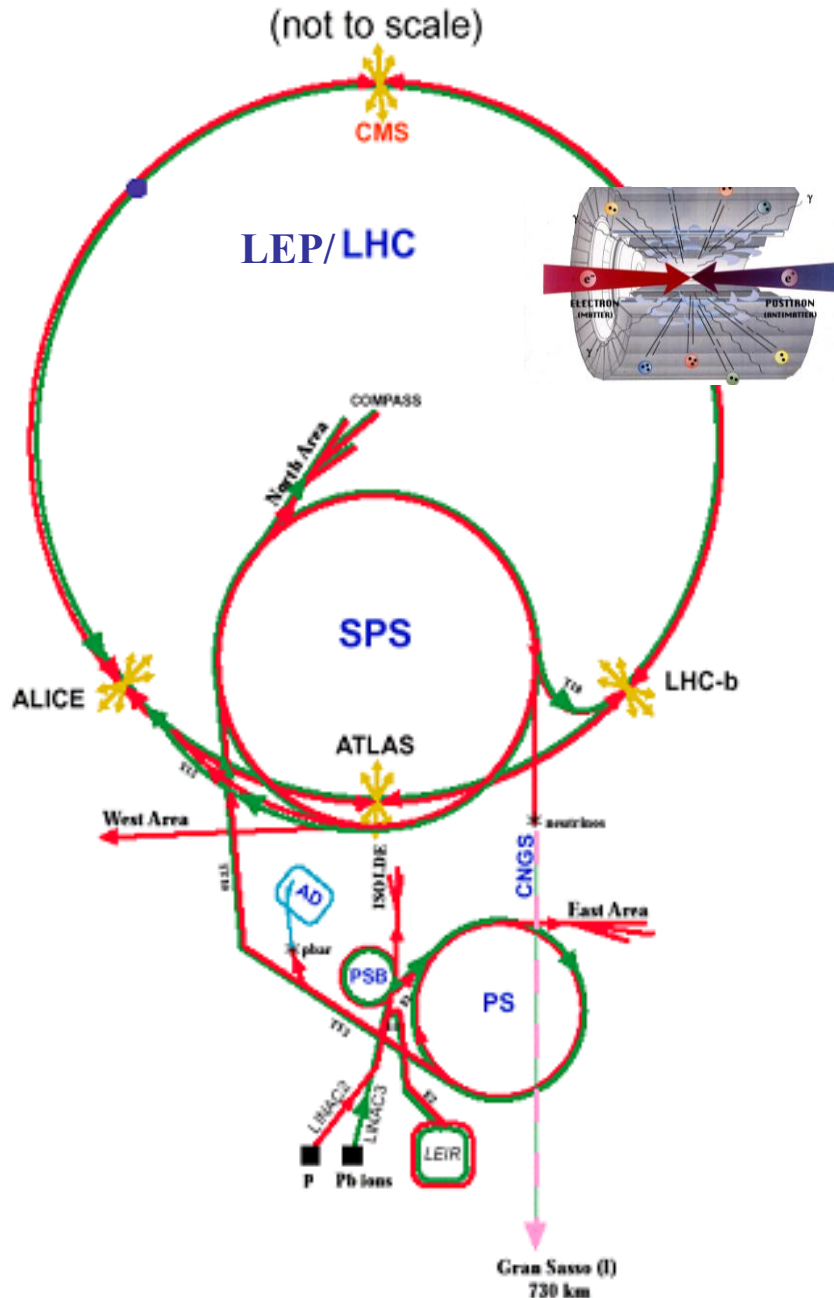
21 Paesi europei
700 Meuro/anno



Member States (Dates of Accession)

 AUSTRIA (1959)	 DENMARK (1953)	 GREECE (1953)	 NORWAY (1953)	 SPAIN (1/1961-12/1968-1/1983)
 BELGIUM (1953)	 FINLAND (1991)	 HUNGARY (1992)	 POLAND (1991)	 SWEDEN (1953)
 BULGARIA (1999)	 FRANCE (1953)	 ITALY (1953)	 PORTUGAL (1986)	 SWITZERLAND (1953)
 CZECH FR (1993)	 GERMANY (1953)	 NETHERLANDS (1953)	 SLOVAK FR (1993)	 UNITED KINGDOM (1953)

Il complesso degli acceleratori



24-Nov-1959: **PS** (Proton Synchrotron)
Funziona tutt' oggi! Accelera e^- , e^+ , p^+ , p^-

27-Gen-1965: **ISR** (Intersecting Storage Ring)
Prima collisione al mondo protone-protone.

1979: **SPS** (Super Proton Synchrotron) (~7 km)

1983: SPS → **Spp̄S**:
Prima collisione al mondo Protoni-Antiprotoni
Premio Nobel a Rubbia per la scoperta W e Z.

1989: **LEP** (Large Electron Collider) (~27 km)
Accelera elettroni-positroni.

Dal 1989 al 1995 : $E(e) = 50 \text{ GeV}$

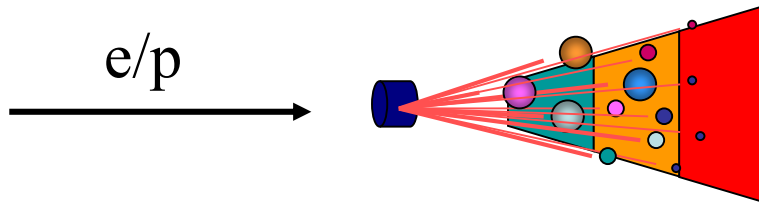
Dal 1995 al 2000 nuove frontiere di enegia!

Stop nel 2000 → trionfo del Modello Standard

2008 : **LHC** (Large Hadron Collider)

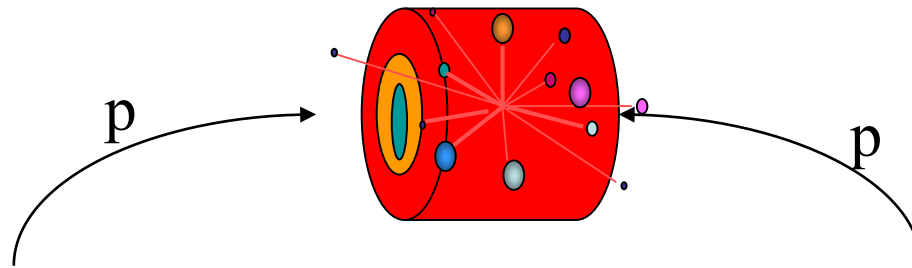
La Nascita del CERN

Se acceleriamo particelle e le facciamo scontrare contro un bersaglio fisso:



molta dell'energia disponibile
"portata" dalla particella viene
persa nel rinculo del bersaglio

Se invece acceleriamo due particelle e le facciamo scontrare, tutta l'energia di entrambe è a disposizione per essere trasformata in massa:



Questi tipi di progetti portò nel 1954 alla fondazione del CERN

In quanto una sola nazione non avrebbe avuto le risorse sufficienti

1983: Scoperta di W e Z

1979-1982: Carlo Rubbia converte SpS in Sp \bar{p} S:

→ Energia disponibile 30 volte superiore!

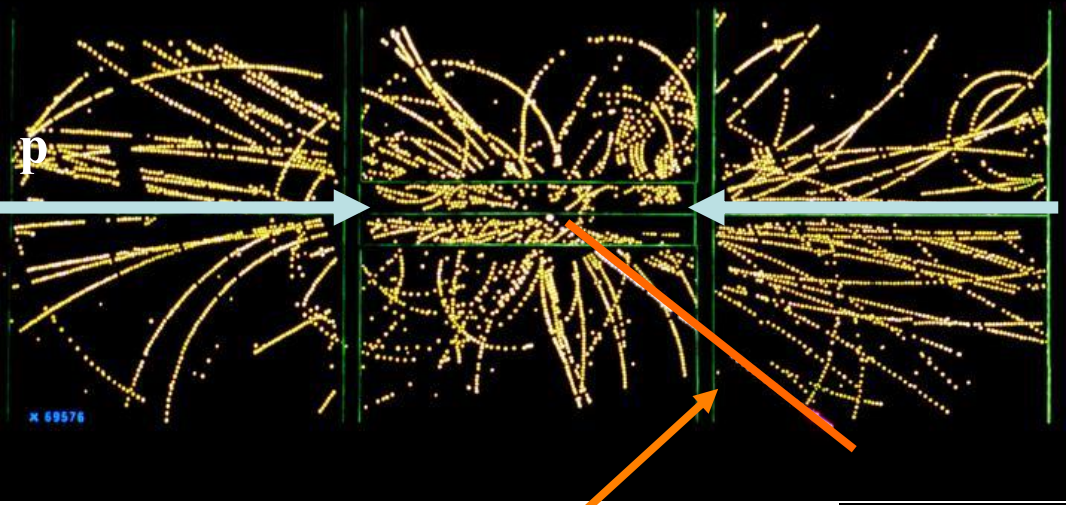
Ovvero convertendo l'acceleratore di protoni, in collisionatore protone-antiprotone, si poteva raggiungere l'energia sufficiente per creare in laboratorio le particelle W e Z

scoperte
le particelle forza
W⁺, W⁻ e Z
messaggeri delle
Interazioni Deboli

C. Rubbia e S. van der Meer
Premio Nobel 1984



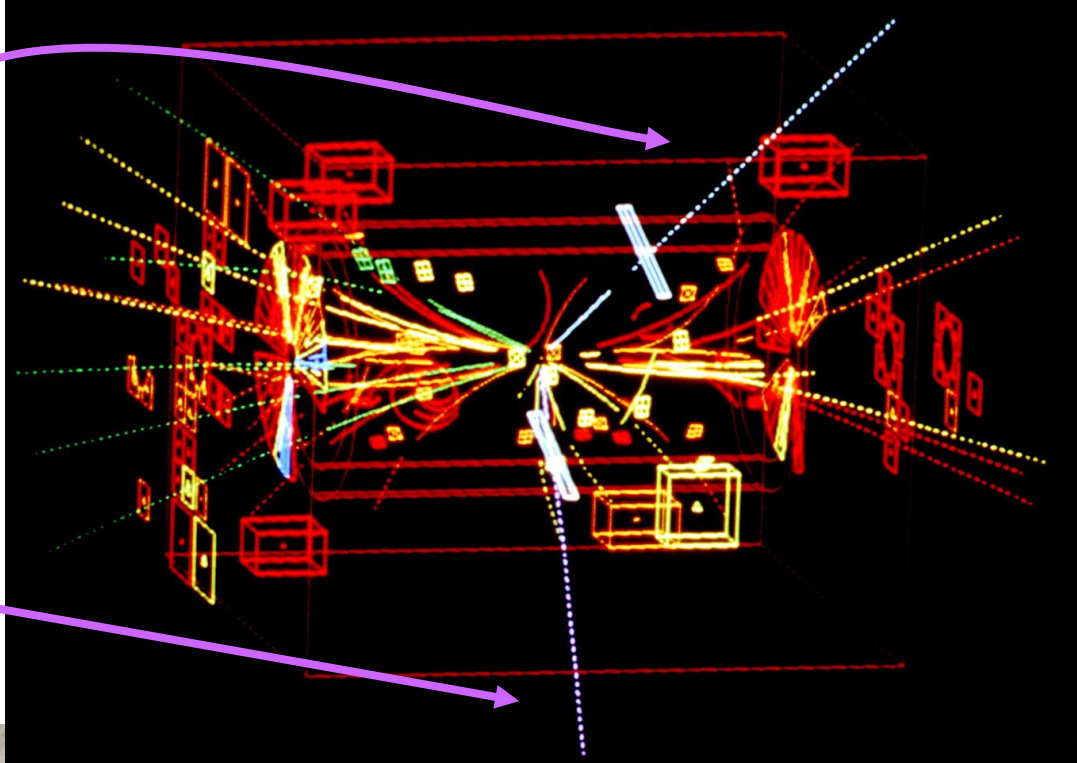
Il primo W e la prima Z



P

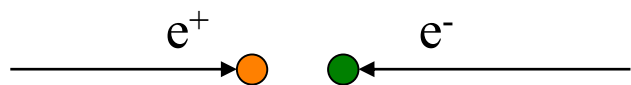
$$W \rightarrow \nu e$$

$$Z \rightarrow e^+ e^-$$

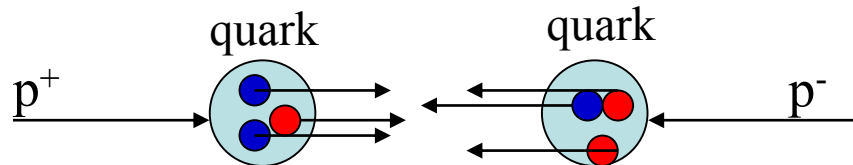


Subito dopo la scoperta di W e Z fu approvato il progetto di un collisionatore **elettroni-positroni** per studiare con precisione queste due particelle-forza e dunque il Modello Standard

PERCHÈ collisionatore e^+e^- ?



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

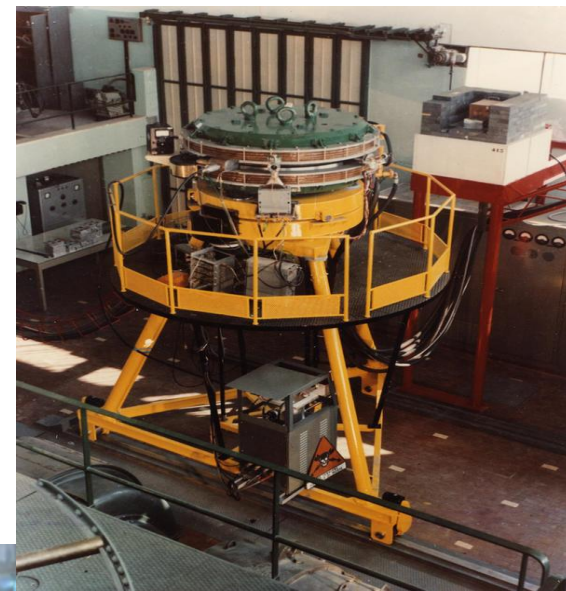


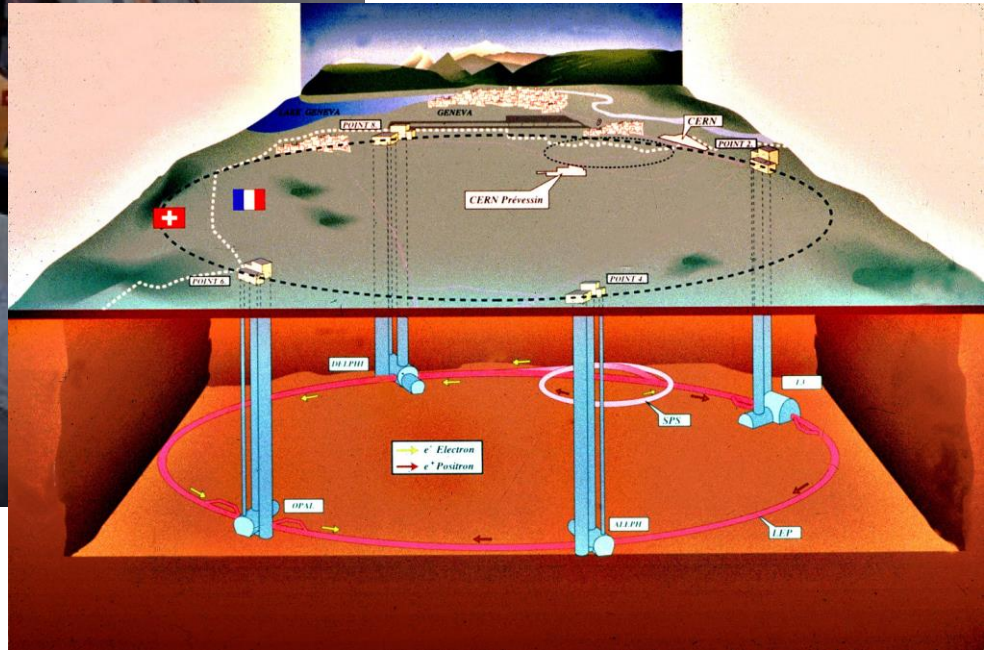
Urto "complesso", $E < 1/3(E(p^+) + E(p^-))$

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 zia preferita di B.T!) a Frascati nel 1961:

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





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 !!!!

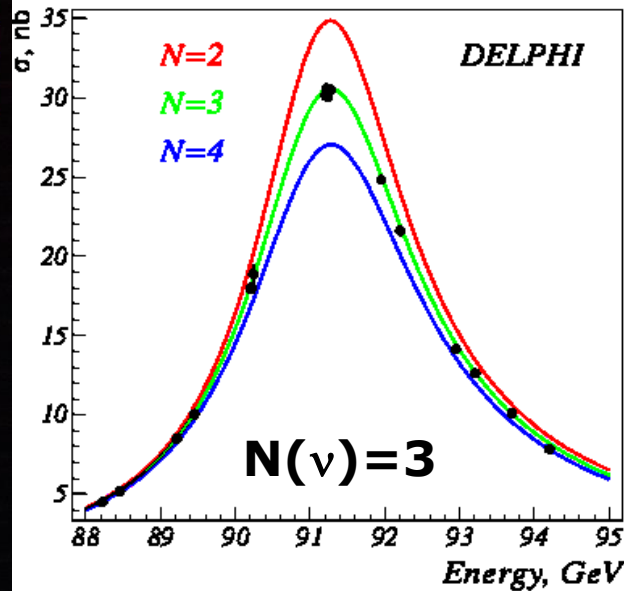
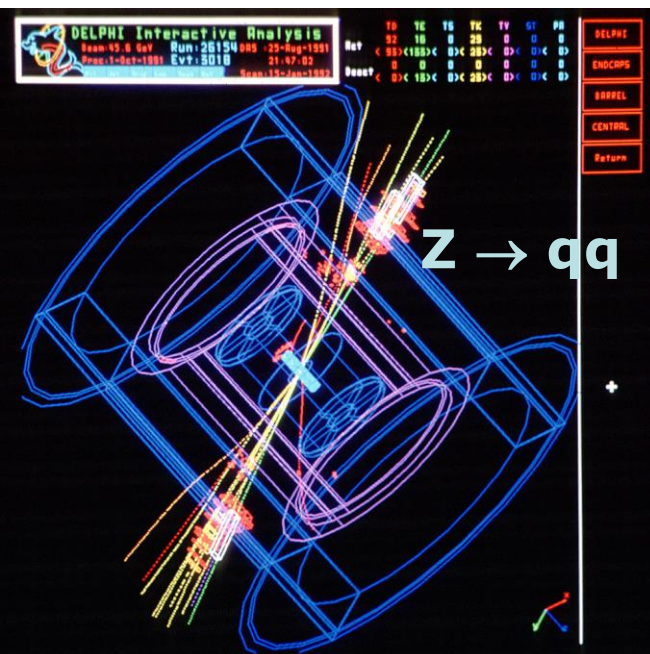
4 grandi esperimenti: ALEPH, DELPHI, L3 e OPAL

LEP: Il trionfo del Modello Standard

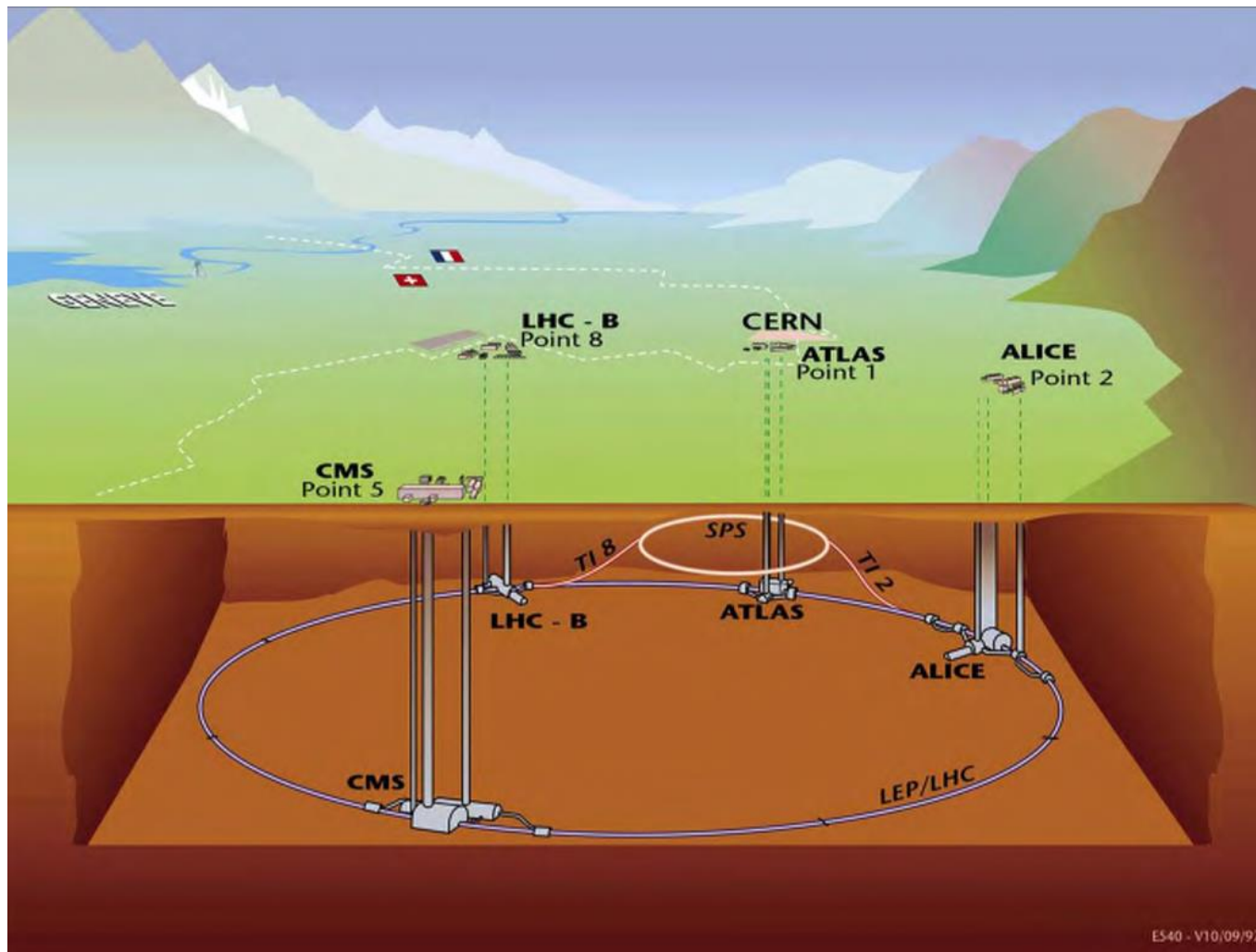
LEP verifica il Modello Standard con altissima precisione ($\sim 10^{-5}$):

MA: l'Higgs non si trova!


Chi e' il responsabile della massa delle particelle?



Le zone sperimentali di LHC

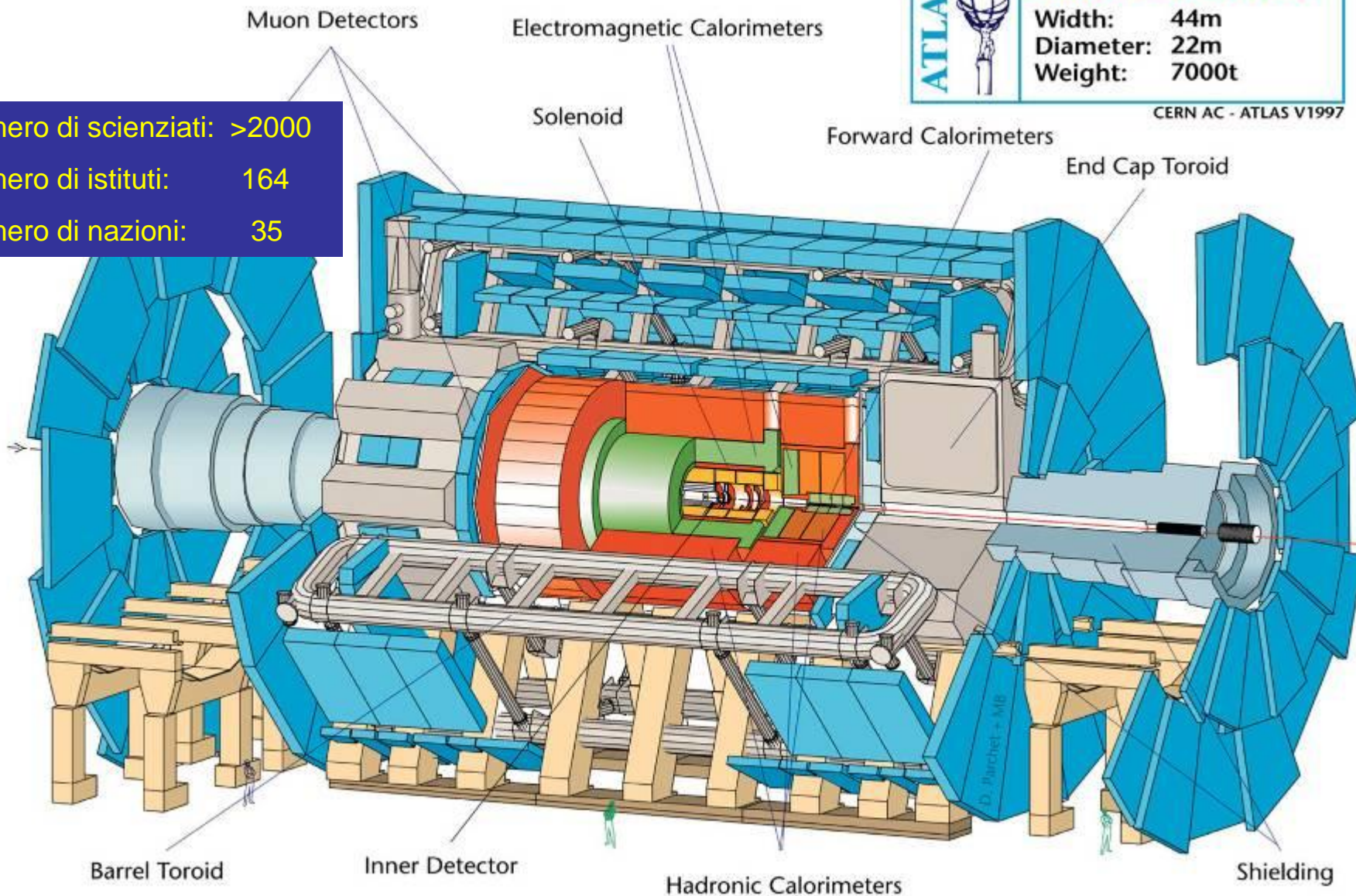


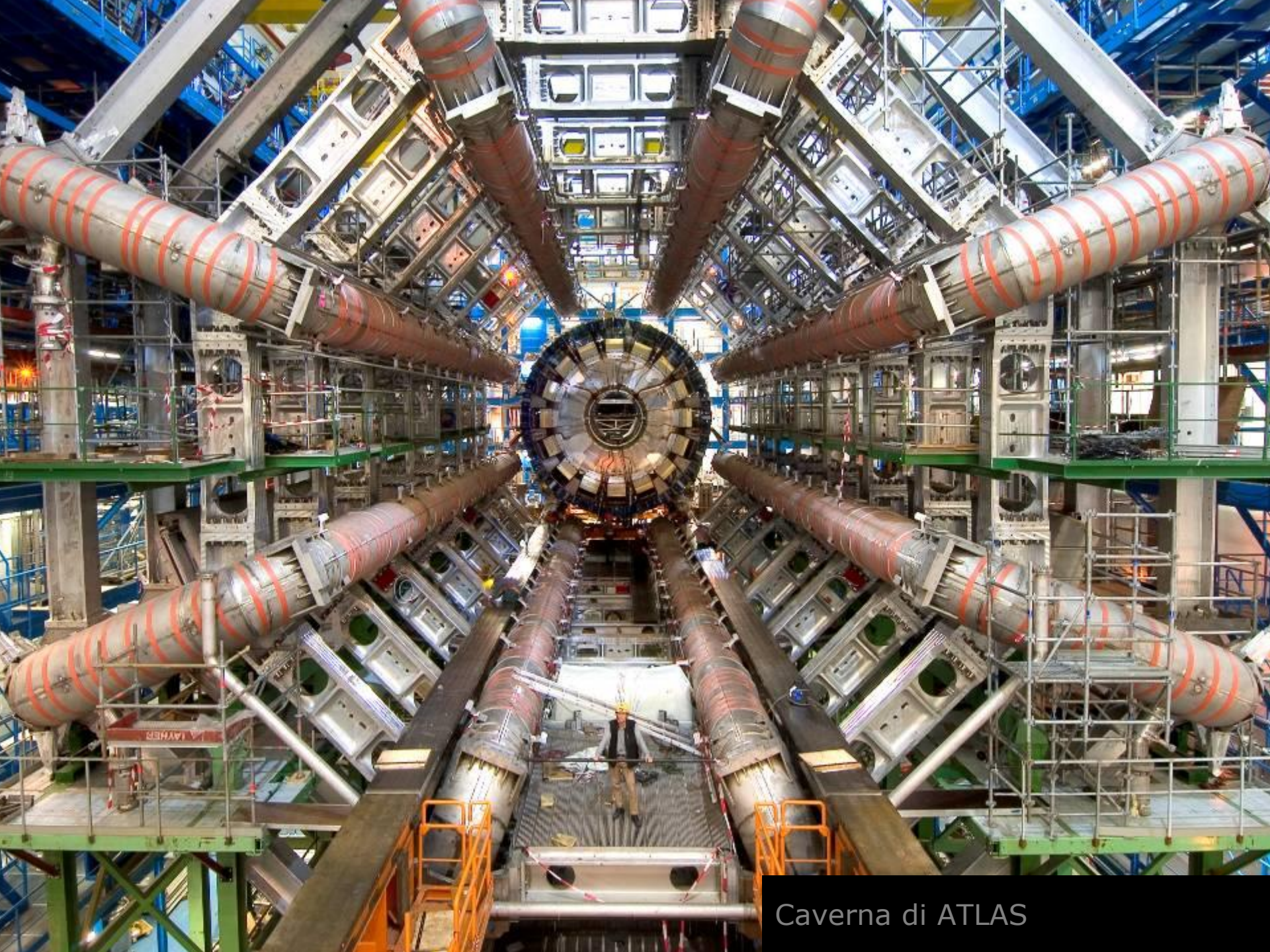
Fra 80 e 140 m sotto terra

	Detector characteristics	
	Width:	44m
	Diameter:	22m
	Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997

Numero di scienziati: >2000
Numero di istituti: 164
Numero di nazioni: 35





Caverna di ATLAS

CMS

