



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2011-May-25 06:00:19.229673 GMT(10:00:19 CEST)

Run / Event: 165633 / 394010457

Física de partículas experimental en LHC

Pablo García Abia

*Programa para profesores españoles,
CERN, Julio 2023*



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN

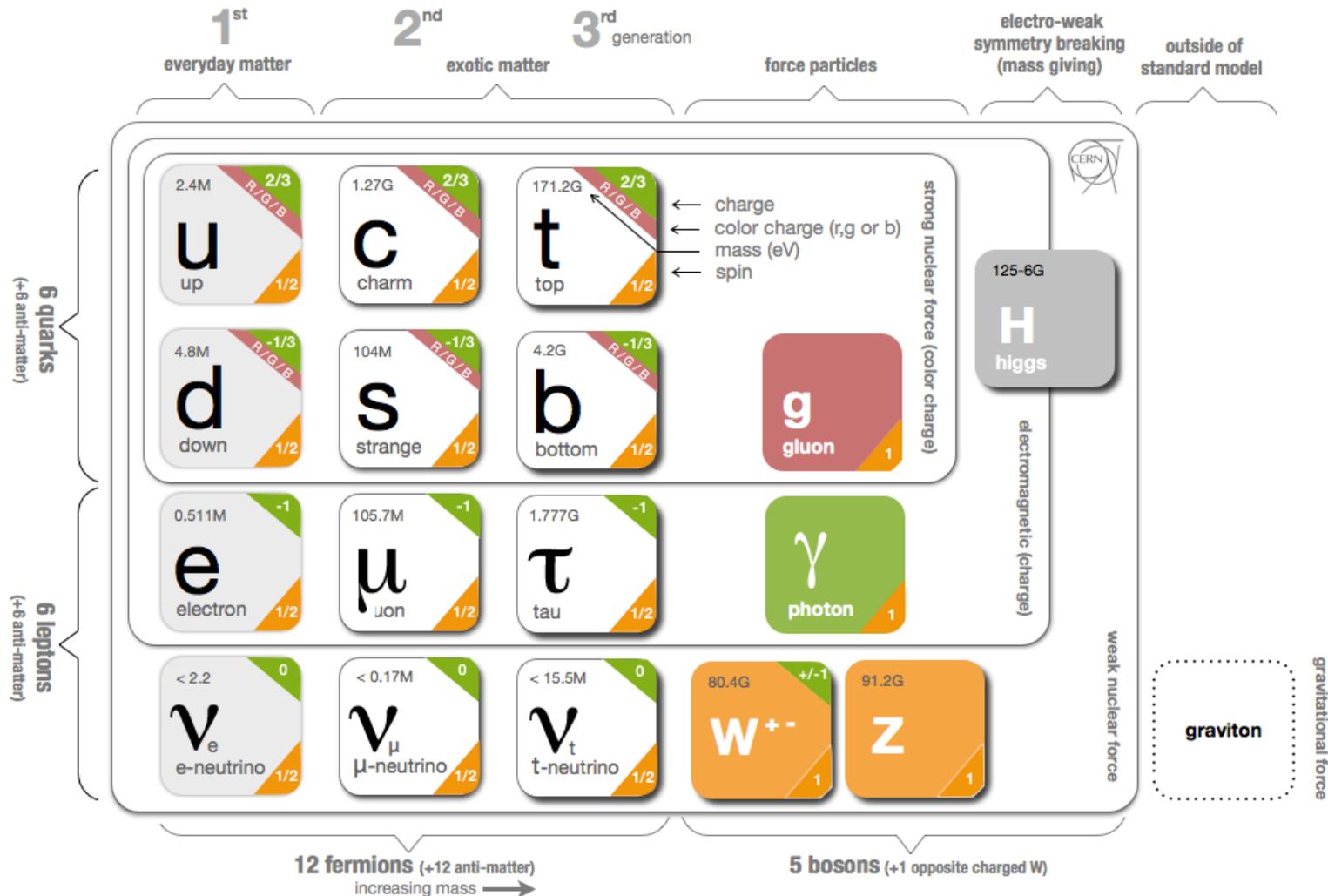
Ciemat

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas



Modelo estándar, 2012

Elegante, basado en las simetrías observadas en la naturaleza.
Comprobado experimentalmente en base a predicciones muy precisas de fenómenos naturales.



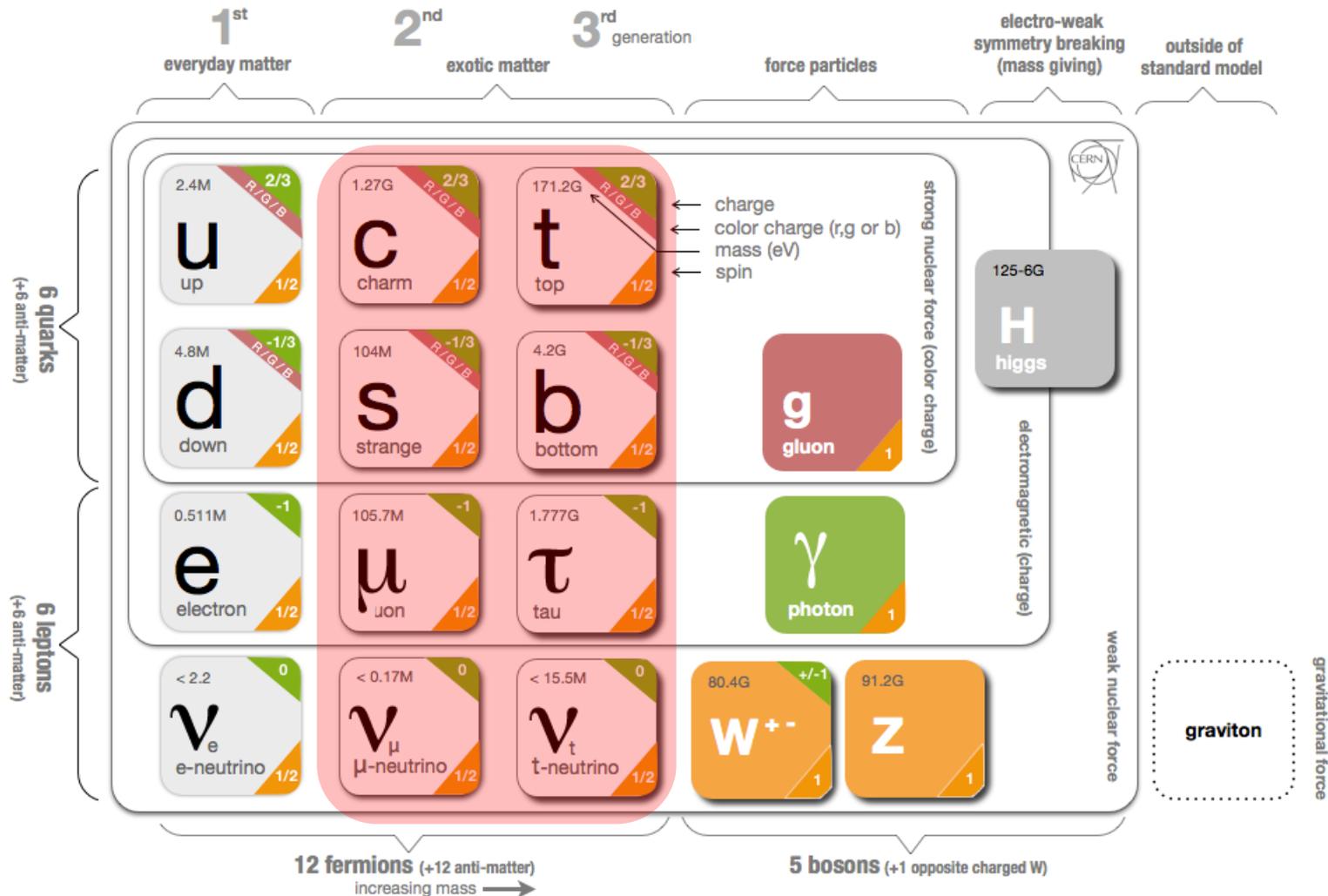
+ antipartículas

“It doesn't matter how beautiful your theory is, it doesn't matter how smart you are. If it doesn't agree with experiment, it's wrong.”

— Richard P. Feynman

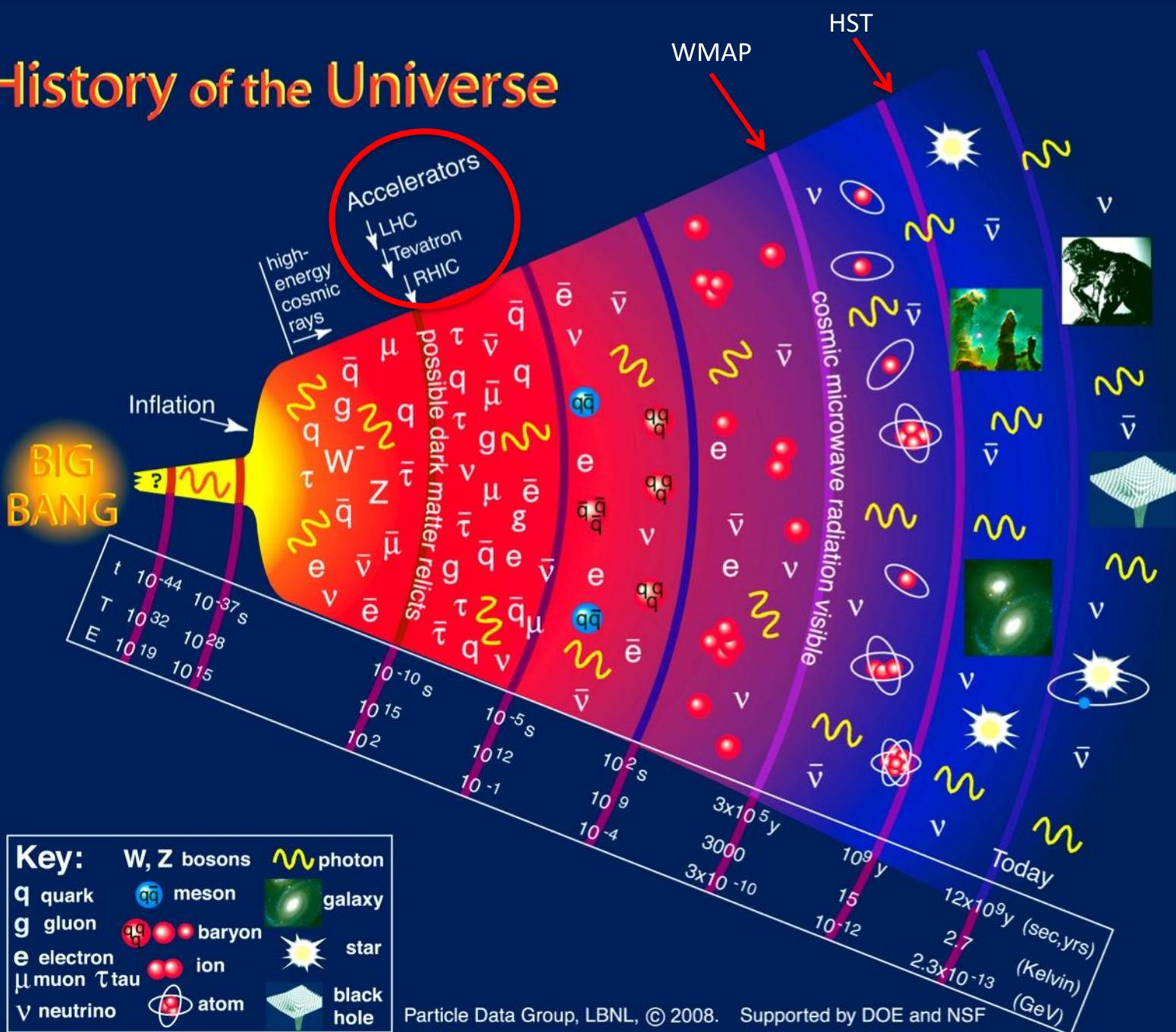
Modelo estándar, 2012

Elegante, basado en las simetrías observadas en la naturaleza.
Comprobado experimentalmente en base a predicciones muy precisas de fenómenos naturales.



+ antipartículas

History of the Universe



Einstein y la relatividad

$$E = mc^2$$

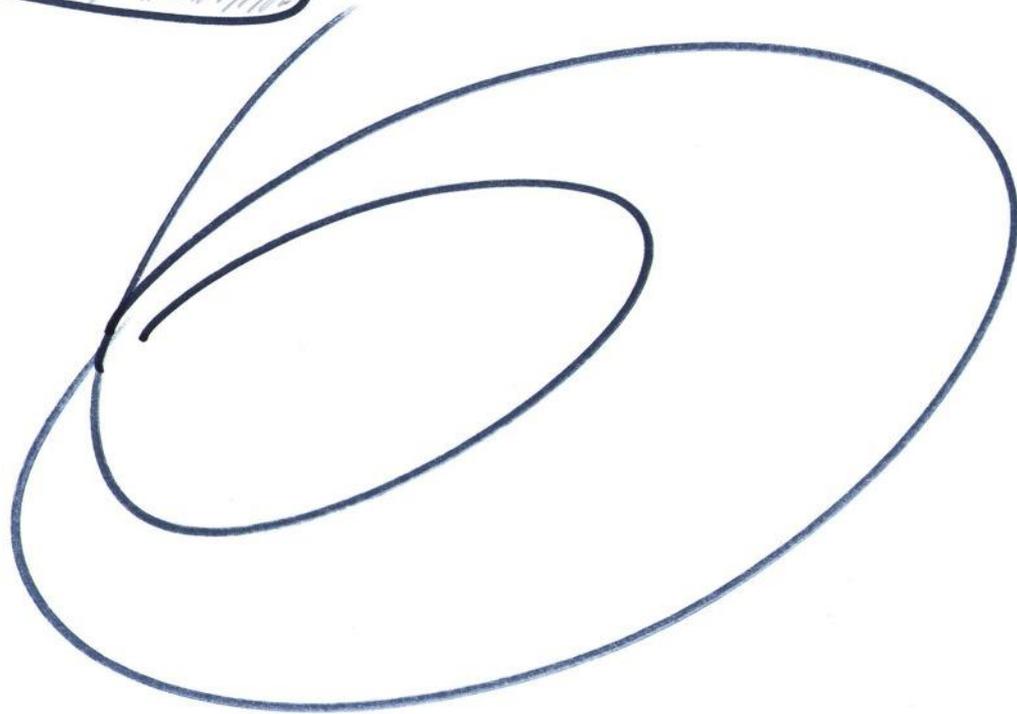
300,000 km/s

energía

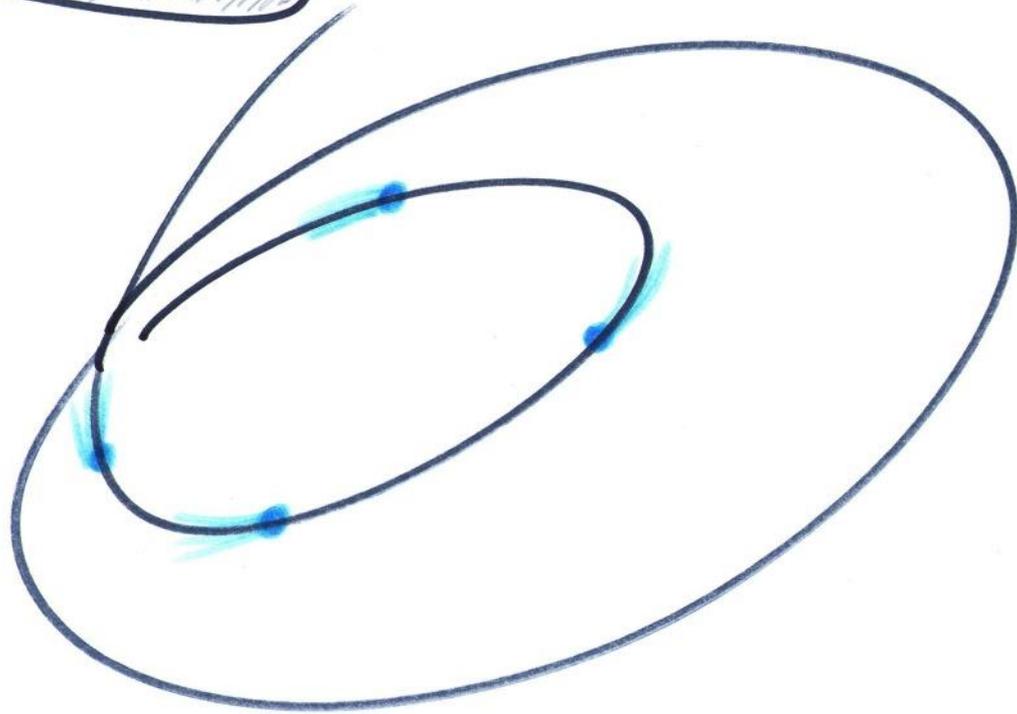
masa

≡ ●

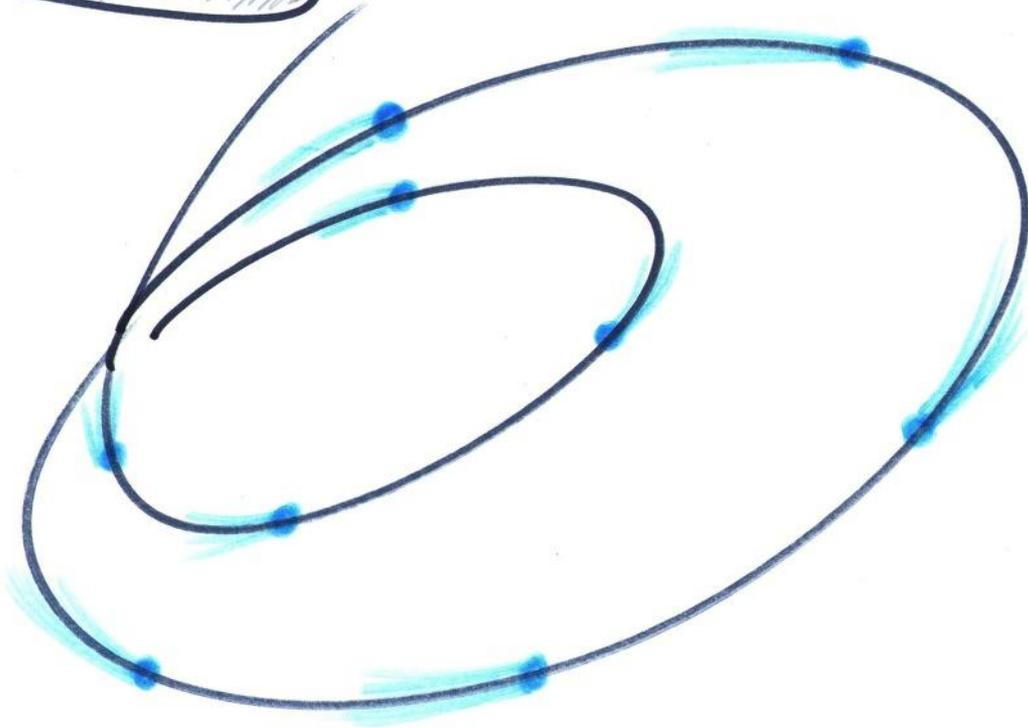
CERN

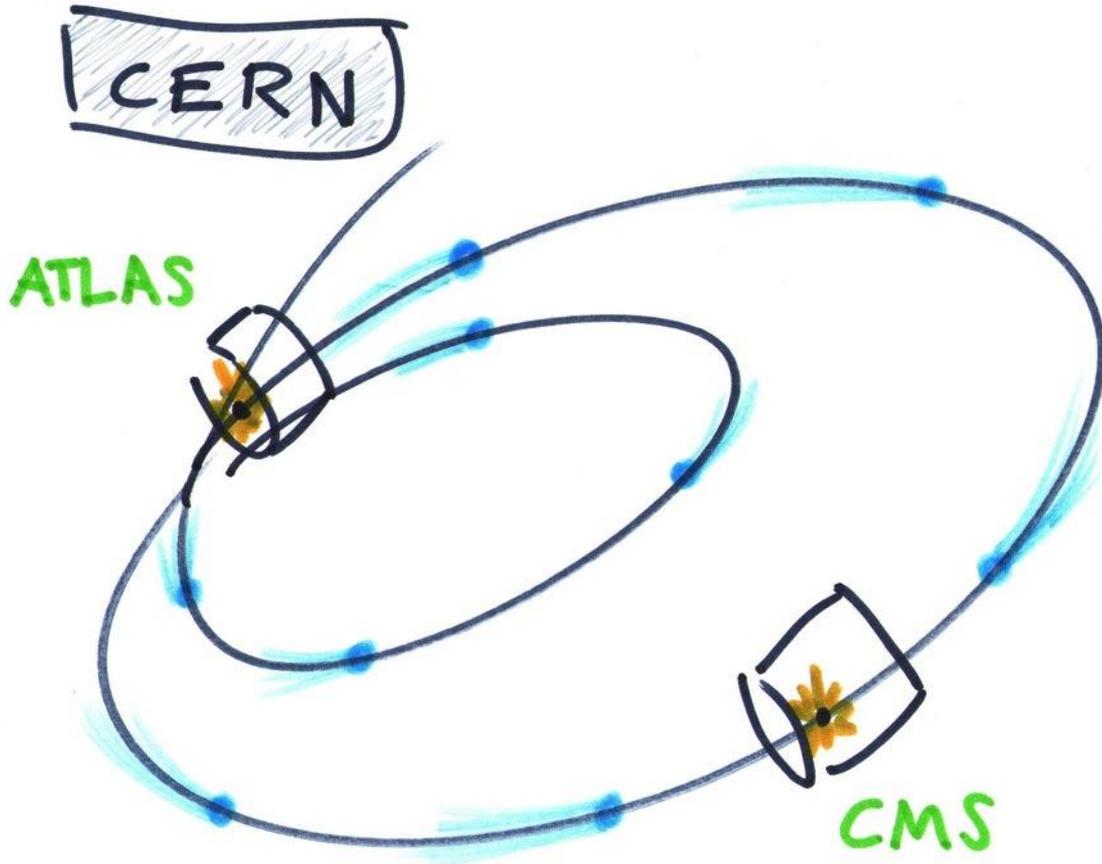


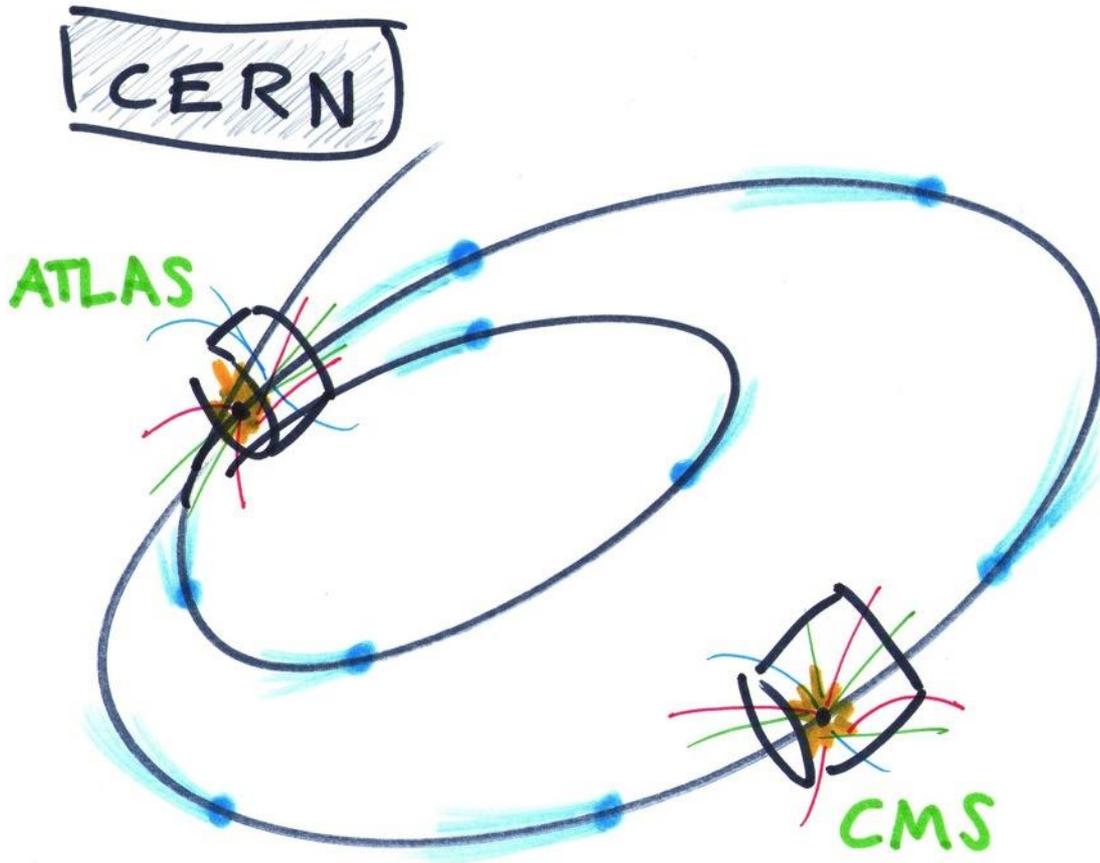
CERN



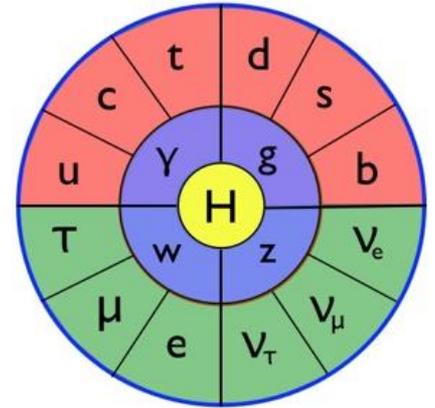
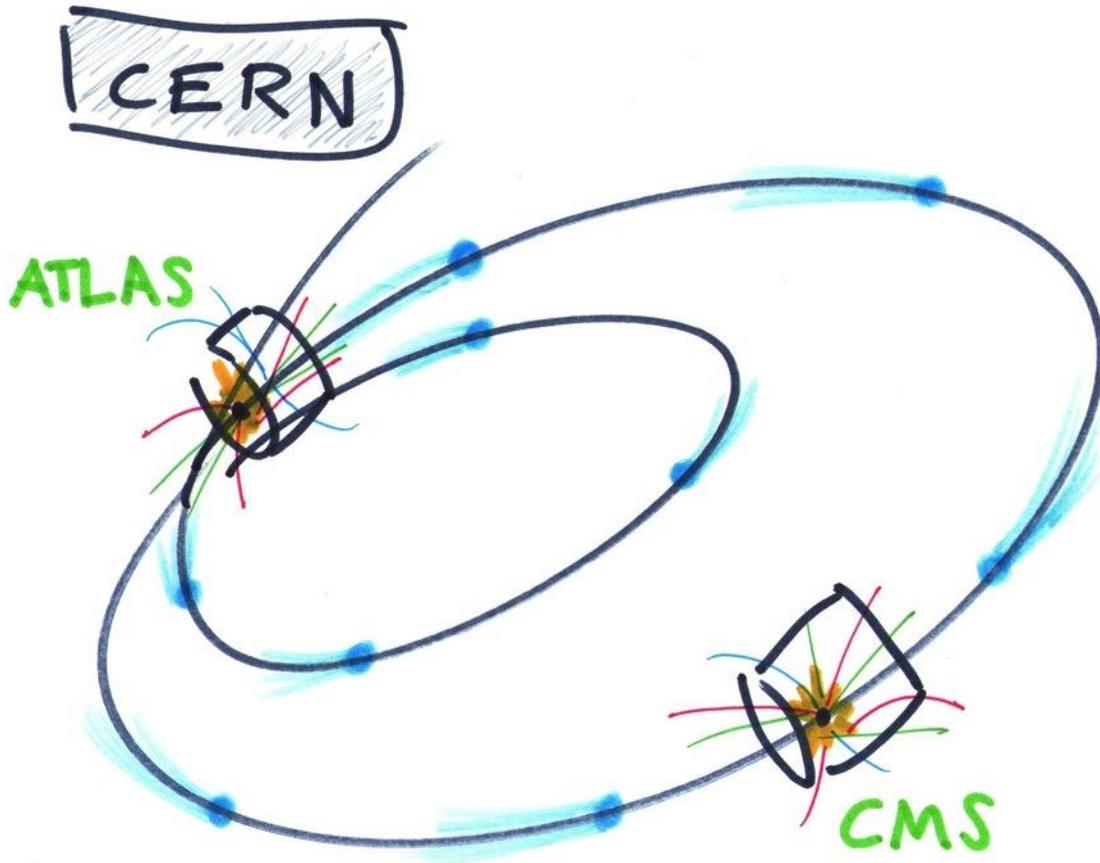
CERN







$$E = mc^2$$



??

$$E = mc^2$$

CERN



Large Hadron Collider (LHC)

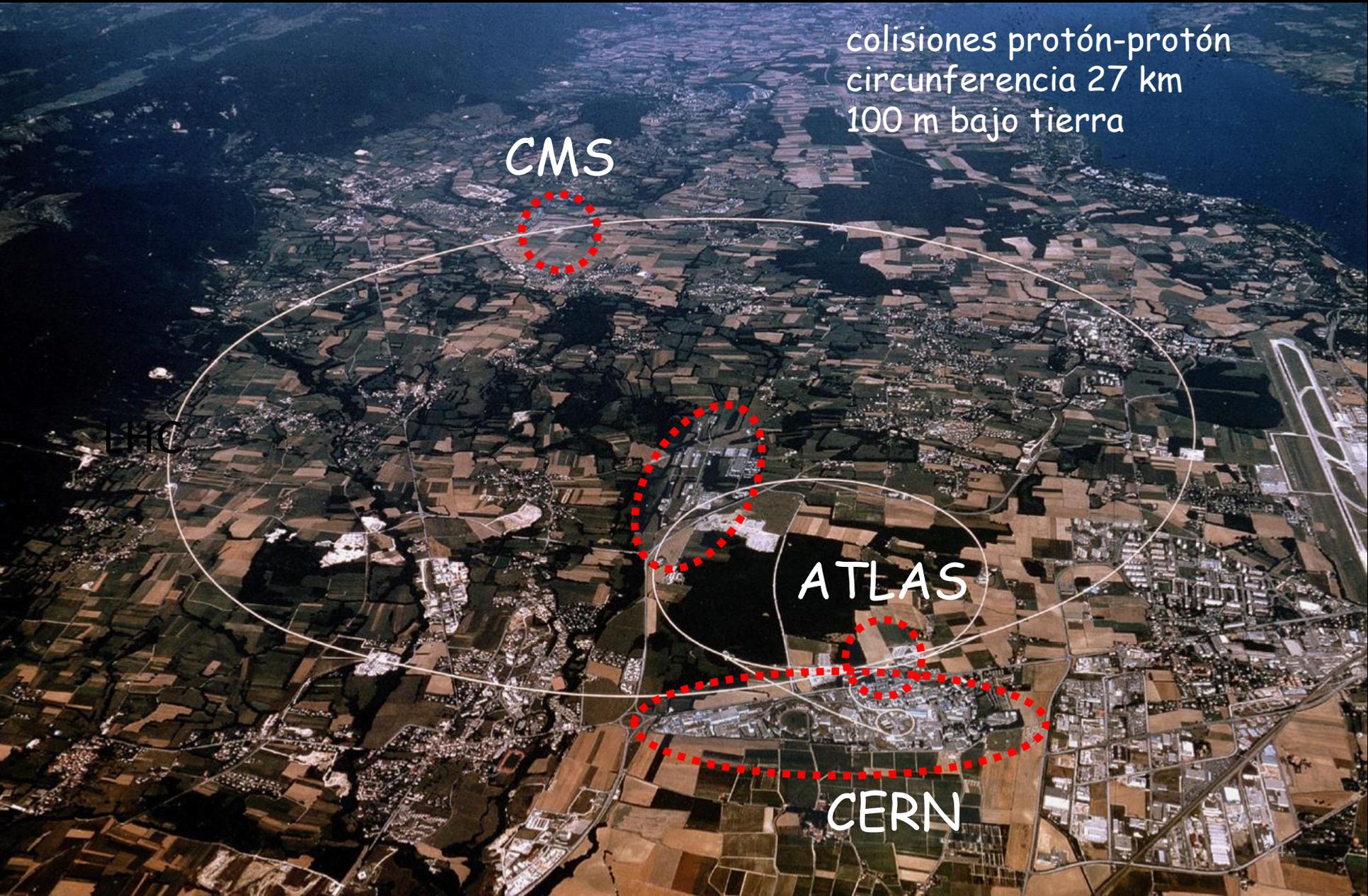
colisiones protón-protón
circunferencia 27 km
100 m bajo tierra

CMS

ATLAS

CERN

LHC



LHC: gran colisionador de hadrones

LHC hace colisionar protones al **99.999998%** de la velocidad de la luz.

masa relativista del protón $\approx 7000 m_p$



CMS Experiment at the LHC, CERN

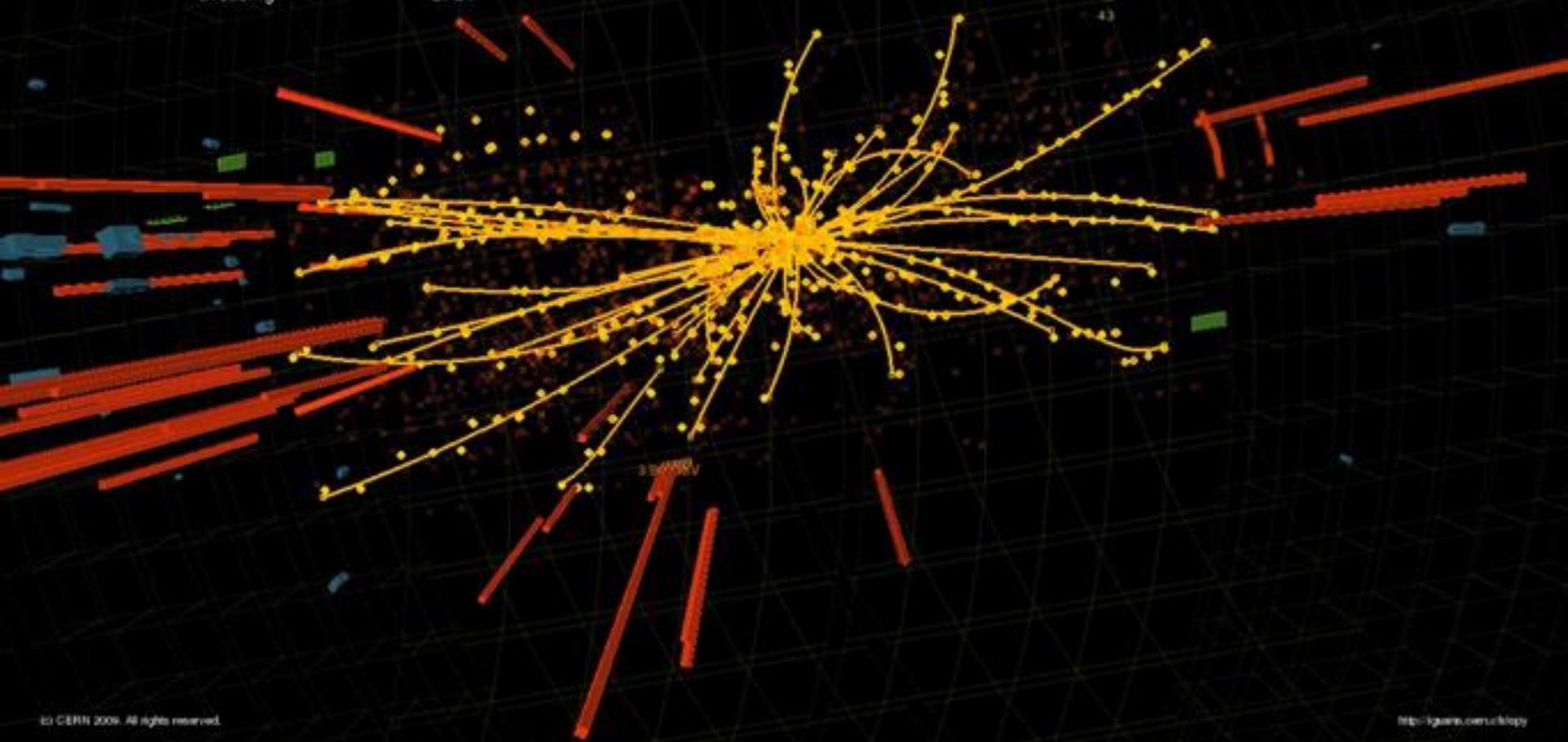
Data recorded: 2009-Dec-16 03:39:44.073862 GMT
Run: 124275
Event: 7386705
Lumi section: 25
Orbit: 26080750
Crossing: 2724

Tech Triggers:

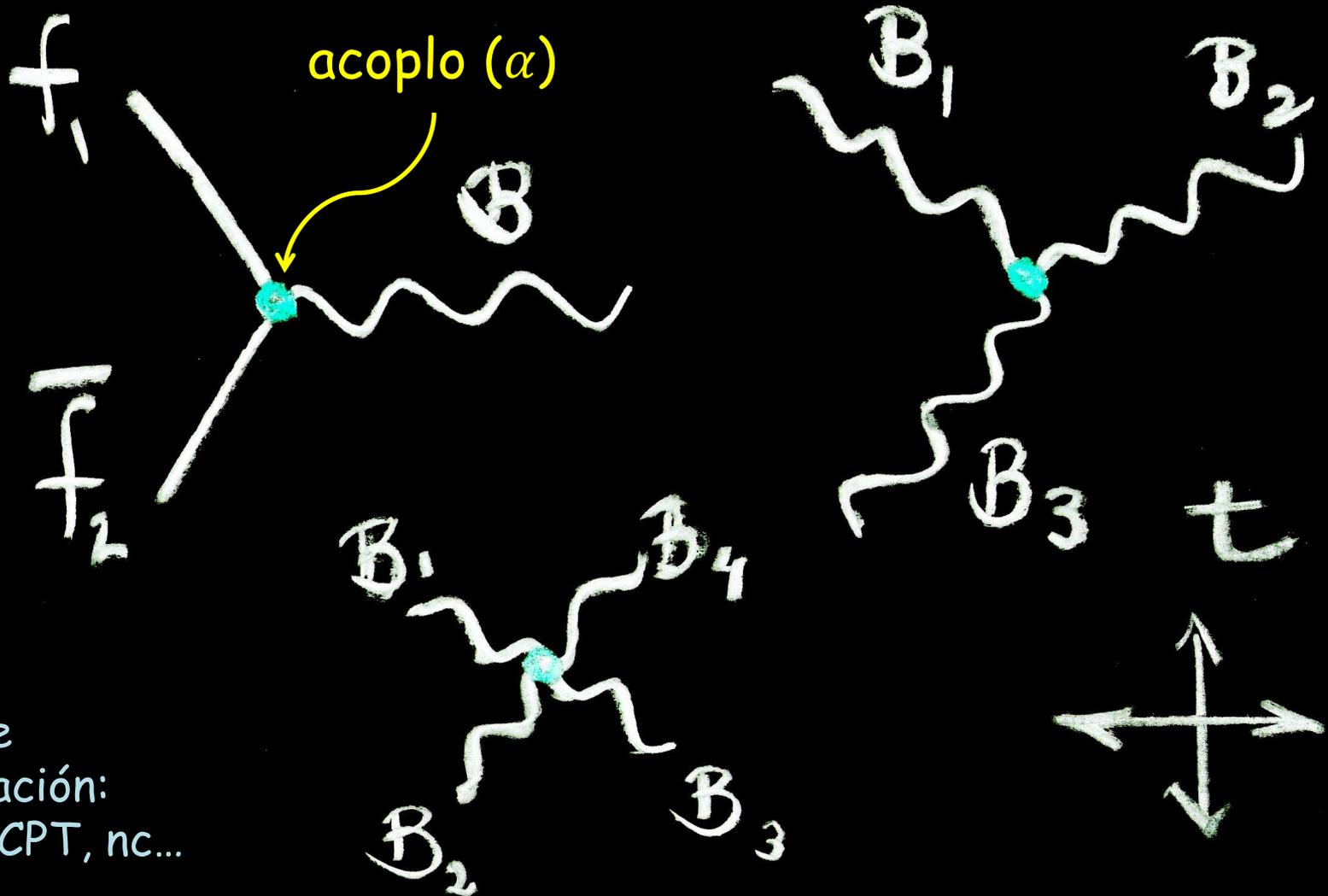
8
9
16
32
33
34
40
41
42
43

L1 Triggers:

L1_DoubleEG1
L1_EG10_Jet15
L1_EG5_TripleJet15
L1_MinBias_HTT10
L1_Mu3CEp_EG5
L1_SingleEG1



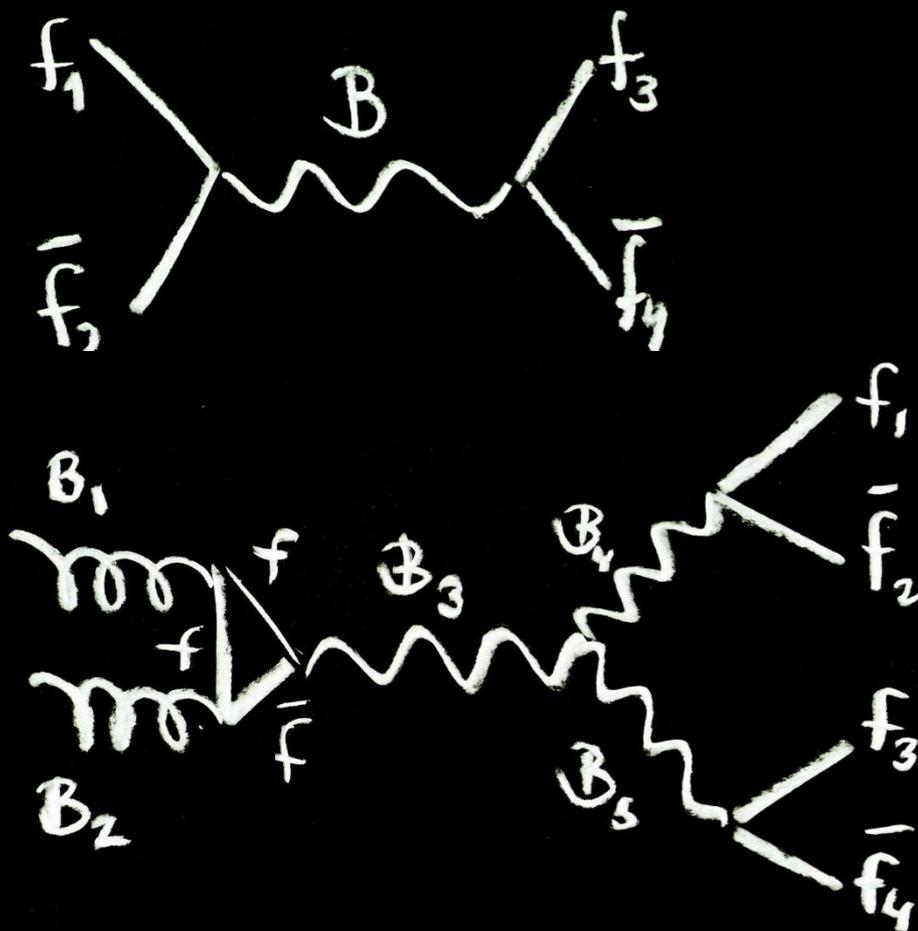
Procesos fundamentales: creación/aniquilación de partículas (desintegración).



Leyes de conservación:
P, E, Q, CPT, nc...

acoplo \rightarrow probabilidad, n^{os} cuánticos

Para medir y descubrir nuevas partículas tenemos que distinguir unos procesos de otros: **señal/ruido (S/B)**.

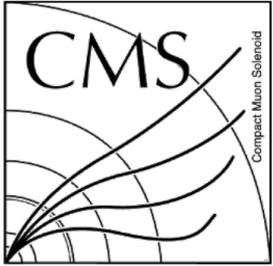


→ procesos simples

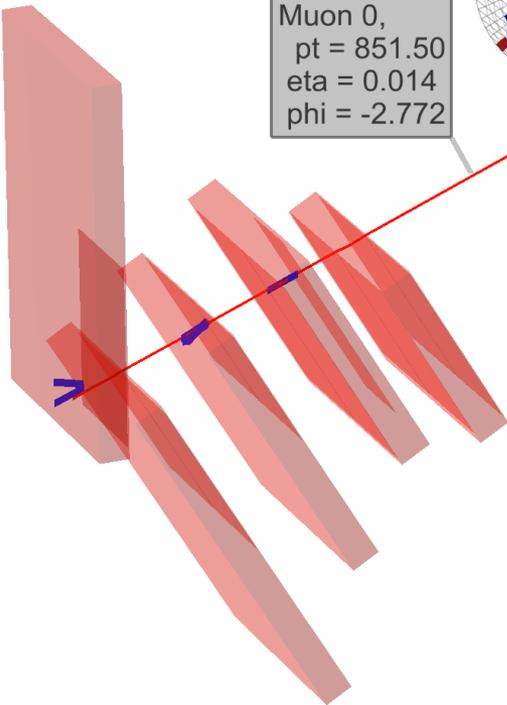
→ procesos complejos

Técnicas de análisis avanzadas explotan la cinemática de los sucesos para aumentar S/B. ¡ Tarea harto difícil !

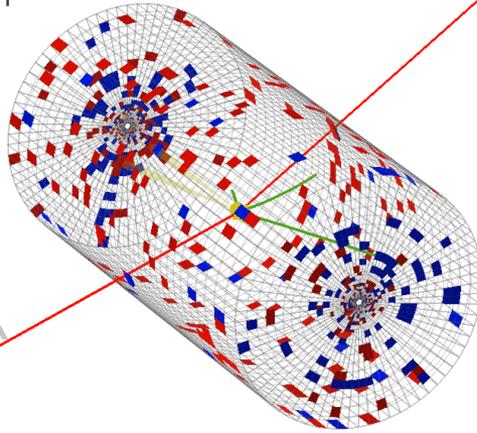
$$q\bar{q} \rightarrow X \rightarrow \mu^+\mu^-$$



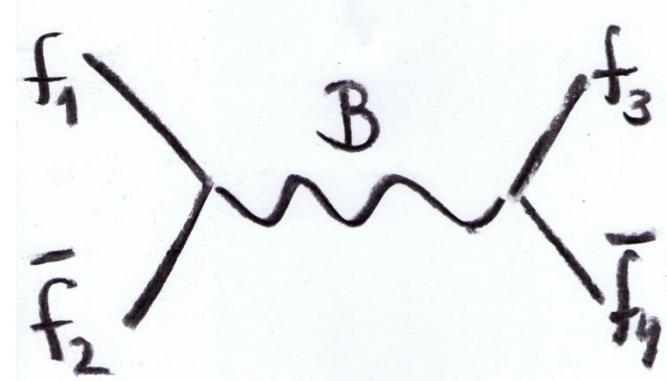
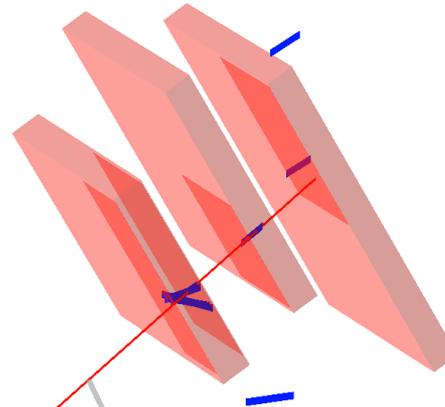
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Tue Sep 4 04:06:14 2012 GMT-4
Run/Event: 202178 / 1100609921
Lumi section: 931



Muon 0,
pt = 851.50
eta = 0.014
phi = -2.772

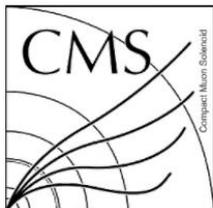


Muon 1,
pt = 827.28
eta = -0.304
phi = 0.431

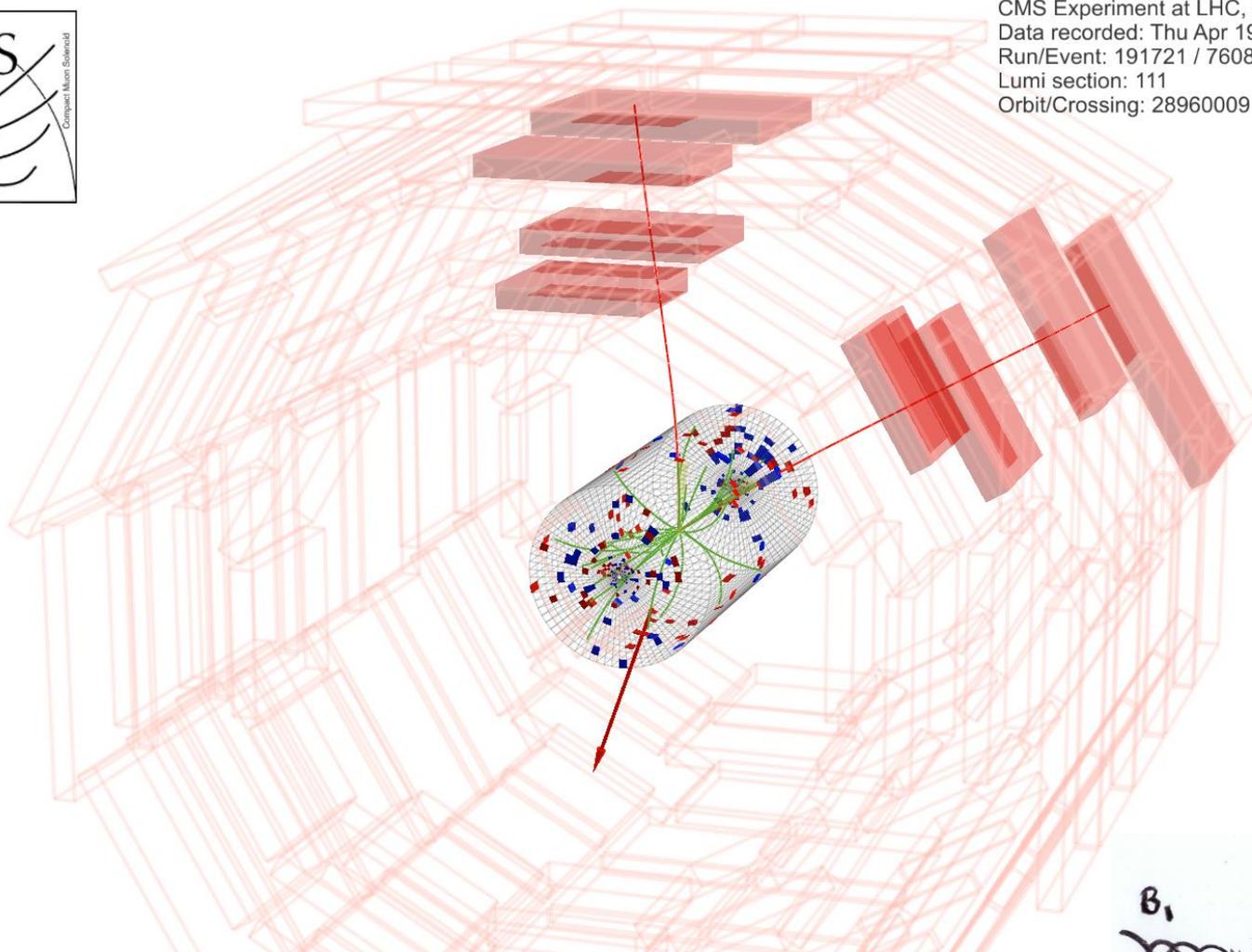


Los leptones son fáciles de identificar y medir.

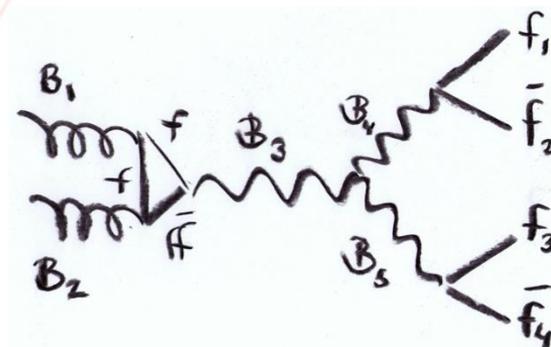
$$gg \rightarrow H \rightarrow W^+ W^- \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu \bar{\nu} \quad (i?)$$



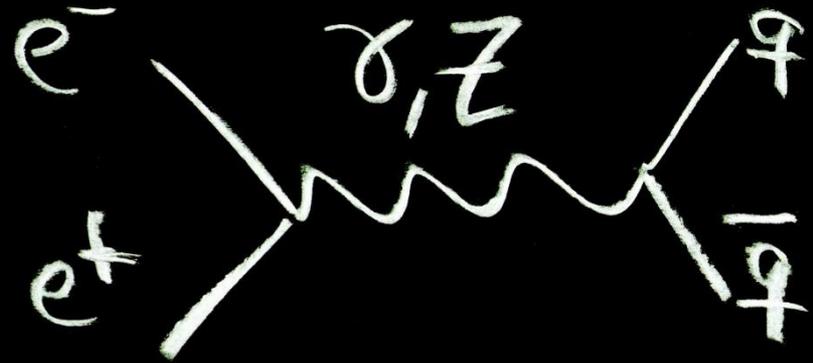
CMS Experiment at LHC, CERN
 Data recorded: Thu Apr 19 09:14:14 2012 CEST
 Run/Event: 191721 / 76089774
 Lumi section: 111
 Orbit/Crossing: 28960009 / 815



Los neutrinos son *invisibles*:
 falta energía medida, E_T^{mis} .

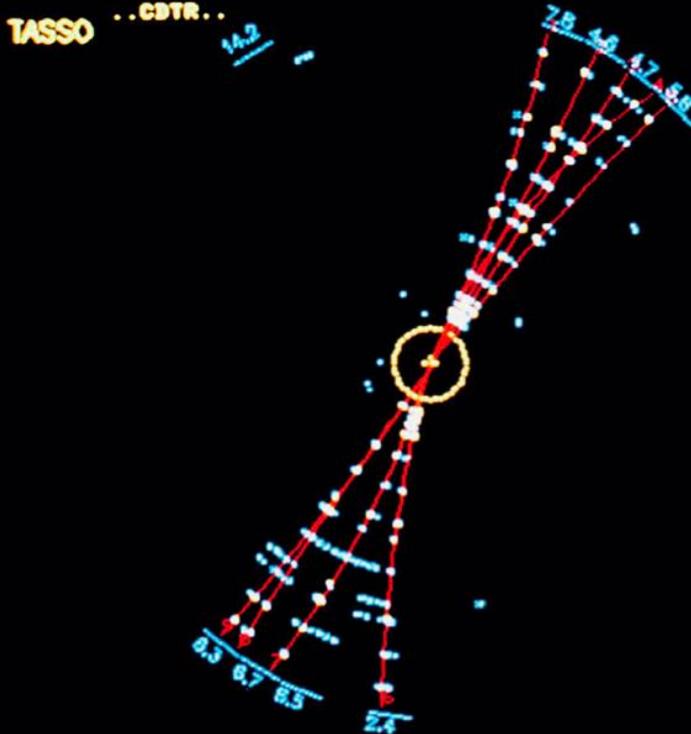


Los quarks y gluones hadronizan originando chorros de partículas cargadas y neutras: **jets**. Difíciles de reconstruir y medir.



TASSO (PETRA, DESY)

TPL:PFEE RUN 5420 EVENT 13990 EDEAN- 1
DATE 18-JUL-84 VERSION 9.0 TRIGGER= 00001011

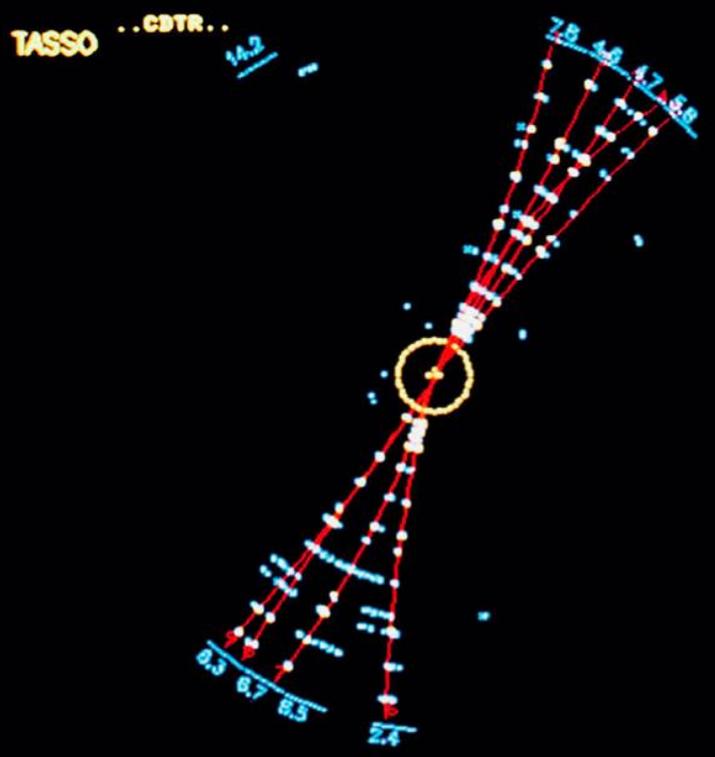


Los quarks y gluones hadronizan originando chorros de partículas cargadas y neutras: **jets**. Difíciles de reconstruir y medir.



TASSO (PETRA, DESY)

TPL:FFEE RUN 5420 EVENT 13990 EDEAN= 1
DATE 18-JUL-84 VERSION 9.0 TRIGGER= 00001010



TPL:FFEE RUN 2030 EVENT 5940 EDEAN=
DATE 25-JUL-84 VERSION 9.0 TRIGGER= 010010



Los quarks y gluones hadronizan originando chorros de partículas cargadas y neutras: **jets**. Difíciles de reconstruir y medir.



TASSO (PETRA, DESY)

TPL:FFEE
DATE 18-JUL-84
RUN 5420 EVENT 13990 EDEAN= 1
VERSION 9.0 TRIGGER= 00001010

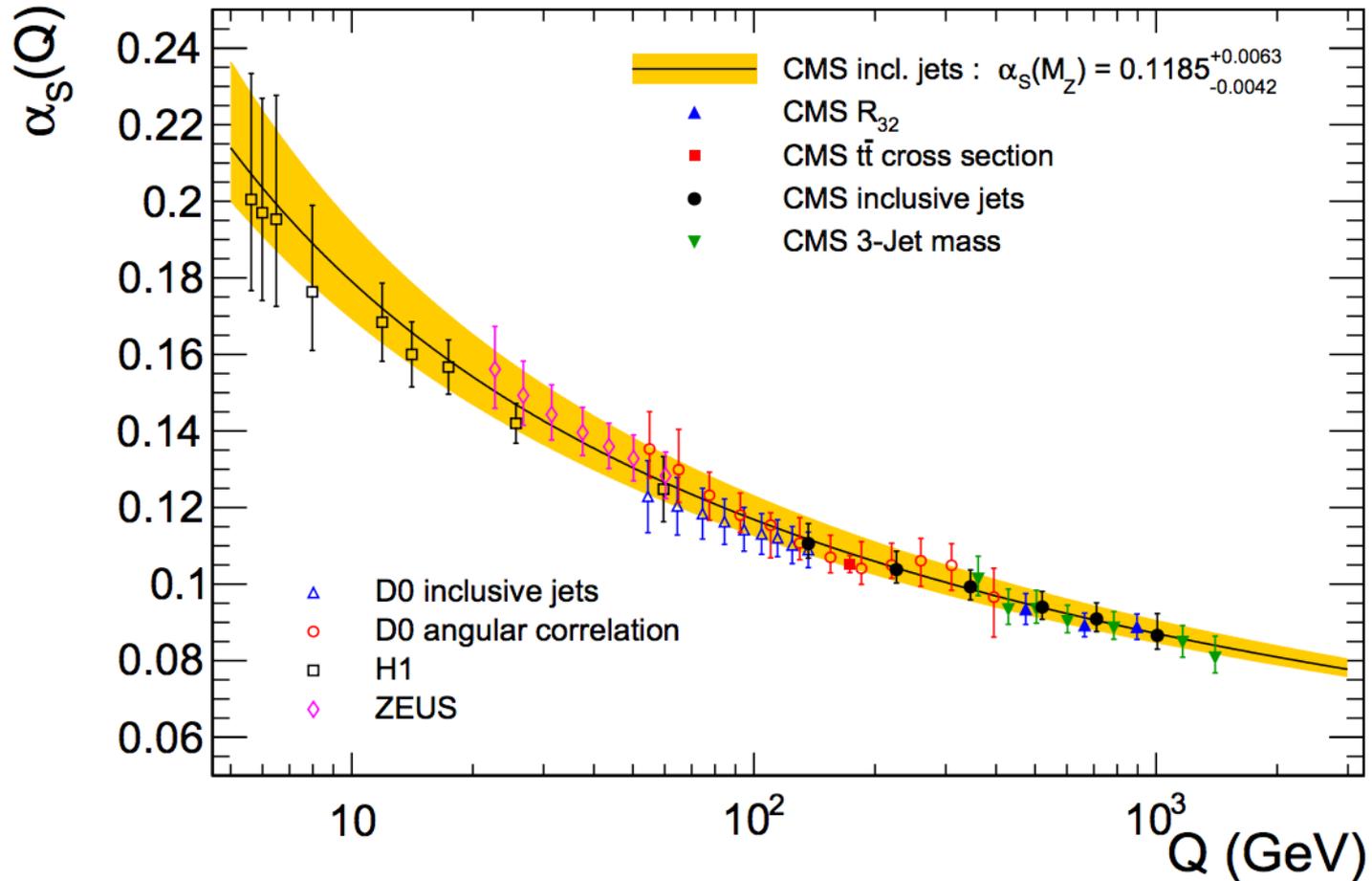


TPL:FFEE
DATE 25-JUL-84
RUN 2030 EVENT 5940 EDEAN=
VERSION 9.0 TRIGGER= 010010



Todas las medidas de sucesos con jets dependen de α_s

A partir del análisis de eventos con **jets** medimos la constante de acoplo fuerte, α_s .



Libertad asintótica: la intensidad de la interacción disminuye con la energía, Q .

Conservación de la energía: $E = mc^2$



Conservación de la energía: $E = mc^2$



$$E(Z) \approx m_Z \ll 2m_e \Rightarrow q \neq t$$

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

Conservación de la energía: $E = mc^2$

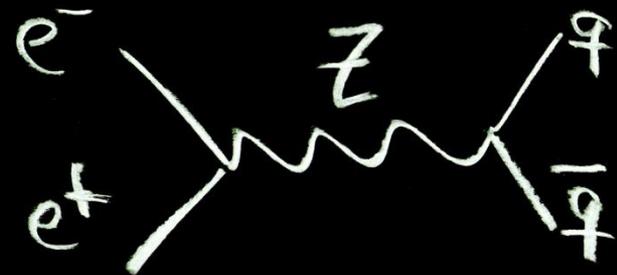
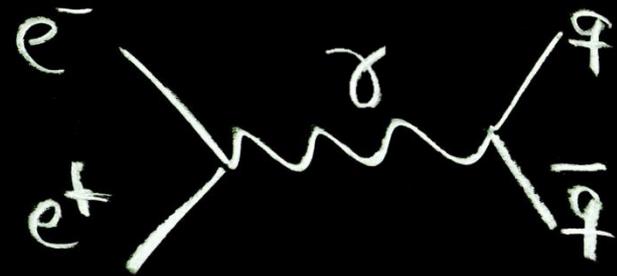


$$E(Z) \approx m_Z \ll 2m_f \Rightarrow q \neq f$$

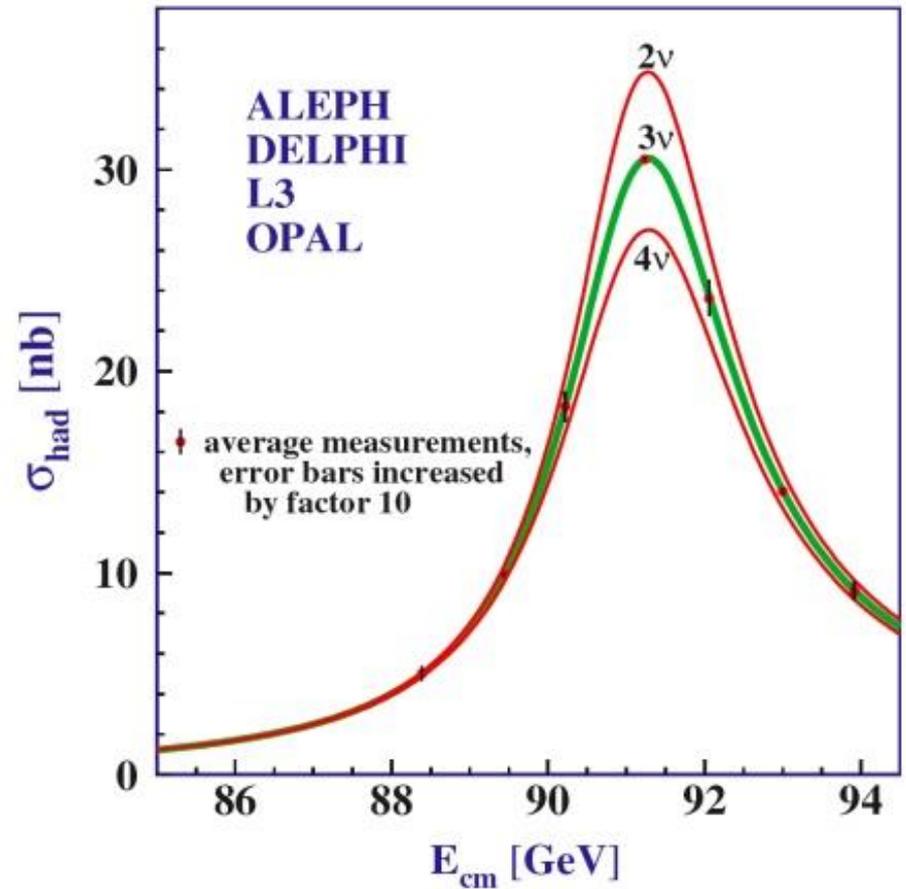
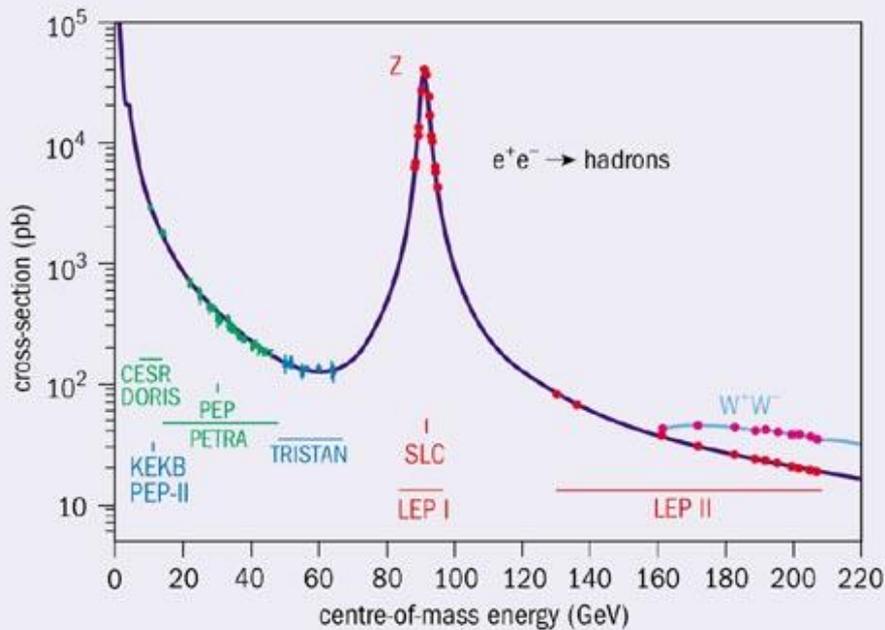
por tanto $Z \rightarrow f\bar{f}$

Si $E(e^+e^-) \ll m_Z \Rightarrow e.m.$

Si $E(e^+e^-) \gtrsim m_Z \Rightarrow E.W.$



Medida del número de familias de fermiones a partir de la sección eficaz, $\sigma(e^+e^- \rightarrow qq)$ (LEP).



La sección eficaz, $\sigma = N/\mathcal{L} \approx n^\circ$ de eventos, depende de la energía de la colisión.

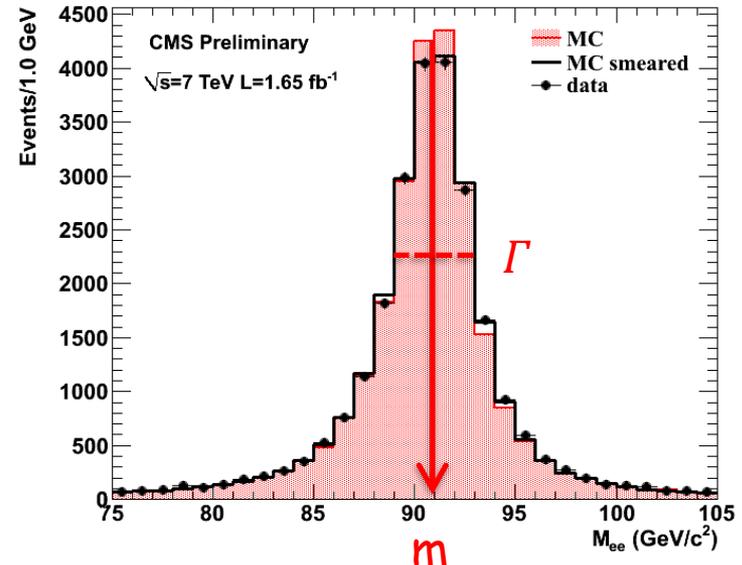
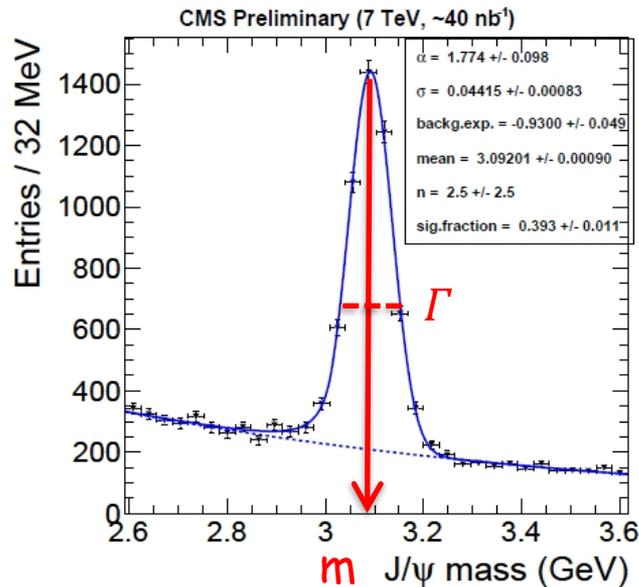
Masa y virtualidad

Masa \neq valor fijo $\Rightarrow \Delta E \Delta t \approx \hbar \Rightarrow \Delta M \Delta t \approx \hbar/c^2$

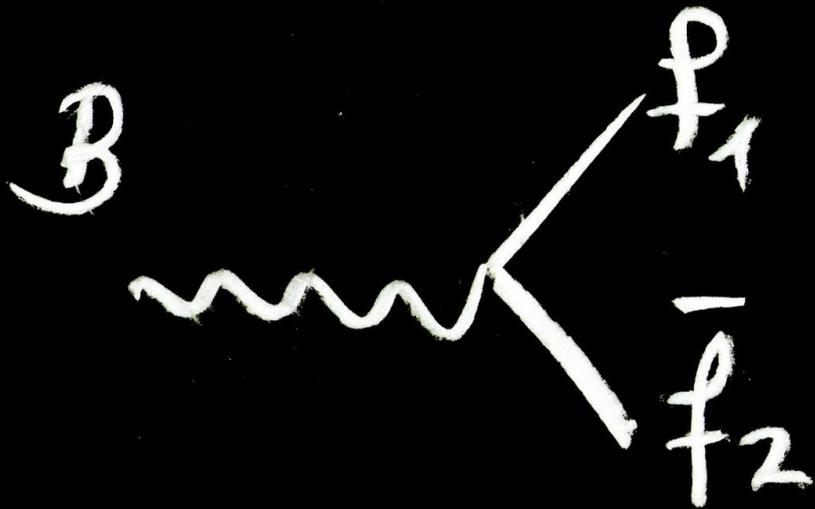
$$\Delta M \approx \frac{\hbar}{c^2 \Delta t} \rightarrow \text{anchura natural de la partícula } (\Gamma)$$

La masa tiene una distribución de probabilidad (**resonancia**) con anchura $\Gamma = \hbar/\tau$ y valor medio m .

Las partículas tienen una masa $\neq m$ y solo vive un tiempo Δt .



Identificación de sucesos

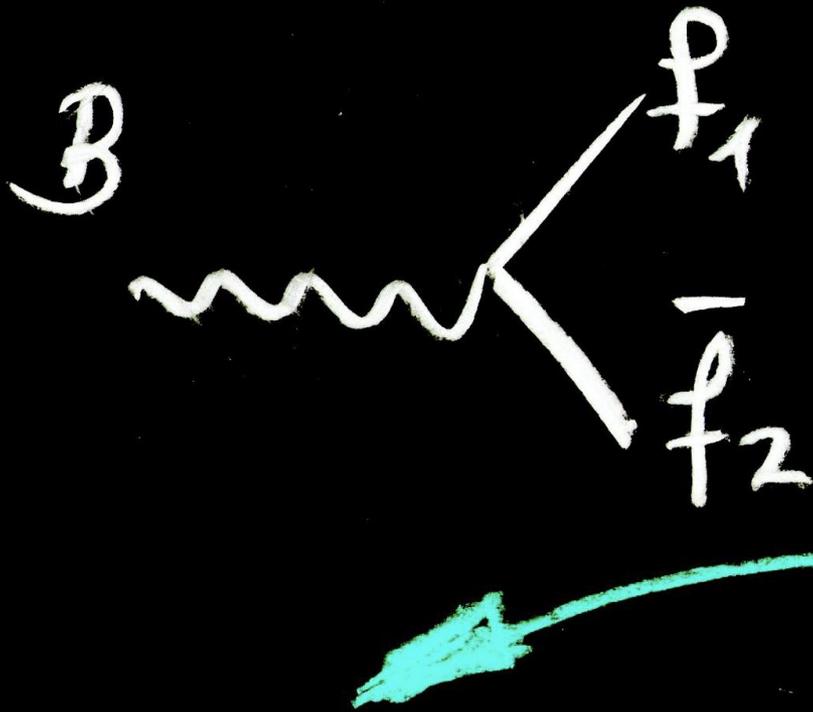


$$c = 1$$

$$E_B = E(f_1 f_2^-)$$

$$E^2 = m^2 + p^2$$

Identificación de sucesos



$$c = 1$$

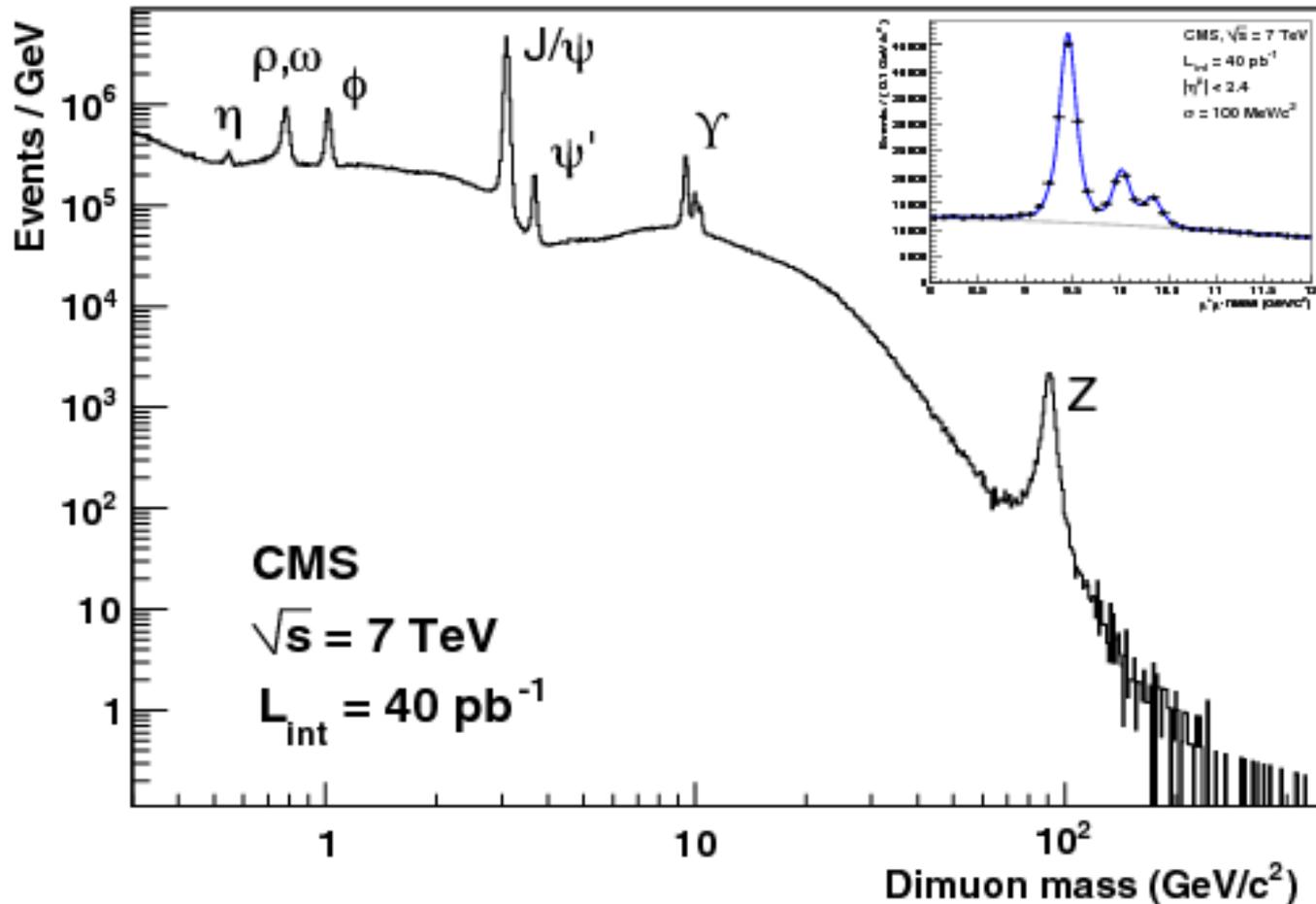
$$E_B = E(f_1 f_2^-)$$

$$E^2 = m^2 + p^2$$

$$m_B^2 = (E_1 + E_2)^2 - |\vec{p} + \vec{q}|^2$$

Mido E y $p \Rightarrow$ calculo m_B

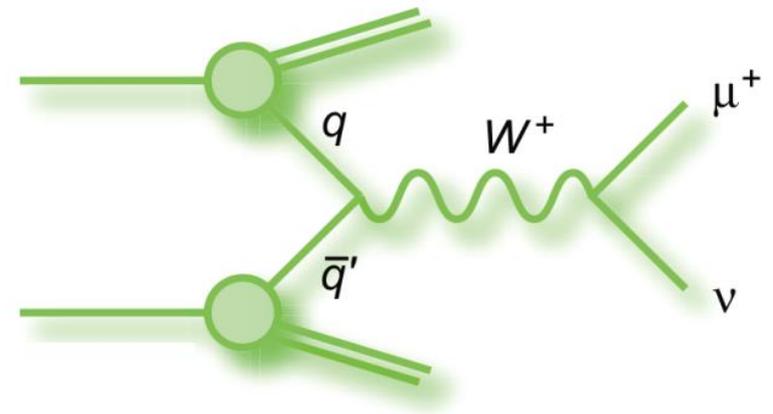
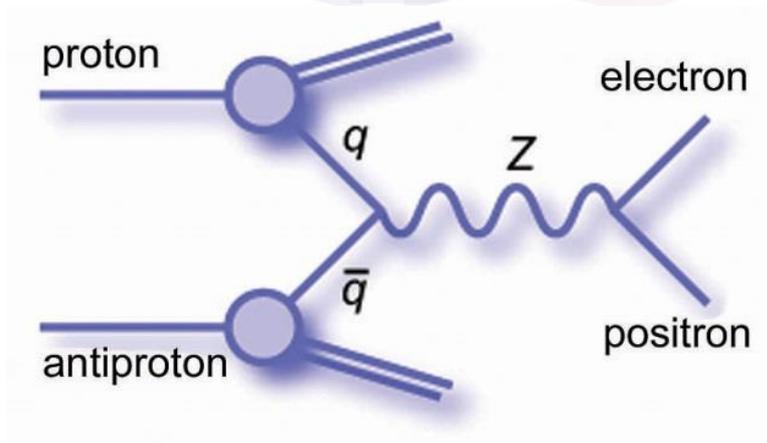
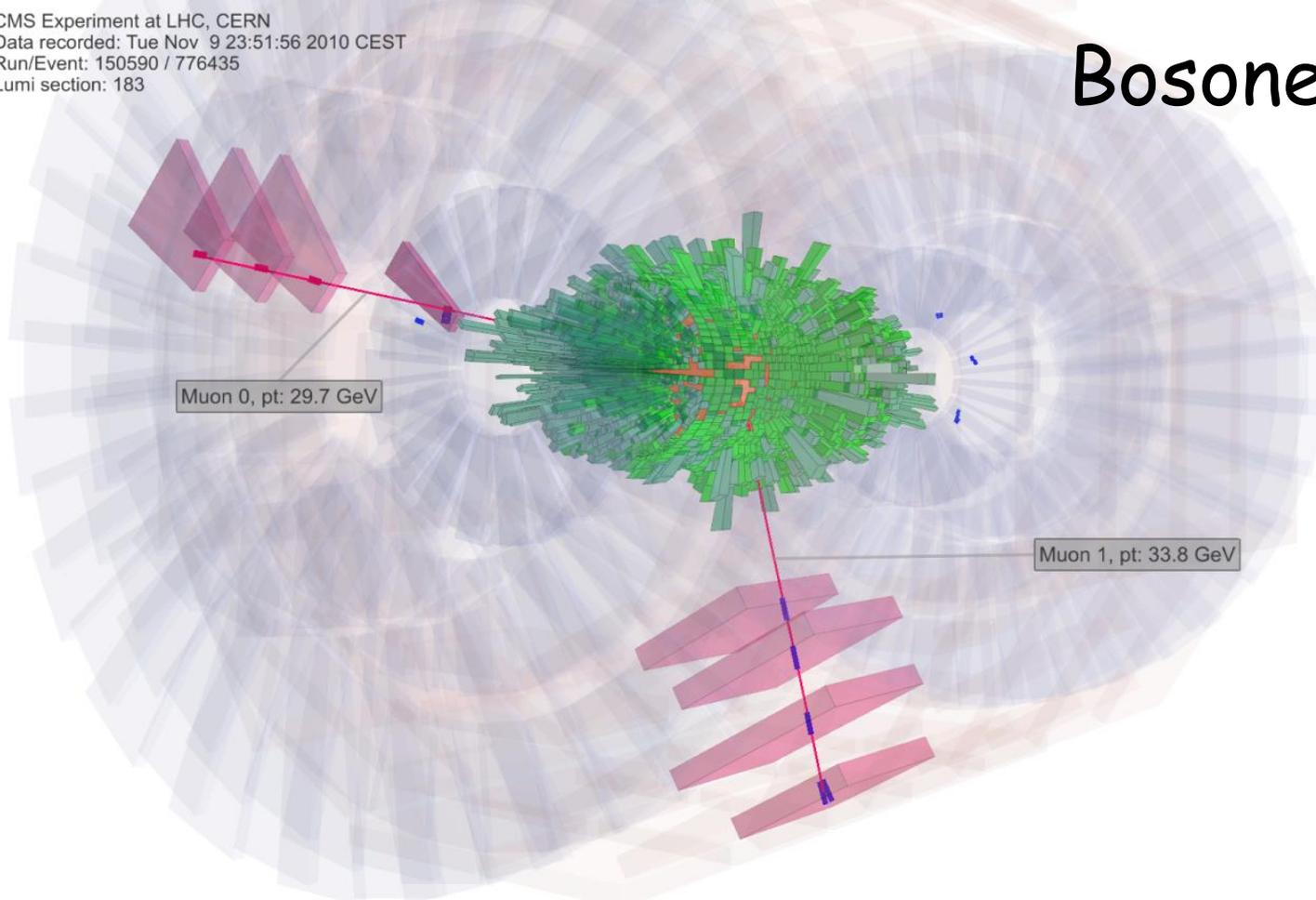
Espectro de masa de $\mu^+\mu^-$

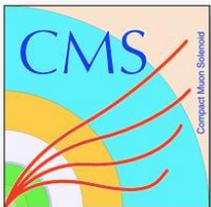


A partir de la masa distinguimos partículas.
También usamos el p_T de las partículas hijas, su distancia al vértice de interacción, E_T^{mis} , ...



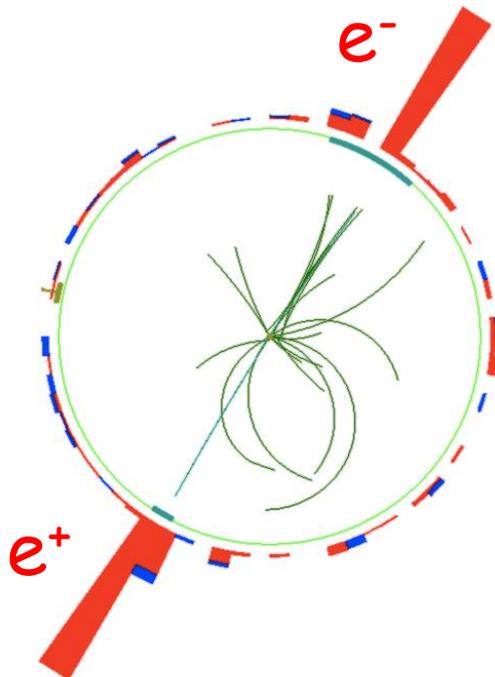
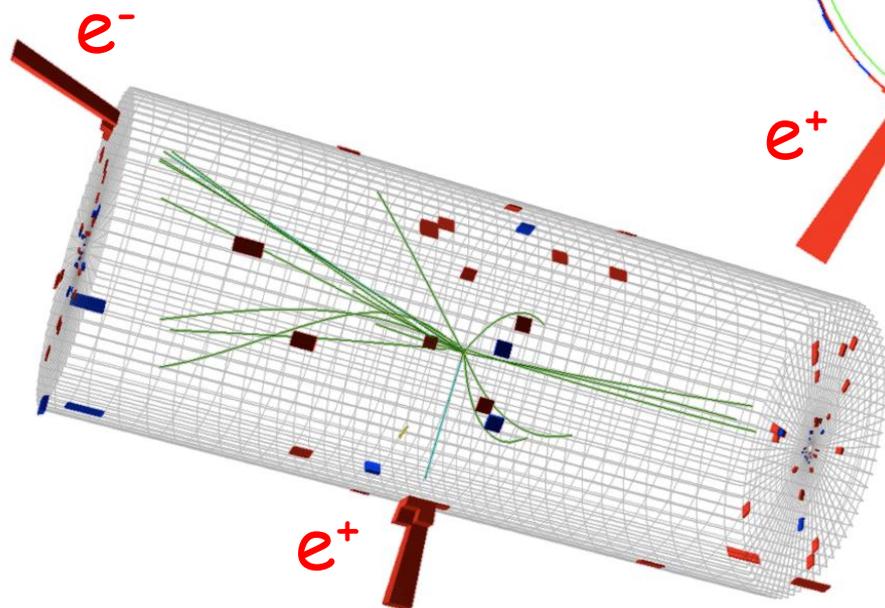
Bosones W γ Z





CMS Experiment at LHC, CERN
Run 133877, Event 28405693
Lumi section: 387
Sat Apr 24 2010, 14:00:54 CEST

Electrons $p_T = 34.0, 31.9$ GeV/c
Inv. mass = 91.2 GeV/c²

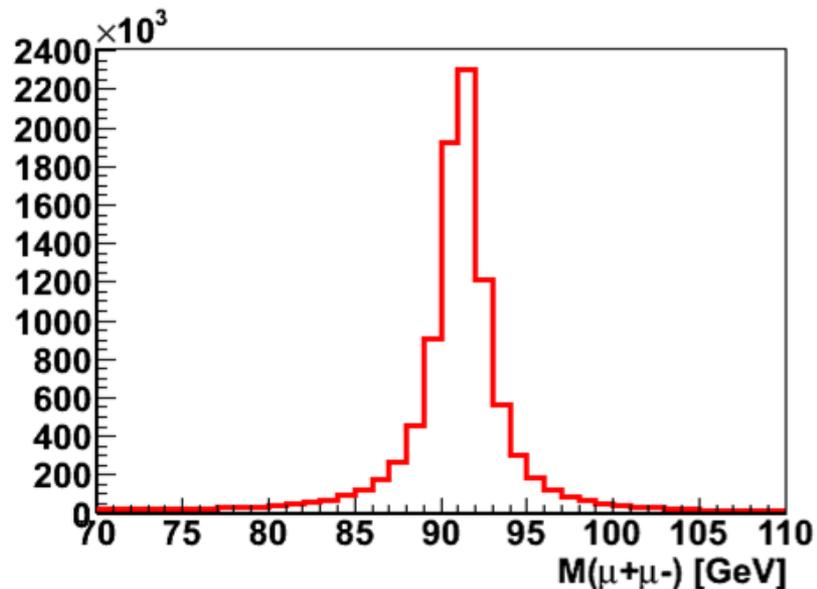


Candidato a Z:

2 *leptones*
cargados del mismo
sabor (e, μ) y
carga opuesta.

Balanceados en el
plano transversal.

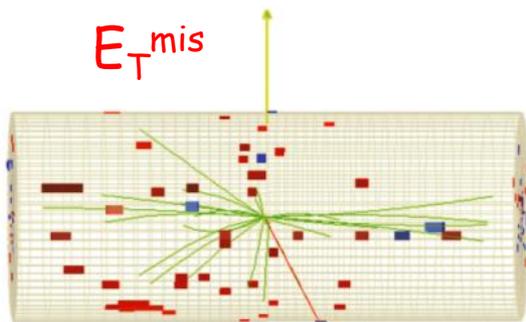
$$pp \rightarrow Z+X \rightarrow e^+e^-+X$$





CMS Experiment at LHC, CERN
 Run 133875, Event 1228182
 Lumi section: 16
 Sat Apr 24 2010, 09:08:46 CEST

Muon $p_T = 38.7$ GeV/c
 $ME_T = 37.9$ GeV
 $M_T = 75.3$ GeV/c²

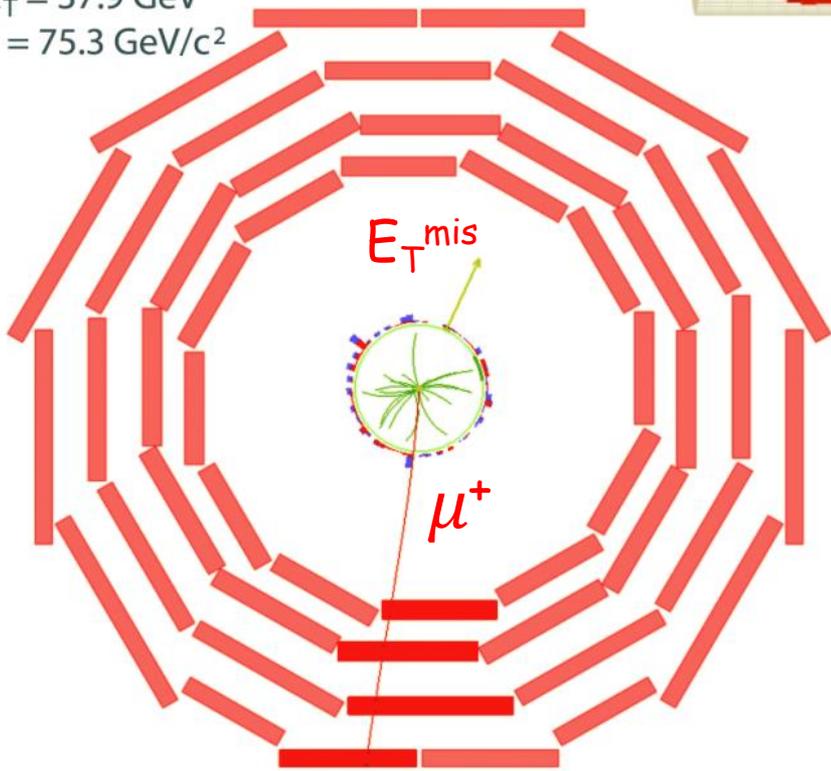


E_T^{mis}

Candidato a W:

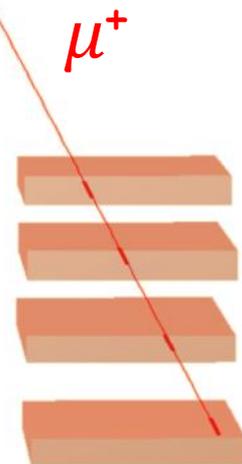
1 *leptón cargado* (e, μ)
 y un *neutrino* (E_T^{mis}).

El neutrino se manifiesta por la *falta aparente de conservación de energía-momento*.



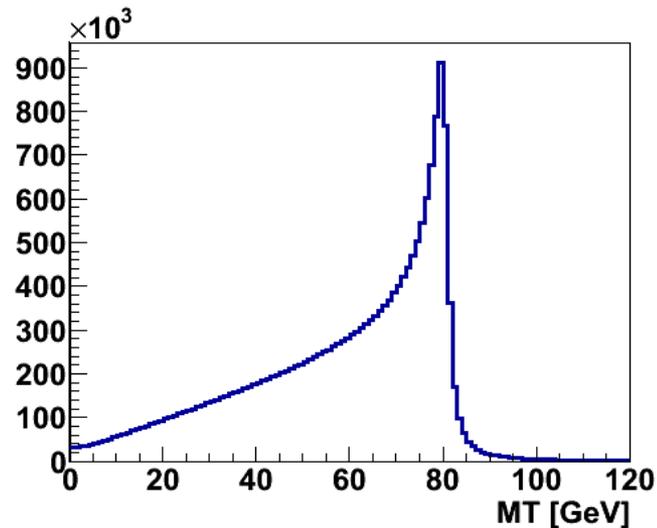
E_T^{mis}

μ^+

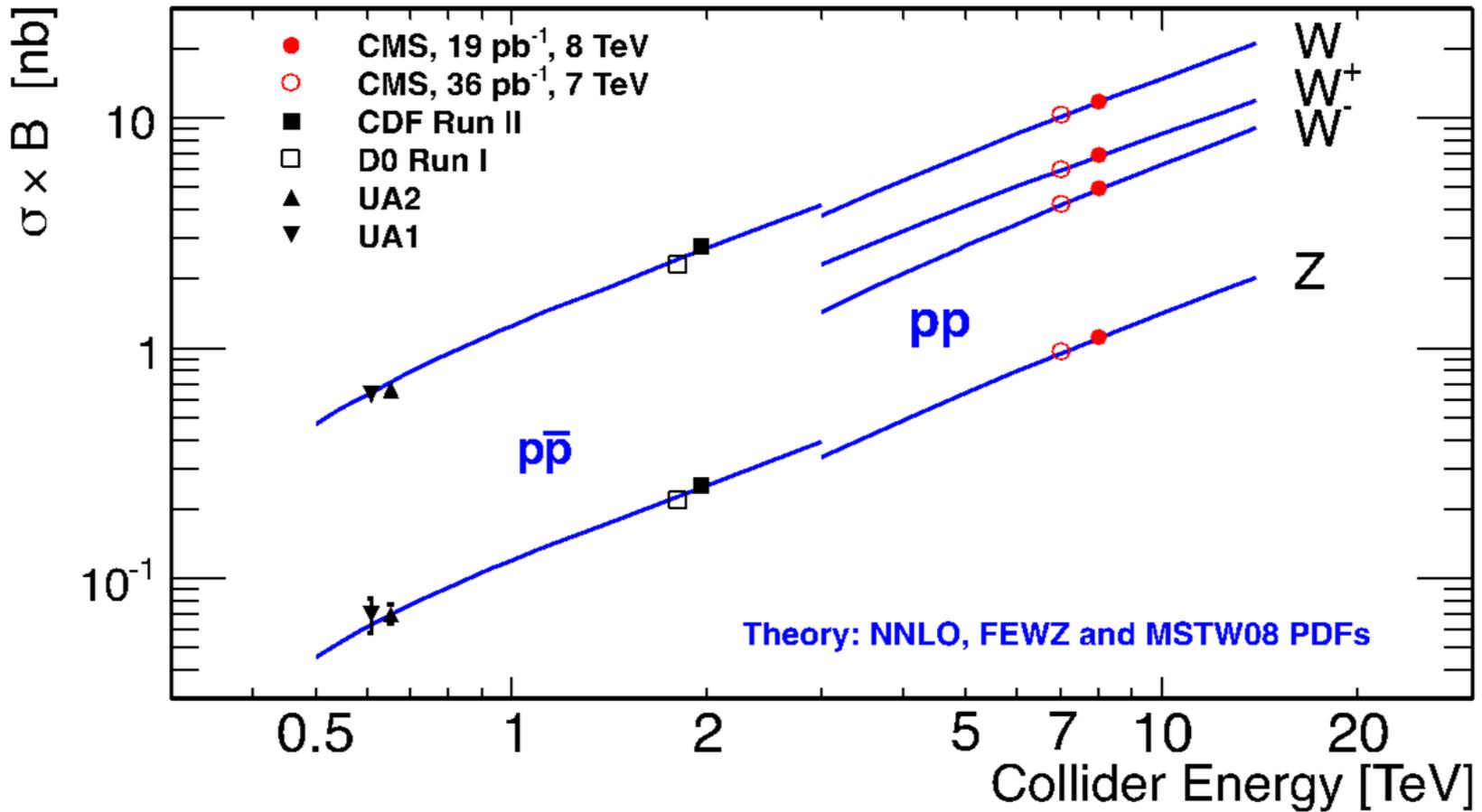


μ^+

$$pp \rightarrow W+X \rightarrow \mu^+\nu+X$$



$\sigma(W)$ y $\sigma(Z)$

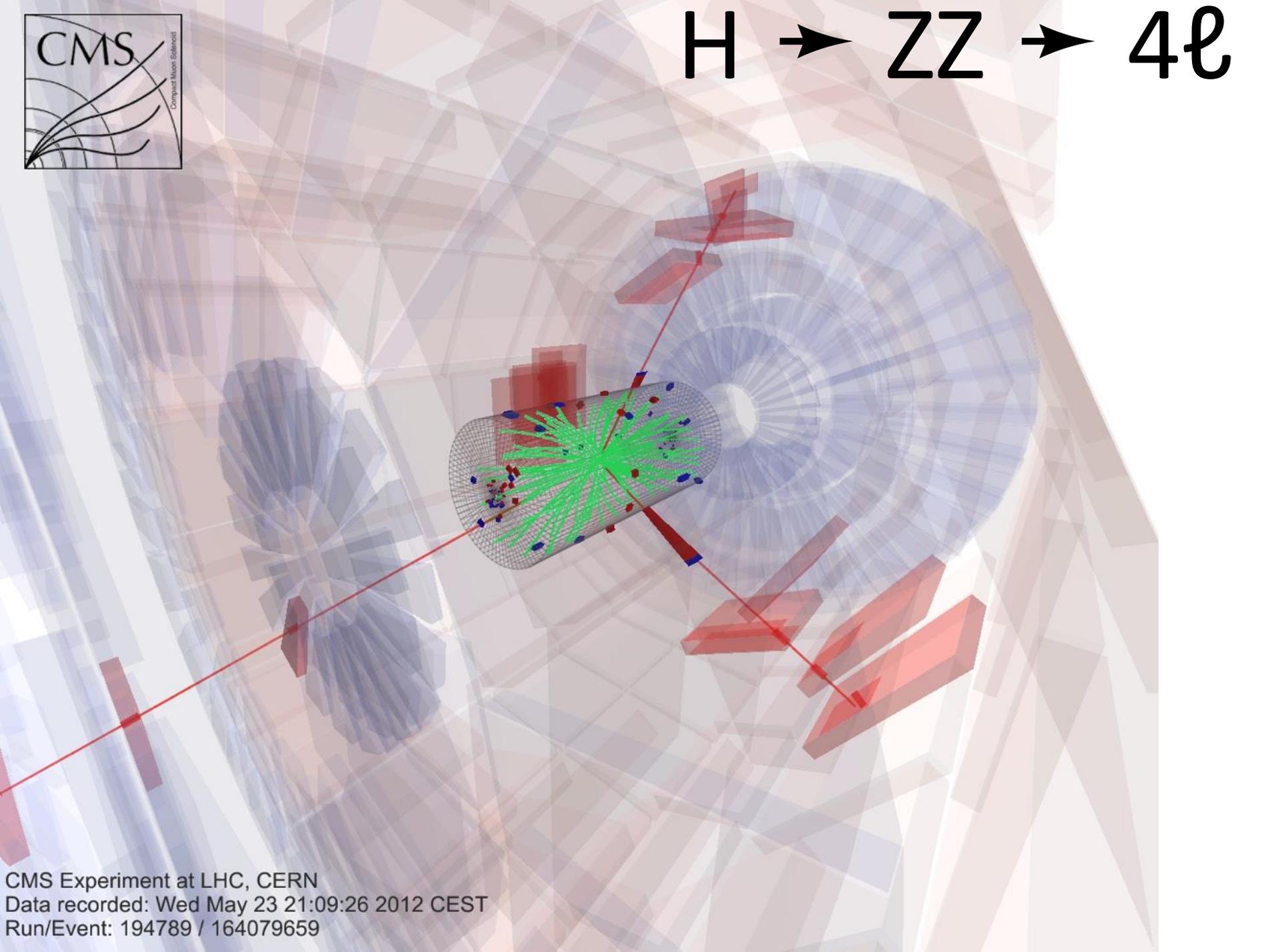


Las predicciones teóricas de la *evolución de la sección eficaz* con la energía están de acuerdo con las medidas experimentales.

Los *cocientes W^+/W^- y W/Z* se miden con *mayor precisión*.

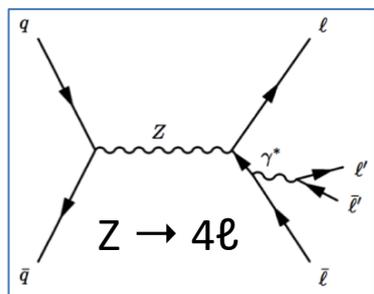


$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$

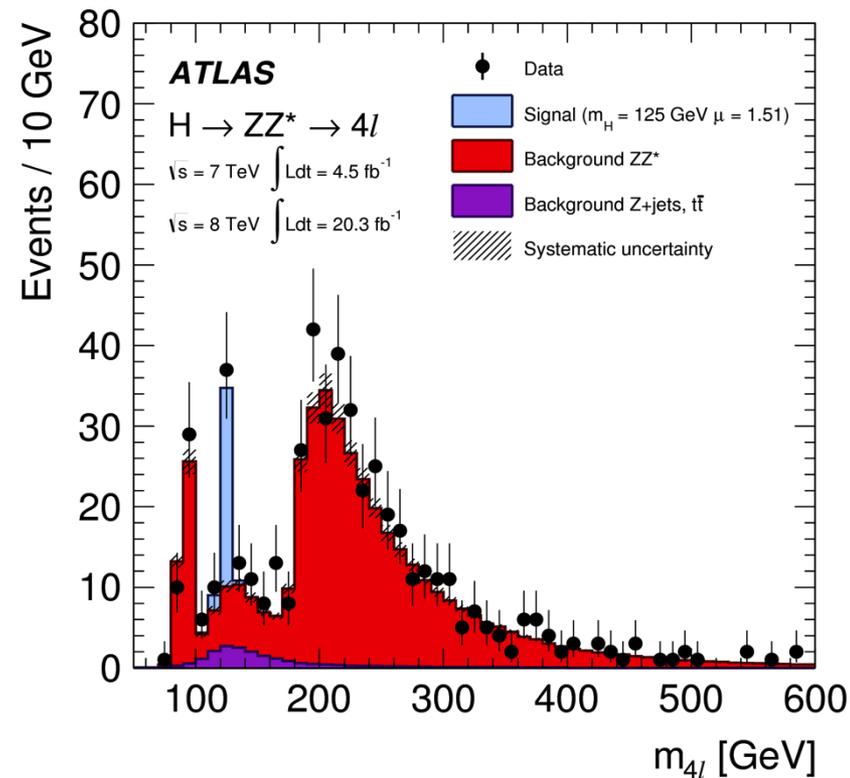
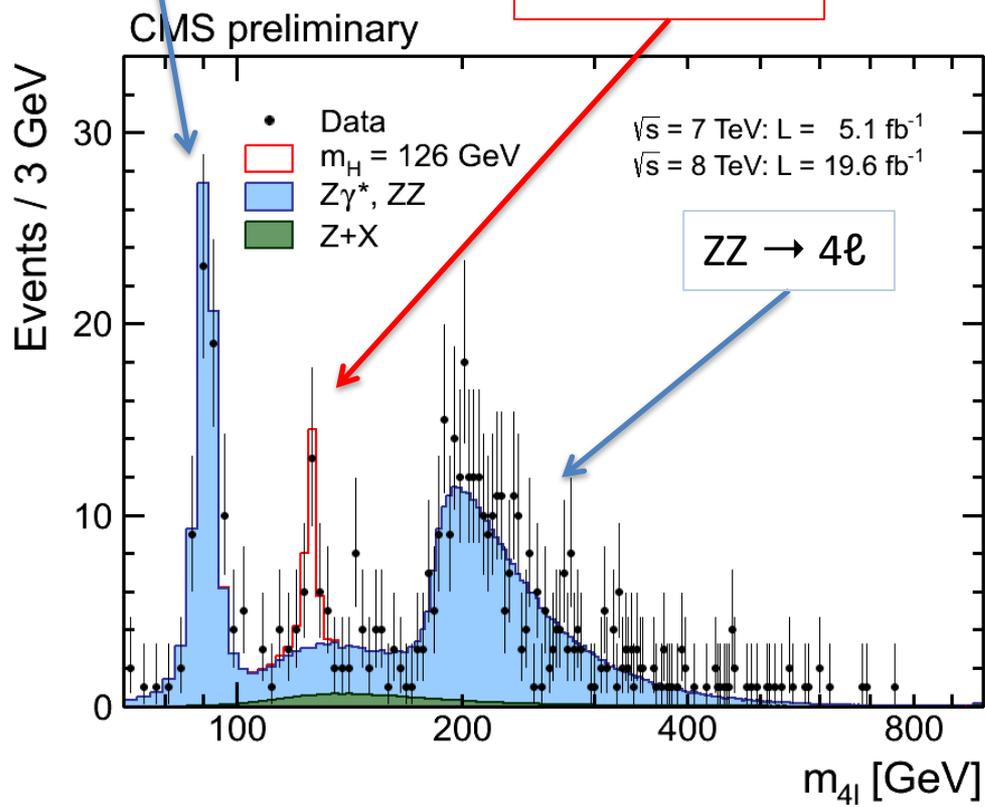


CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Wed May 23 21:09:26 2012 CEST
Run/Event: 194789 / 164079659

Distribuciones de masa: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$



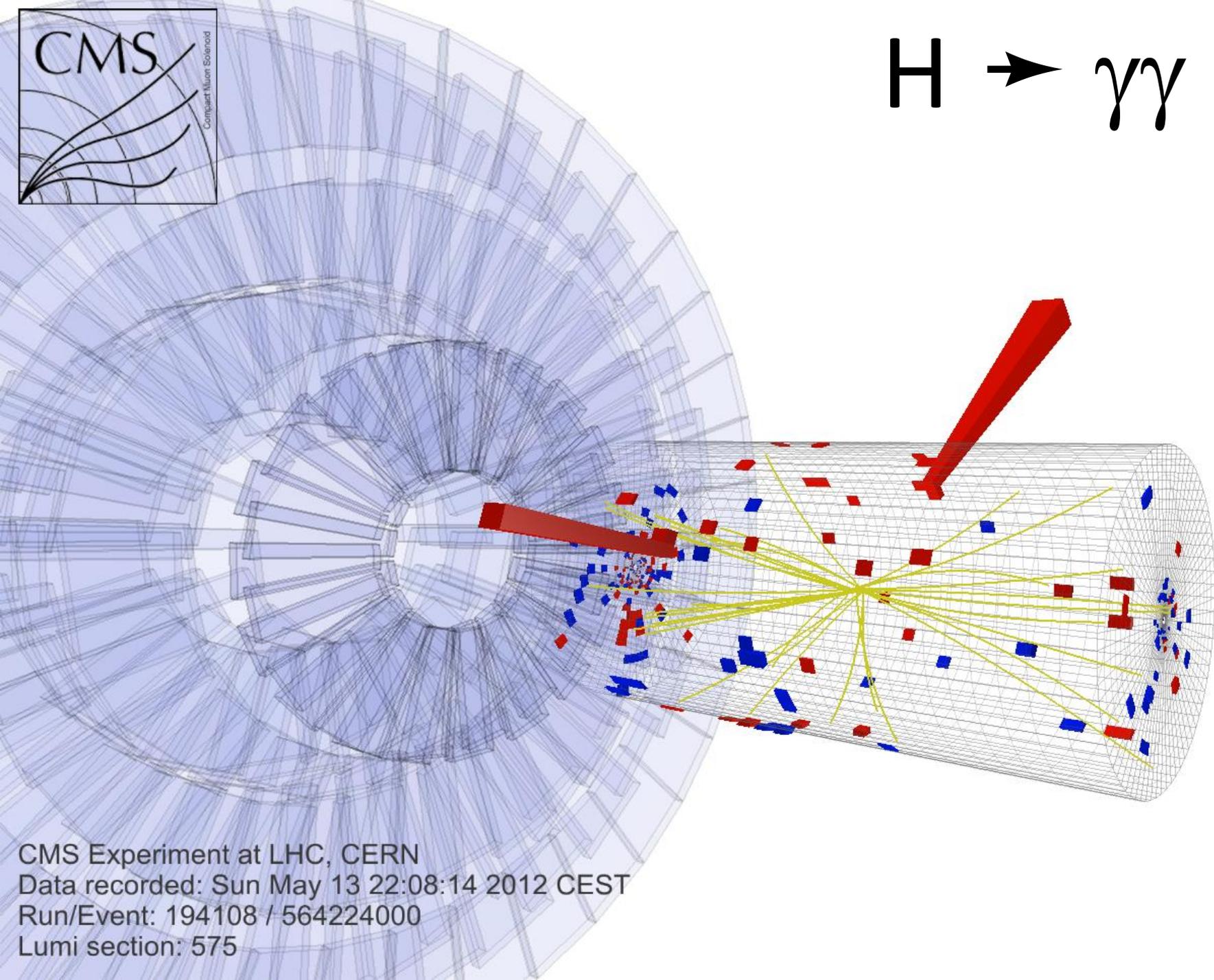
$X \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$



Masa reconstruida de los 4 leptones para la suma de los canales $4e$, 4μ y $2e2\mu$.

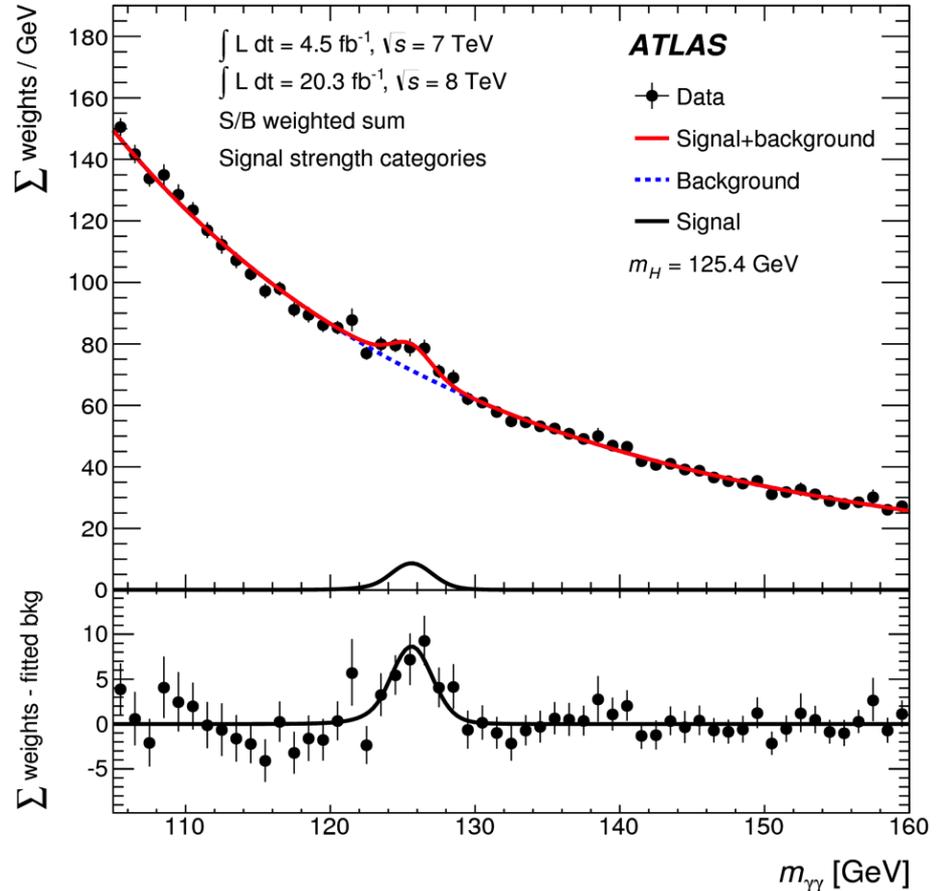
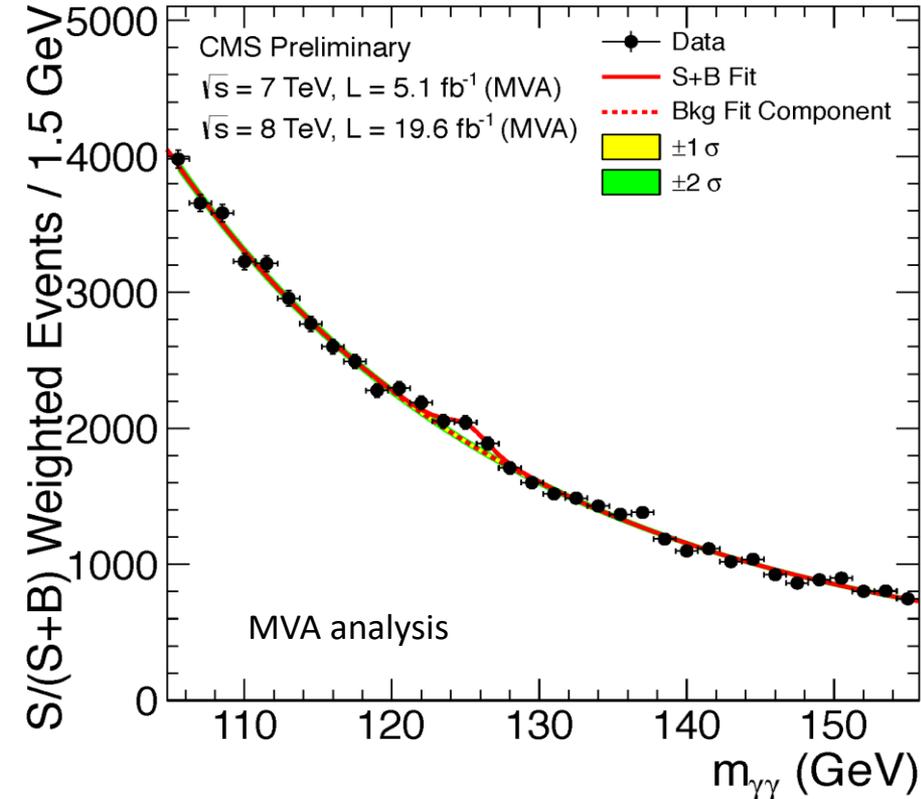


$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



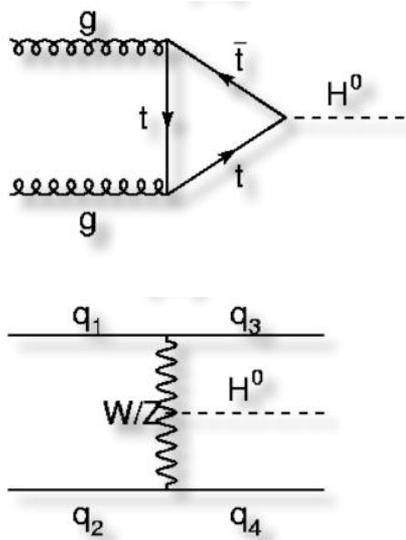
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun May 13 22:08:14 2012 CEST
Run/Event: 194108 / 564224000
Lumi section: 575

Distribuciones de masa: $H \rightarrow \gamma\gamma$

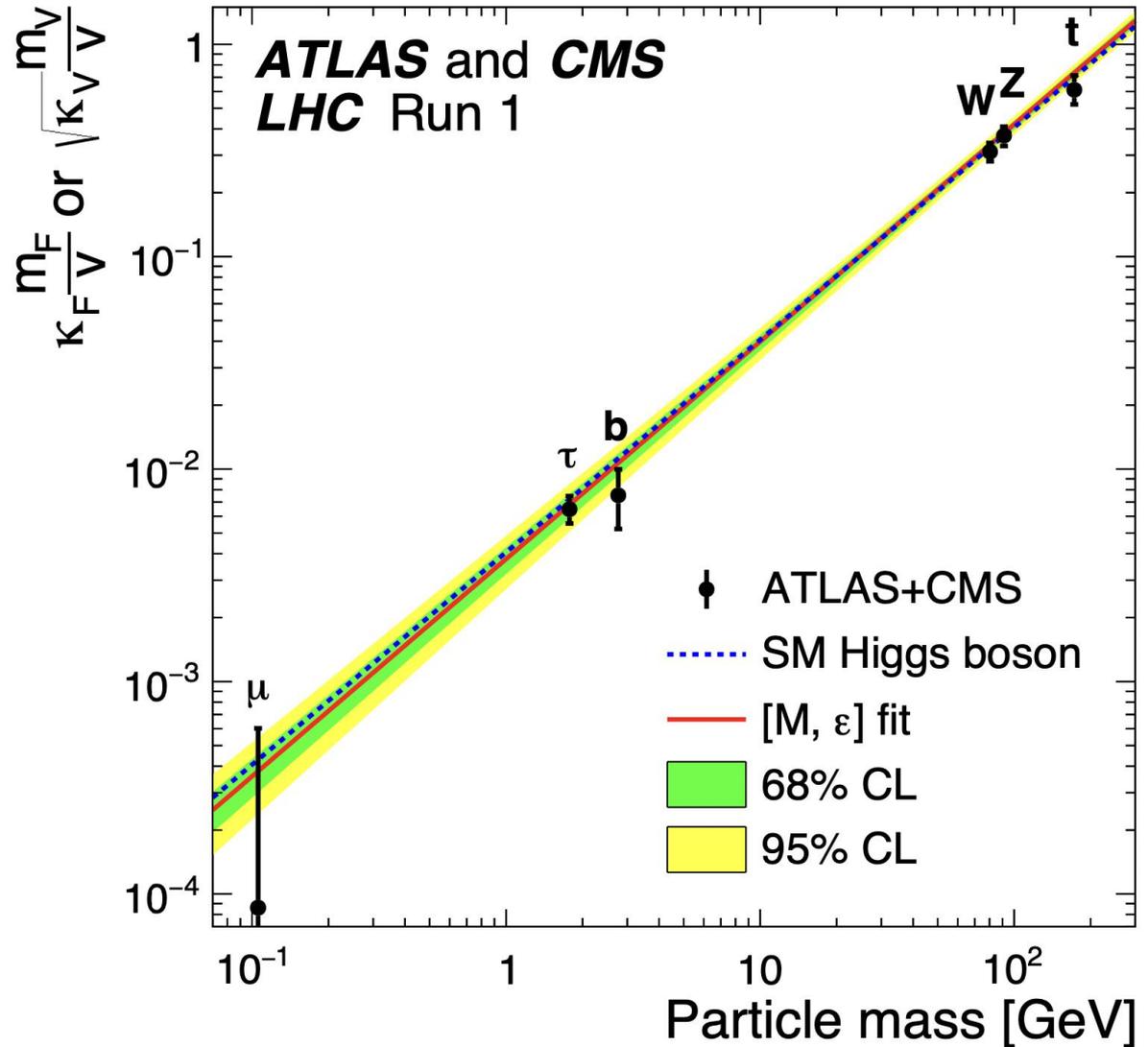


La señal destaca sobre un fondo ingente de sucesos de QCD (e, γ).

Identificando los mecanismos de producción del **bosón de Higgs** y sus canales de desintegración, medimos su acoplo a fermiones y bosones

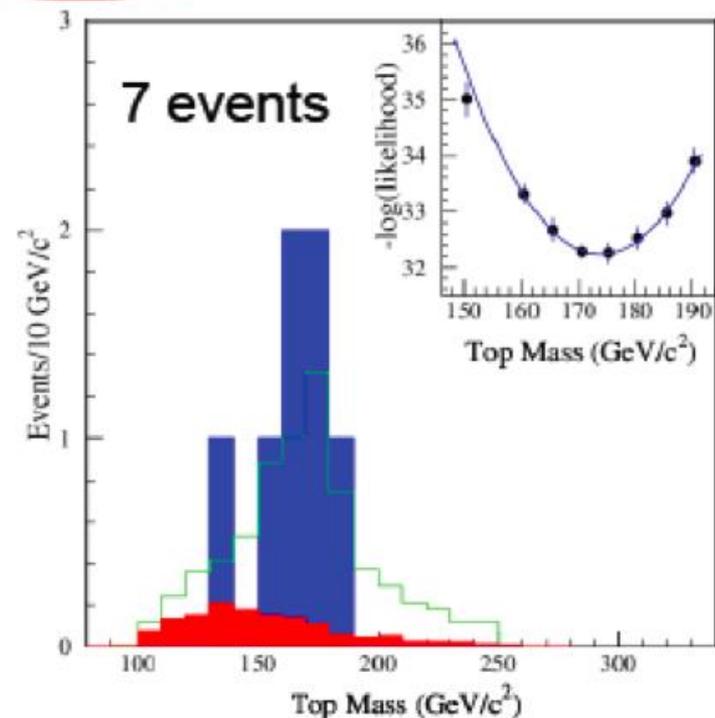
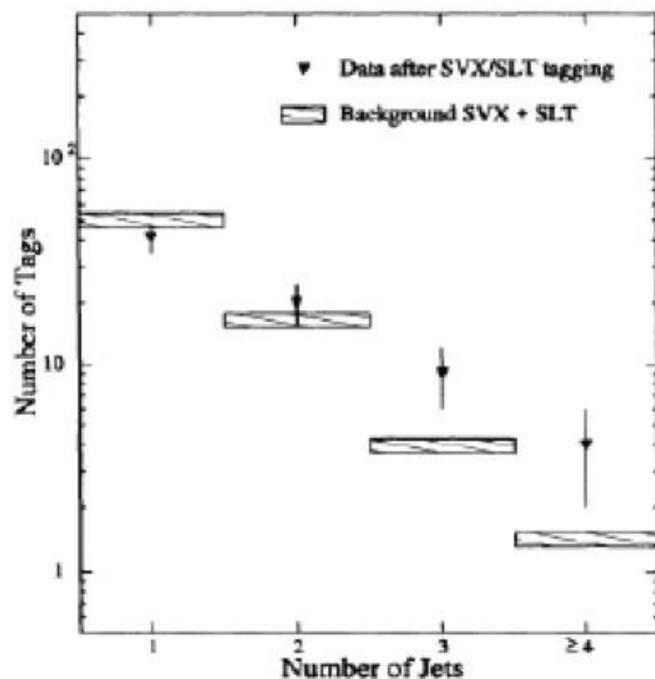


La masa de las partículas elementales es proporcional a su acoplo con el campo de Higgs



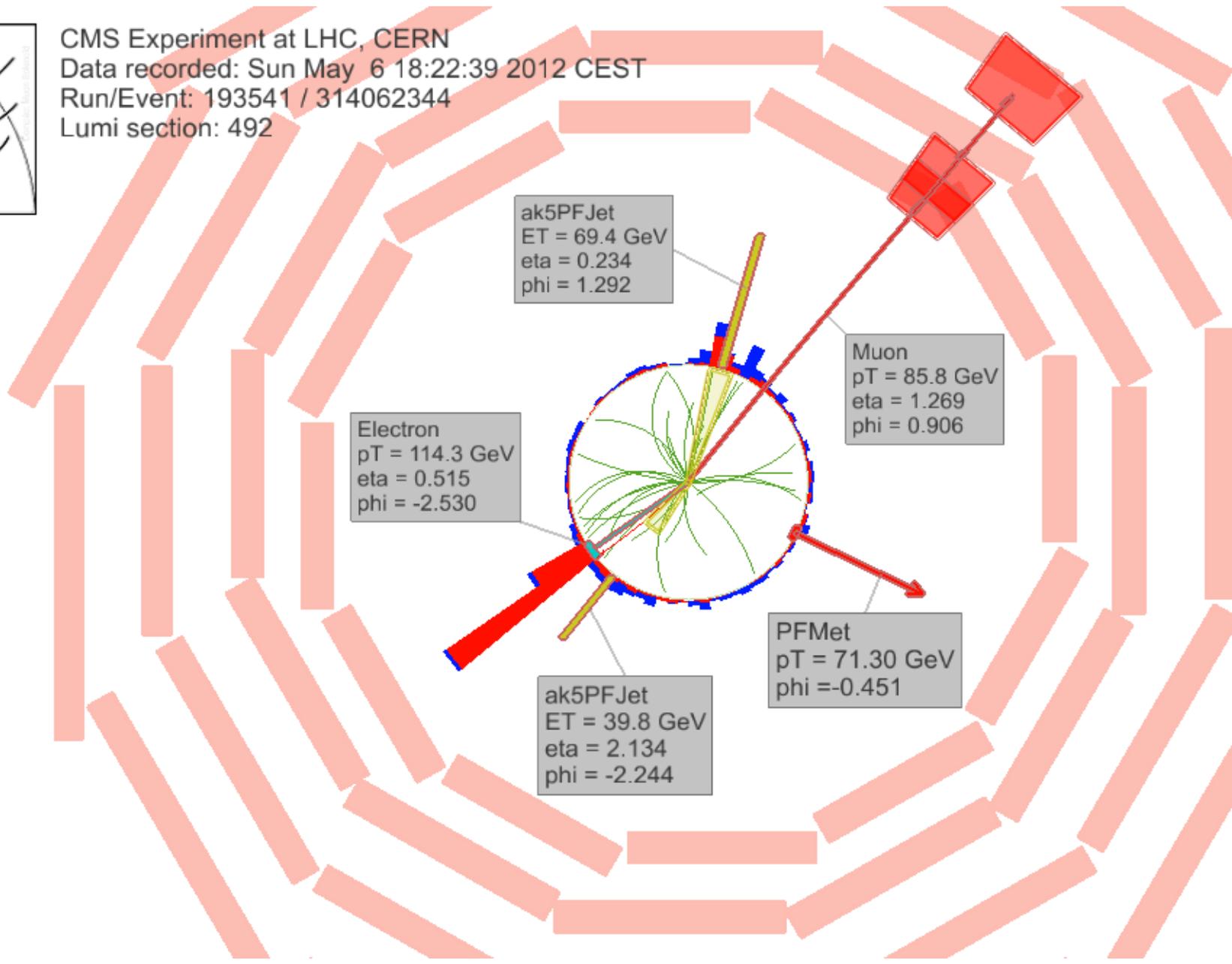
Evidence for Top Quark Production in $\bar{p}p$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV

We summarize a search for the top quark with the Collider Detector at Fermilab (CDF) in a sample of $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV with an integrated luminosity of 19.3 pb^{-1} . We find **12 events** consistent with either two W bosons, or a W boson and at least one b jet. The probability that the measured yield is consistent with the background is 0.26%. Though the statistics are too limited to establish firmly the existence of the top quark, a natural interpretation of the excess is that it is due to $t\bar{t}$ production. Under this assumption, constrained fits to individual events yield a top quark mass of **$174 \pm 10^{+13}$** GeV/c^2 . The $t\bar{t}$ production cross section is measured to be **$13.9^{+6.1}_{-4.8}$** pb .





CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun May 6 18:22:39 2012 CEST
Run/Event: 193541 / 314062344
Lumi section: 492



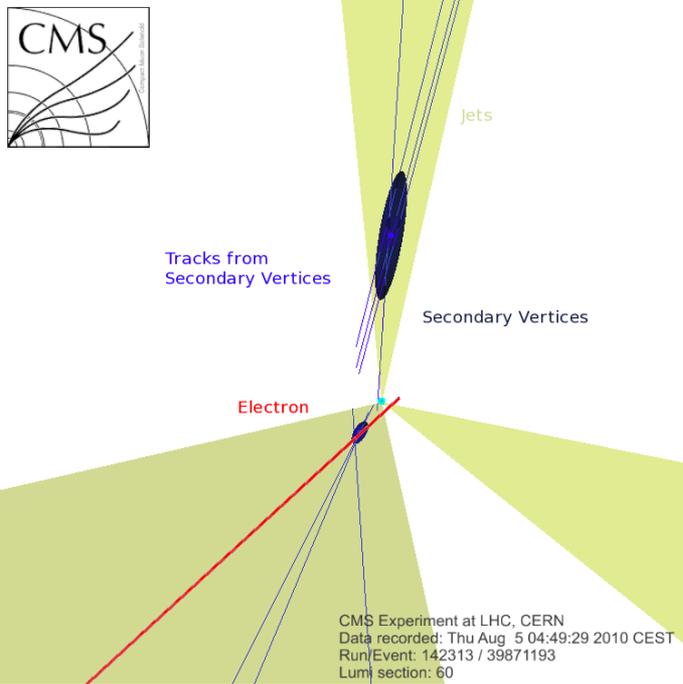
ak5PFJet
ET = 69.4 GeV
eta = 0.234
phi = 1.292

Muon
pT = 85.8 GeV
eta = 1.269
phi = 0.906

Electron
pT = 114.3 GeV
eta = 0.515
phi = -2.530

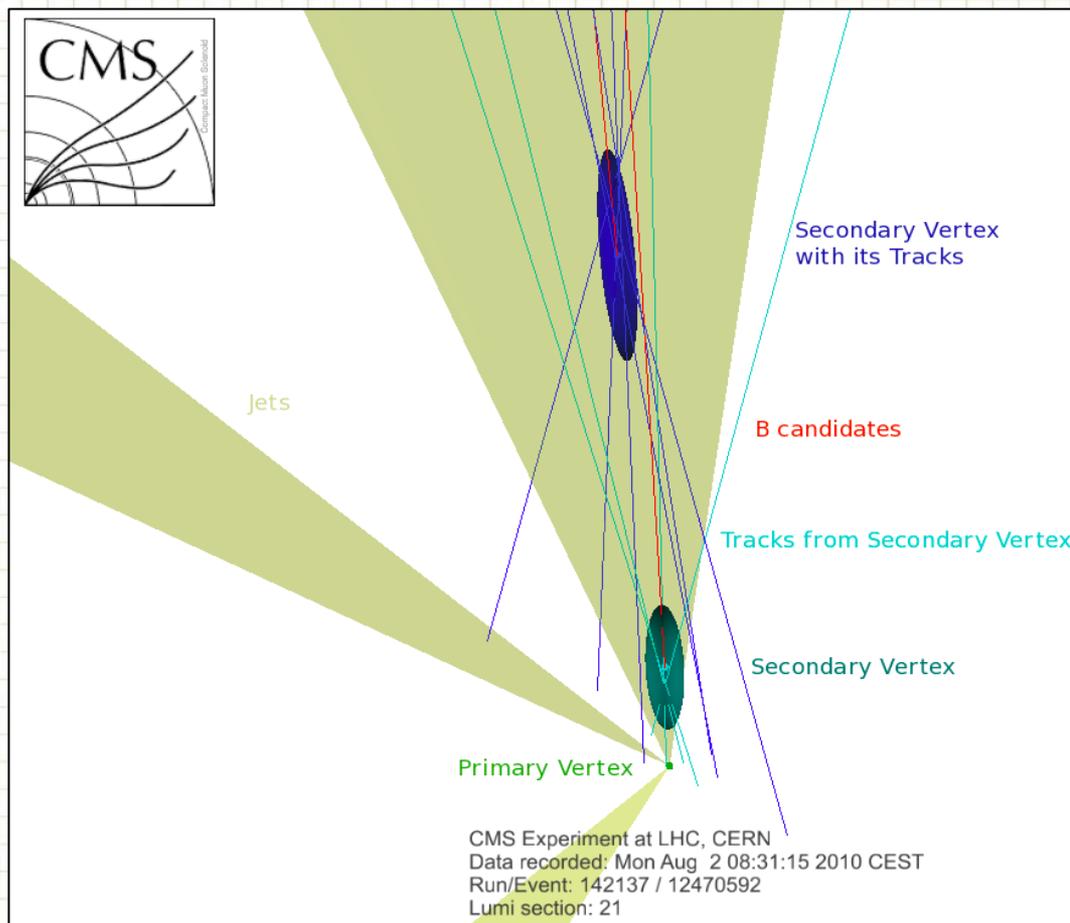
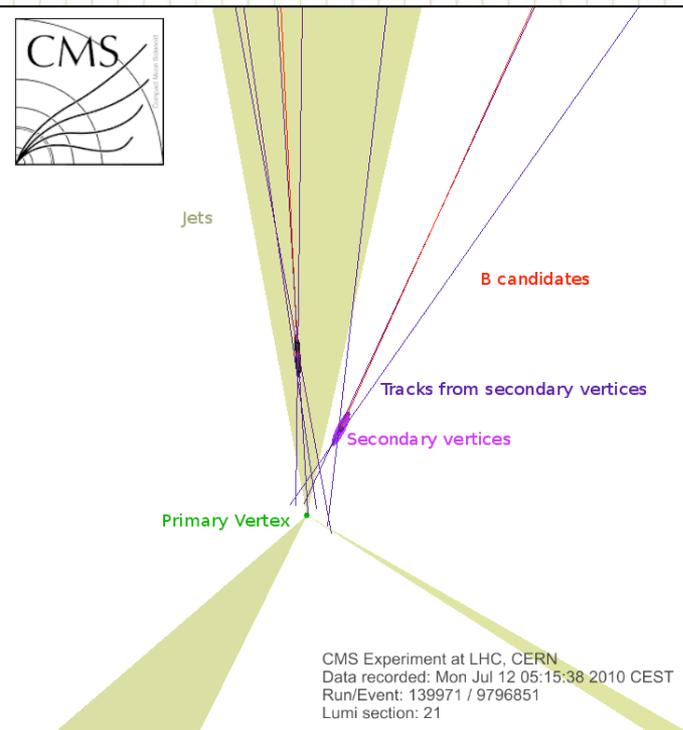
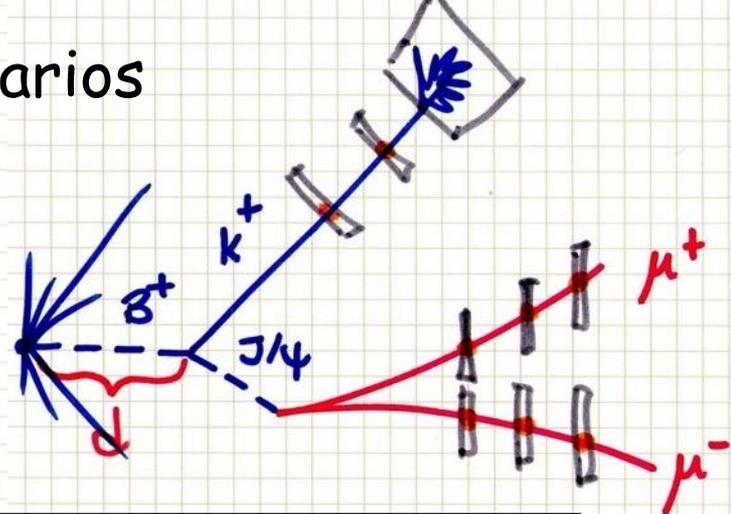
PFMet
pT = 71.30 GeV
phi = -0.451

ak5PFJet
ET = 39.8 GeV
eta = 2.134
phi = -2.244

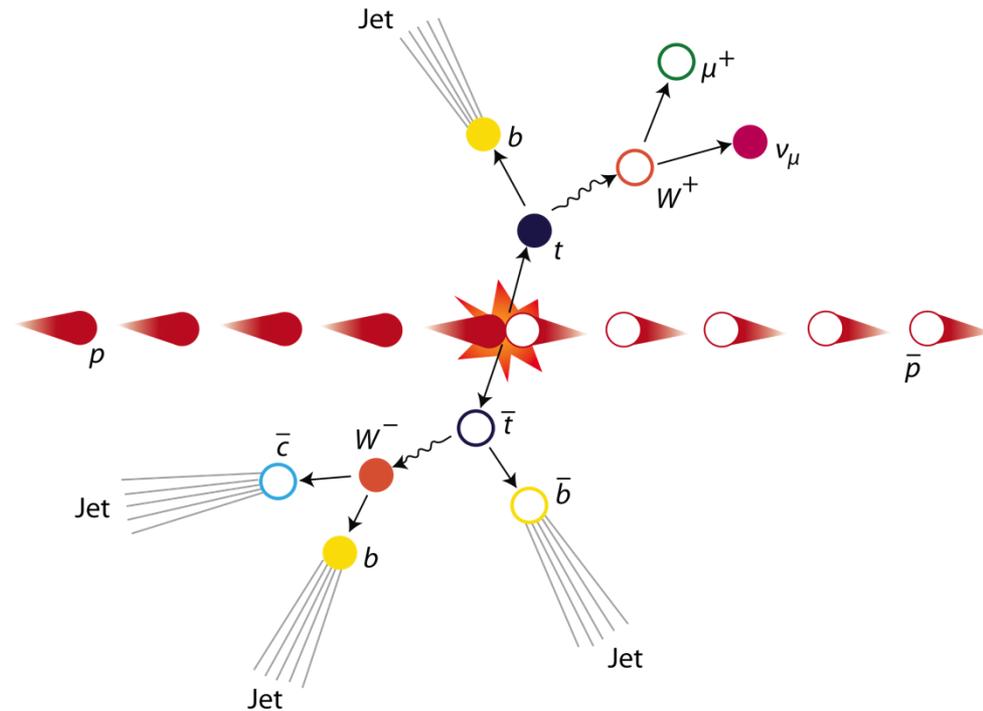
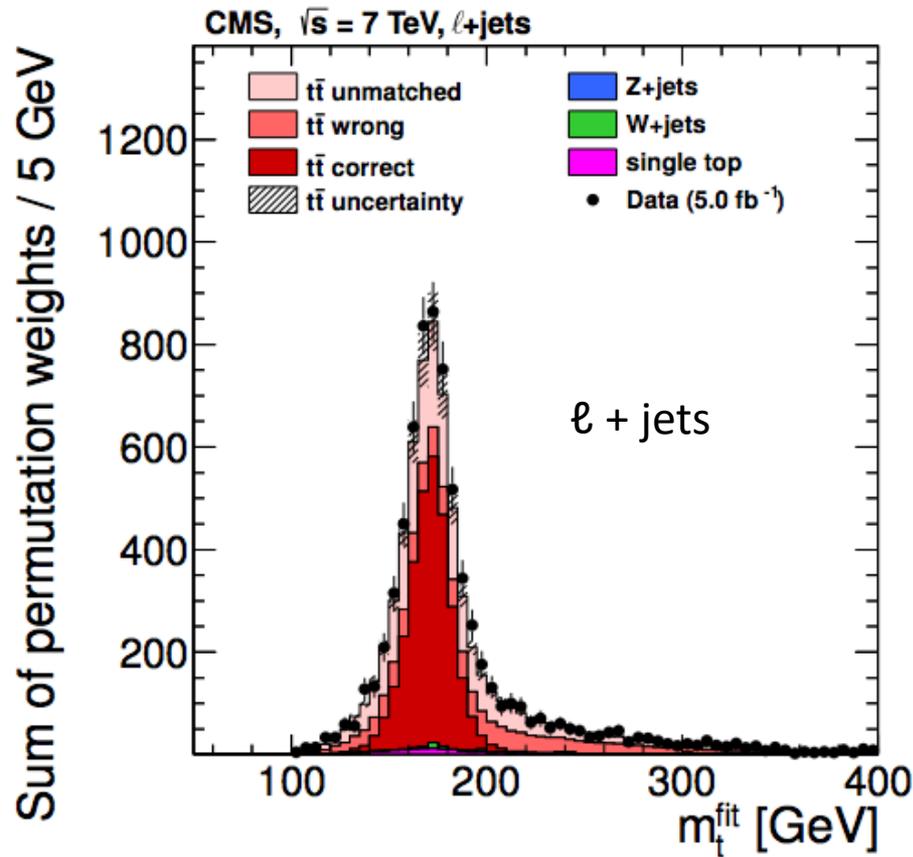


vértices secundarios

la vida media del quark b es 10^{-12} s, es decir, $ct \approx 0.03$ cm

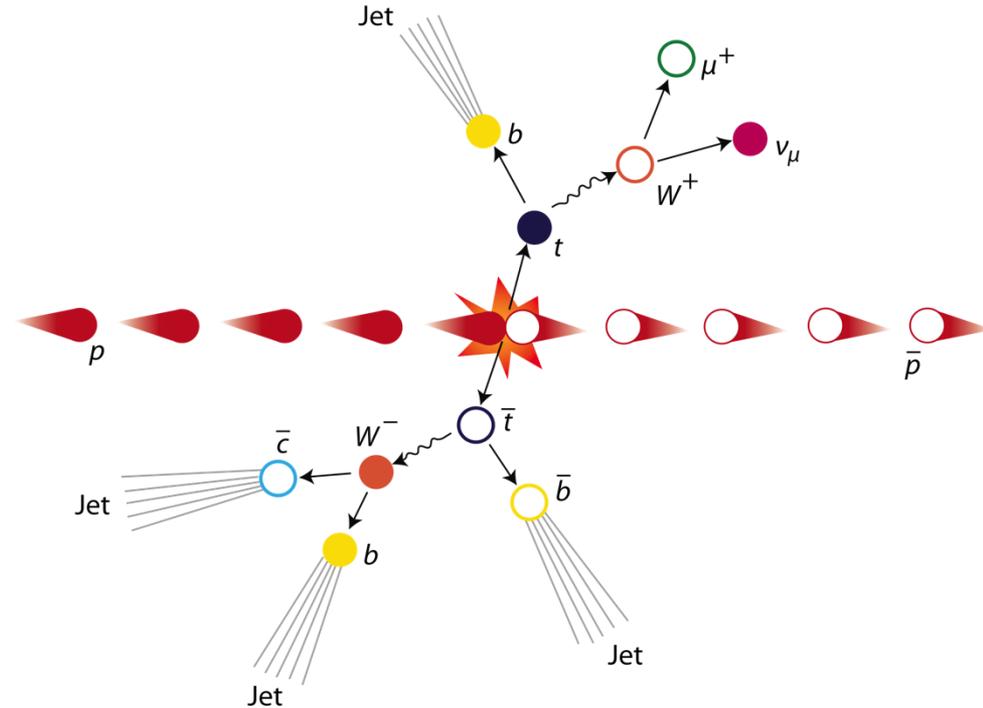
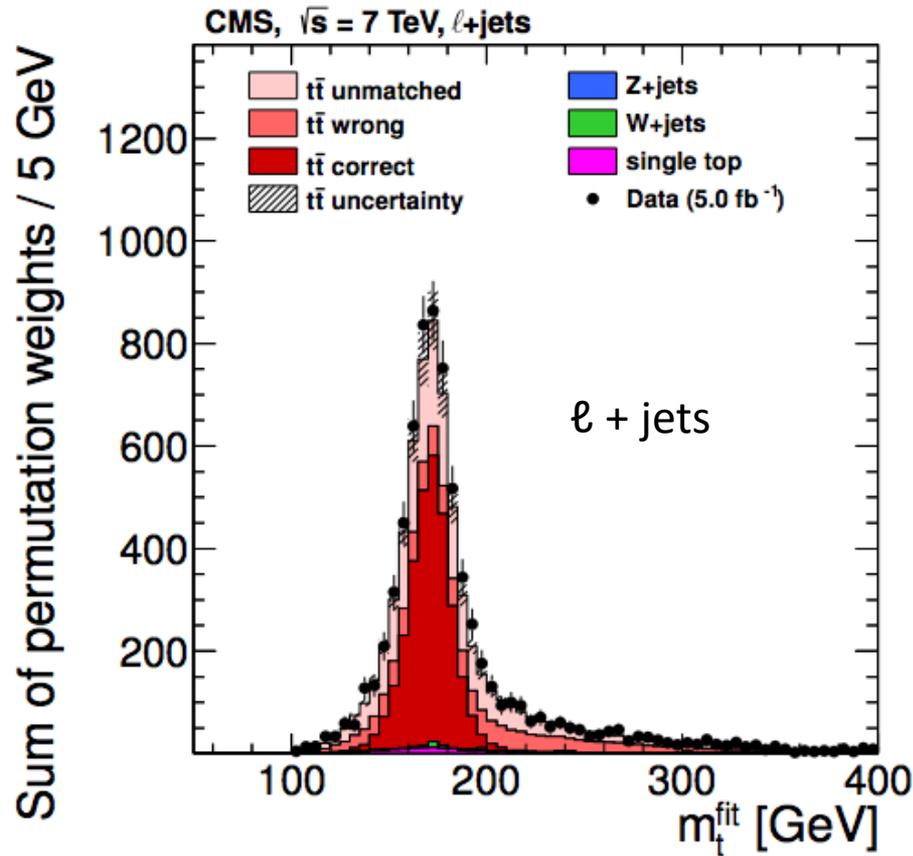


masa del quark top



Ajuste cinemático: momento de leptones y jets, E_T^{mis} , masa del W , neutrinos colineales...

masa del quark top

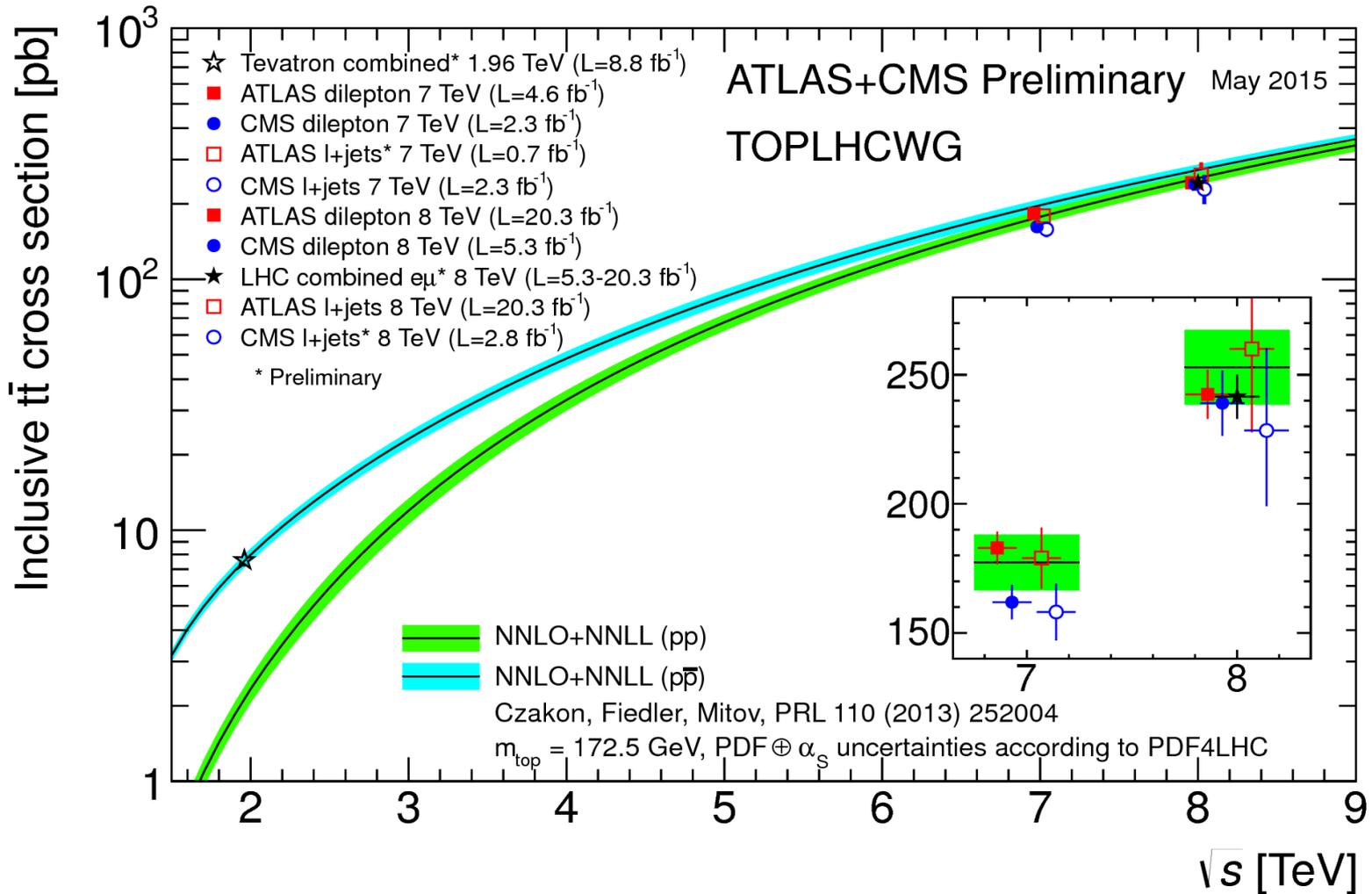


Medida con mucha precisión en Tevatron y LHC en todos los canales:

$173.34 \pm 0.76 (0.27 \pm 0.24 \pm 0.67) \text{ GeV}/c^2$

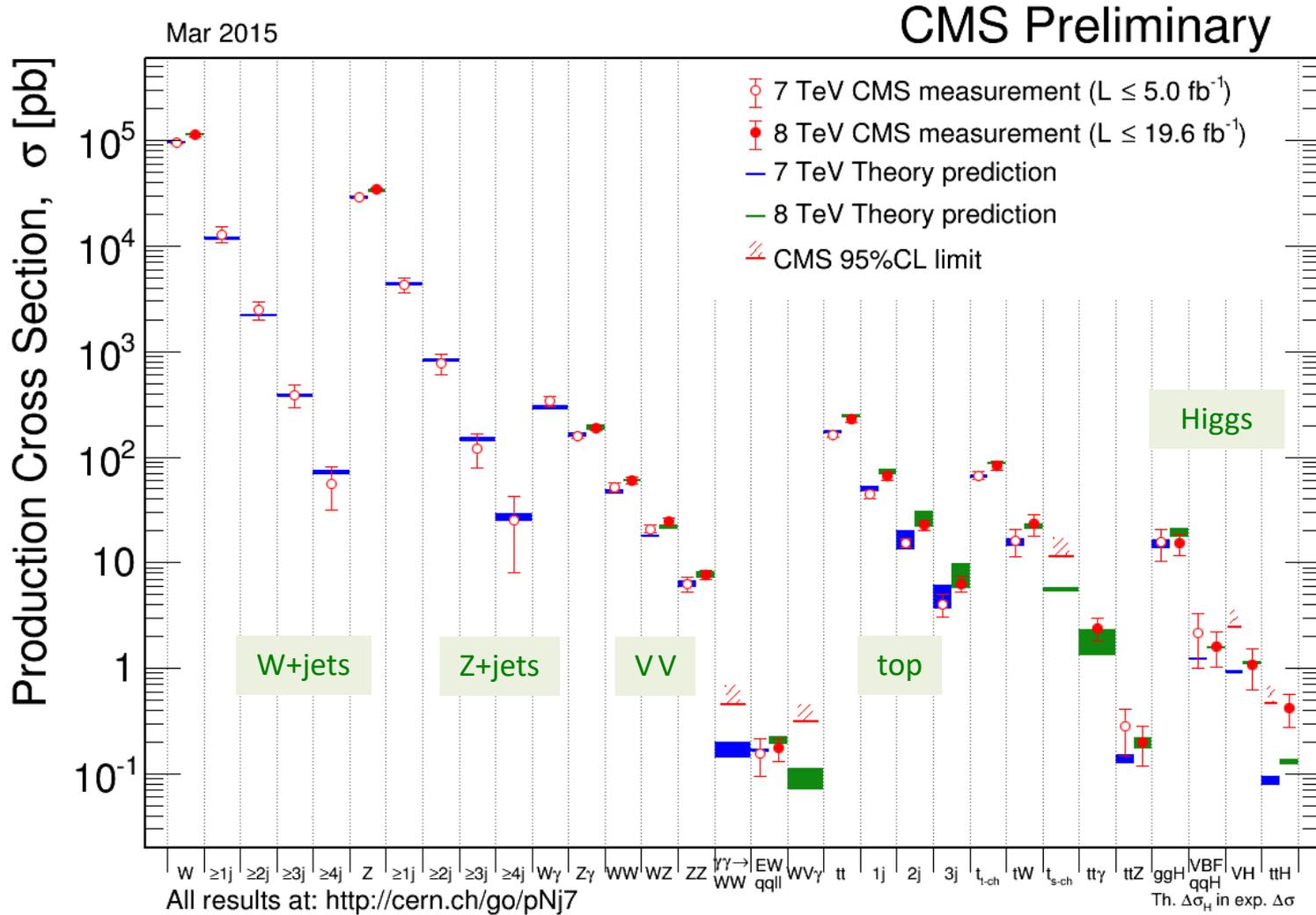
ii $m_{\text{top}} \approx 185 m_{\text{protón}} !!$

Sección eficaz total de $t\bar{t}$



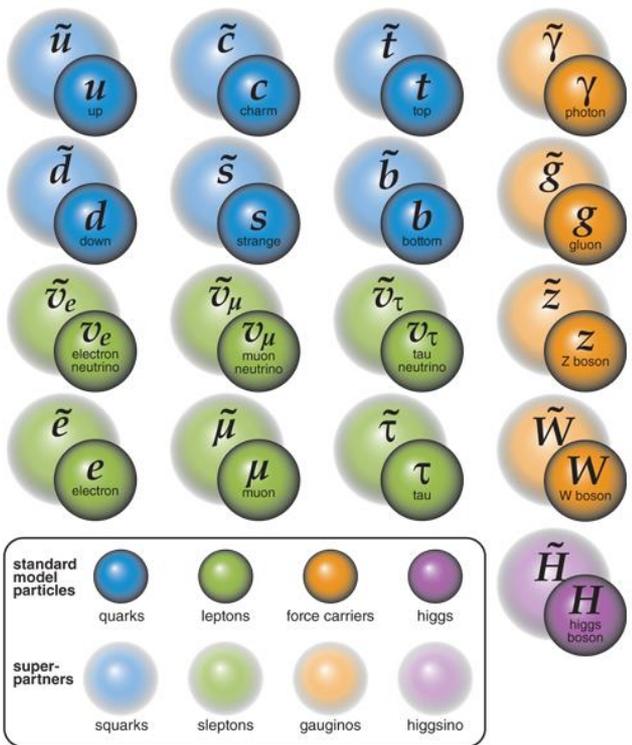
Medida con mucha precisión en todos los canales: muy buen acuerdo con las predicciones del Modelo Estándar.

Medidas del Modelo Estándar

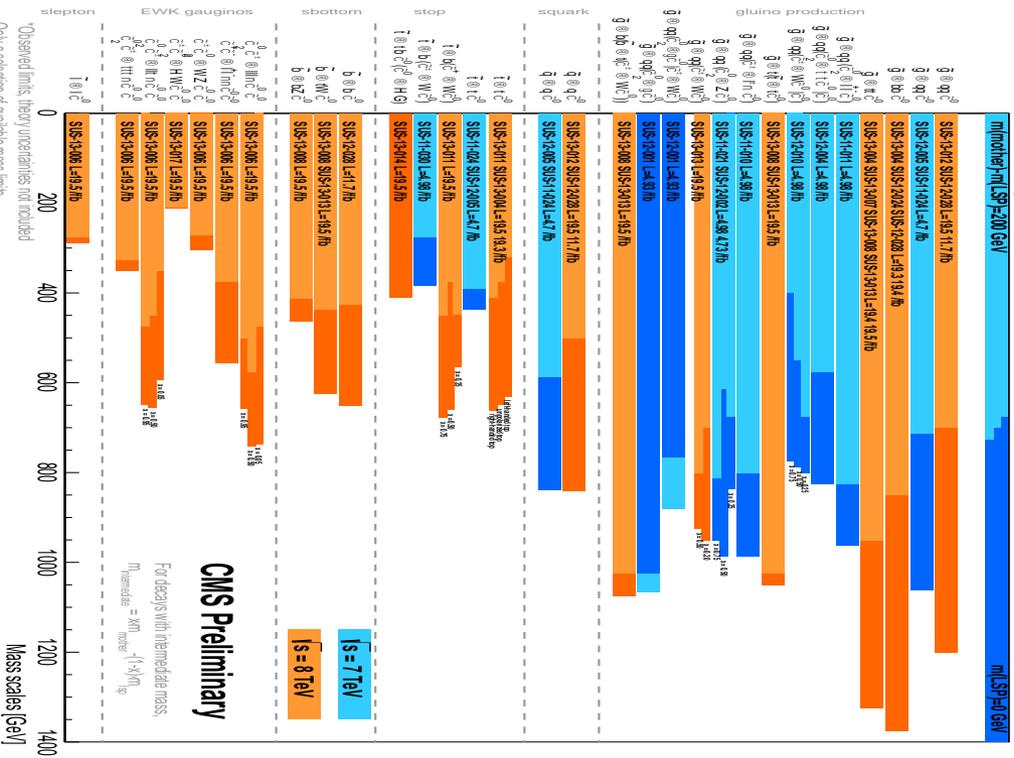


Estas medidas precisas son la llave para realizar descubrimientos de nueva física.

Supersimetría (SUSY)



Summary of CMS SUSY Results* in SMS framework SUSY 2013



Los experimentos de LHC han desarrollado un ambicioso programa de física en los **Runs I y II**, tanto en el Modelo Estándar como descubriendo el **bosón de Higgs**.

Ahora buscan **NUEVA FÍSICA** para arrojar luz sobre **CUESTIONES ABIERTAS en FÍSICA FUNDAMENTAL**:

materia oscura, gravitones, dimensiones extra, agujeros negros cuánticos, bosones de Higgs adicionales, partículas con nuevas simetrías.

En **2015** comenzó una nueva era con LHC operando a energías nunca alcanzadas antes: **13 TeV**. En **2022** LHC ha alcanzado la energía record de **13.6 TeV**.

¿Qué nos depara el futuro de **LHC**?

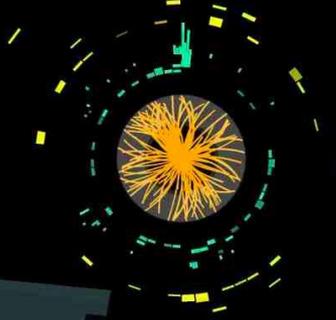
CUESTIONES FUNDAMENTALES EN FÍSICA DE PARTÍCULAS:

- jerarquía de masas (n° de familias y masa de los neutrinos),
- asimetría materia-antimateria en el universo,
- materia y la energía oscuras,
- estabilidad cuántica de m_H ,
- inflación cosmológica,
- formulación cuántica de la gravedad.

El panorama experimental y observacional va mucho más allá de LHC:

- experimentos de neutrinos (DUNE),
- experimentos de rayos cósmicos (AMS en la ISS)
- experimentos de búsqueda directa (DarkSide-20k) e indirecta (AMS) de materia oscura
- observatorios de energía oscura (DES, PAU)
- astronomía de rayos γ (CTA)
- astronomía de ondas gravitacionales (Virgo)

Entre paréntesis, aquellos en los que participa el CIEMAT.



FIN

Run: 266904
Event: 9886561
2015-06-03 10:49:54 CEST



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2015-Jun-03 08:48:32.279552 GMT
Run / Event / LS: 246908 / 77874559 / 86

