

Estructura de la Materia 4

- 22/03 Introducción
- 29/03 Fenomenología Nuclear
- 31/03 Isospín
- 05/04 Grupos de Simetría
- 07/04 Modelo de quarks
- 12/04 Modelo de quarks (2)
- 19/04 Mesones y Color
- 21/04 Cuántica Relativista
- 26/04 Soluciones de la Ec. de Dirac
- 28/04 Fenomenología de la Ec. de Dirac
- 03/05 Covariancia de la Ec. de Dirac
- 05/05 Helicidad y Quiralidad
- 17/05 Teoría Lagrangiana de Campos
- 19/05 Teorema de Noether y 2^{da} cuantificación
- 24/05 Simetrías de Gauge
- 26/05 Gauge no abeliano
- 31/05 Cromodinámica Cuántica
- 02/06 Interacciones Débiles
- 07/06 Unificación Electro-débil
- 09/06 Ruptura Espontánea de la Simetría
- 14/06 Generación de masas en la teoría electro-débil
- 16/06 Oscilaciones de Neutrinos
- 21/06 Interacciones de partículas con la materia
- 23/06 Detectores y colisionadores
- 28/06 Descubrimiento del bosón de Higgs



Gustavo Otero y Garzón – UBA



28/06: Análisis Físicos / Descubrimiento del Higgs

Resumen de la clase pasada

- **La clase pasada continuamos discutiendo mecanismos de interacción partícula-materia y su utilización en el diseño de detectores**
 - Vimos que la interacción de partículas hadrónicas es principalmente vía la interacción fuerte con los núcleos
 - A diferencia de las lluvias electromagnéticas, las lluvias hadrónicas están sujetas a una gran variabilidad debido a los distintos tipos de decaimientos (EM, fuertes, débiles)
 - Se puede definir un análogo a la longitud de radiación electromagnética que típicamente es un orden de magnitud mayor
 - La observación experimental de un quark o un gluon es un “jet” (chorro de hadrones)
 - Los muones son partículas muy penetrantes que típicamente escapan los detectores y se observan con detectores de trazas (ionización de gases)
 - En colisionadores, los neutrinos pueden inferirse por conservación de impulso en el plano trasverso
 - Colisiones entre protones es análogo a colisiones entre sus quarks y gluones con una distribución de probabilidades
 - Discutimos porqué es importante diseñar un sistema de Trigger en colisionadores
- **Hoy vamos a discutir algunos aspectos de cómo se puede utilizar lo anterior para medir observables en experimentos a altas energías**

¿Cómo se crean partículas?

$$E = m \cdot c^2$$

- La ecuación de Einstein expresa que energía y masa son dos versiones de una misma cosa

¿ Cuánta energía se necesita para crear un electrón?

$$\longrightarrow E = m_e c^2 = 8 \times 10^{-7} \text{ g km}^2/\text{seg}^2 = 0.5 \text{ MeV}$$

$$E^2 - c^2 \cdot P^2 = m^2 \cdot c^4$$

- Masa-energía para el caso mas general de una partícula en movimiento

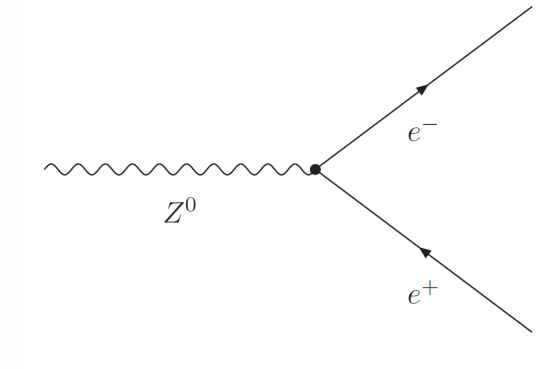
¿Cuánta energía es 0.5 MeV?

→ Un protón viajando a 3000 Km/s tiene una energía cinética de 0.5 MeV

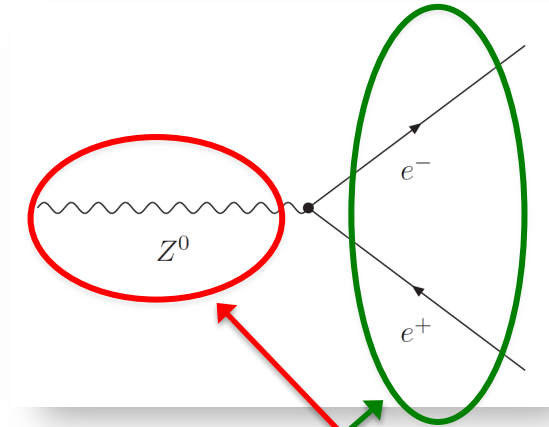
Vida media

- Las partículas tienen características que las hacen únicas
 - Interactúan mediante distintas fuerzas y de distinta manera
- Pueden decaer en otras más livianas dependiendo de sus características
 - En promedio, tienen un “tiempo de vida” (τ) característico
 - Si inicialmente hay un cierto numero de partículas, transcurrido un tiempo τ habrá $\sim 2/3$ menos

Partícula	Vida media
electrón	$>10^{26}$ años
protón	$>10^{29}$ años
neutrón	15 minutos
H	10^{-22} segundos
Z	10^{-25} segundos



Decaimientos y masa invariante



- La energía y el momento se conservan en un decaimiento
- “Genética”: las partículas “hijas” portan la información de sus “madres”

$$(E_1 + E_2)^2 - c^2 \cdot (P_1 + P_2)^2 = m^2 \cdot c^4$$

¿Cómo identificar a la “madre”?

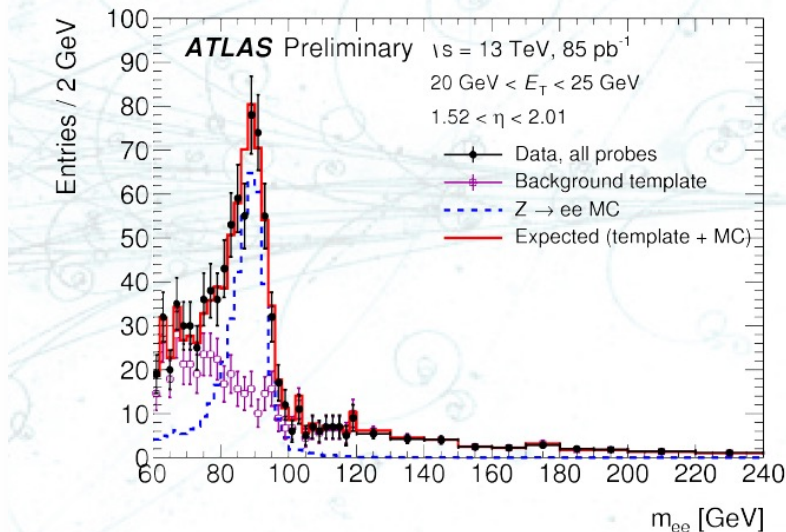
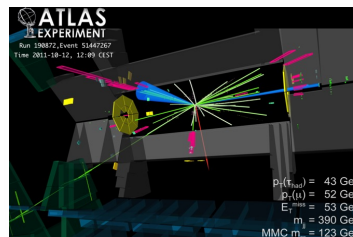
- Si buscamos el Z decayendo a e^+e^- :

- Identificar eventos con un par e^+e^-

- No sabemos si este par proviene de un Z (“señal”) o no tiene nada que ver con él (“fondo”)

- Pero si vienen de un decaimiento, la masa invariante **ES** la masa de la madre

- Hay que contar cuantos eventos tienen partículas “hijas” para distintos valores de masa invariante



Receta para medir una sección eficaz

The diagram shows the formula for cross-section σ with lines connecting it to its components and their optimization goals:

$$\sigma = \frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{backg}}}{\epsilon \cdot \int \mathcal{L} dt}$$

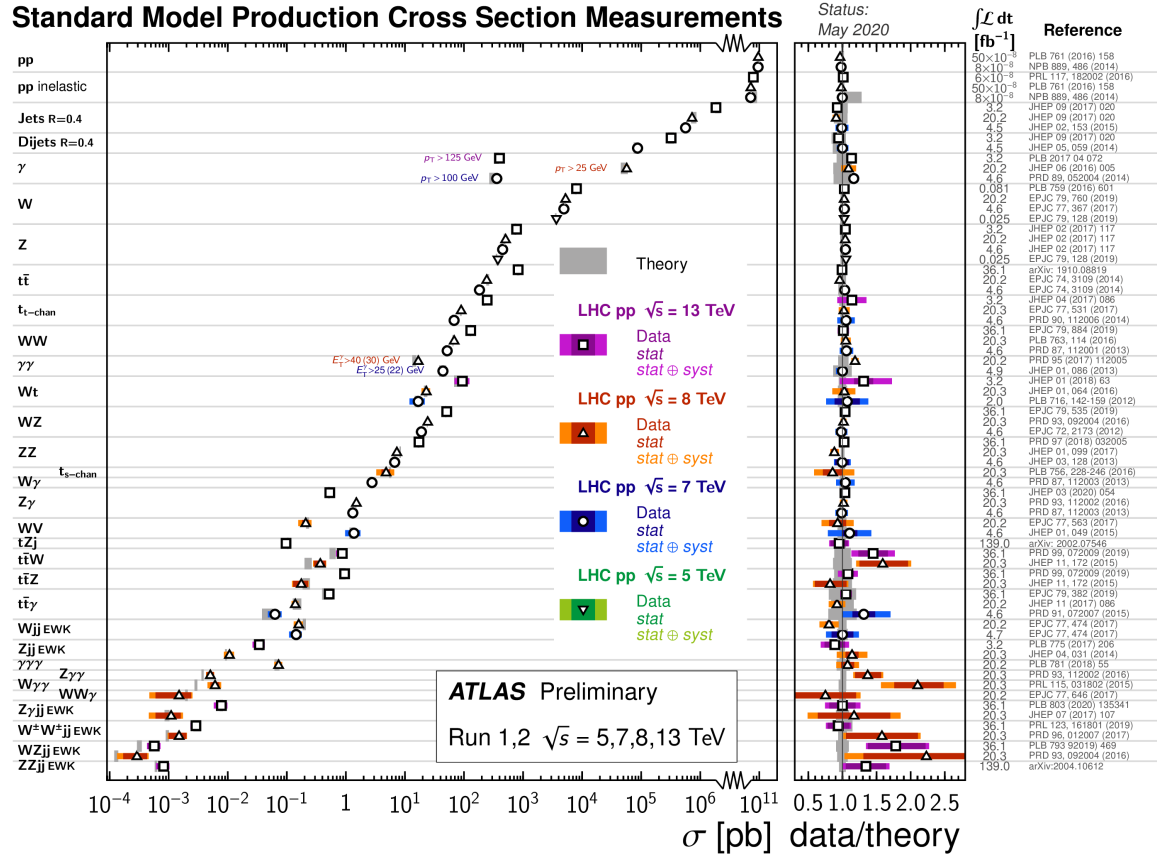
Annotations and optimization goals:

- Number of observed candidates** (fitted or counted) points to N_{obs} .
- Number of background candidates** (measured from data or calculated from theory) (minimize) points to N_{backg} .
- Cross section in cm^2** (or μb , nb , pb) points to σ .
- Efficiency/acceptance** (maximize) points to ϵ .
- Integrated Luminosity in cm^{-1}** (or μb^{-1} , nb^{-1} , pb^{-1}) (maximize, unless systematically limited) points to $\int \mathcal{L} dt$.

¿Dónde estamos parados?

Antes de buscar Nueva Física tenemos que entender el SM

Standard Model Production Cross Section Measurements



El Modelo Estándar

Teoría que unifica todo nuestro conocimiento acerca de las partículas fundamentales y sus interacciones **basada en simetrías de la naturaleza**

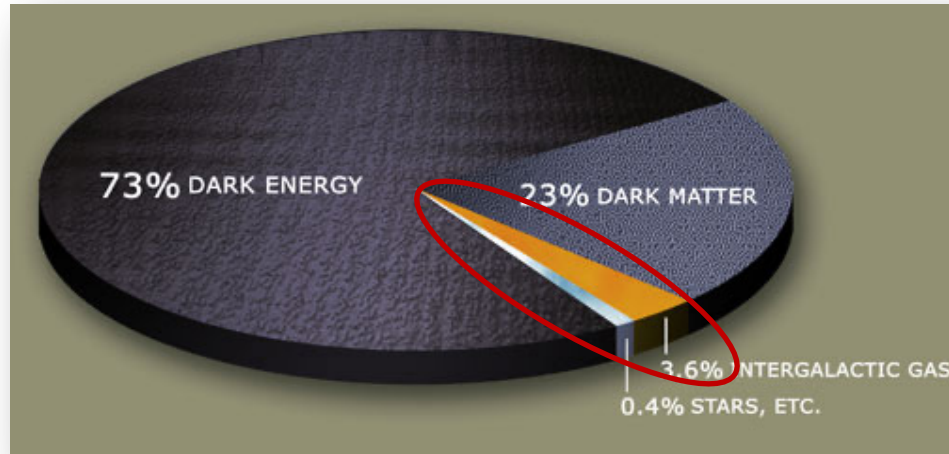
$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{8}\text{tr}(\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu}) - \frac{1}{2}\text{tr}(\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu}) & (\text{U(1), SU(2) and SU(3) gauge terms}) \\
 & +(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L) \tilde{\sigma}^\mu i D_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} + \bar{e}_R \sigma^\mu i D_\mu e_R + \bar{\nu}_R \sigma^\mu i D_\mu \nu_R & (\text{lepton dynamical term}) \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L) \phi M^e e_R + \bar{e}_R M^{e*} \bar{\phi} \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \right] & (\text{electron, muon, tauon mass term}) \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{e}_L, \bar{\nu}_L) \phi^* M^\nu \nu_R + \bar{\nu}_R M^{\nu*} \phi^T \begin{pmatrix} -e_L \\ \nu_L \end{pmatrix} \right] & (\text{neutrino mass term}) \\
 & +(\bar{u}_L, \bar{d}_L) \tilde{\sigma}^\mu i D_\mu \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} + \bar{u}_R \sigma^\mu i D_\mu u_R + \bar{d}_R \sigma^\mu i D_\mu d_R & (\text{quark dynamical term}) \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{u}_L, \bar{d}_L) \phi M^d d_R + \bar{d}_R M^{d*} \bar{\phi} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \right] & (\text{down, strange, bottom mass term}) \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{d}_L, \bar{u}_L) \phi^* M^u u_R + \bar{u}_R M^{u*} \phi^T \begin{pmatrix} -d_L \\ u_L \end{pmatrix} \right] & (\text{up, charmed, top mass term}) \\
 & +\overline{(D_\mu \phi)} D^\mu \phi - m_h^2 [\bar{\phi} \phi - v^2/2]^2/v^2, & (\text{Higgs dynamical and mass term})
 \end{aligned}$$

¿Cuán bueno es este modelo?

- **Pro's:**
 - altamente predictivo
 - no existe aún ningún experimento que esté en desacuerdo!
- **Con's:**
 - No incluye la gravedad

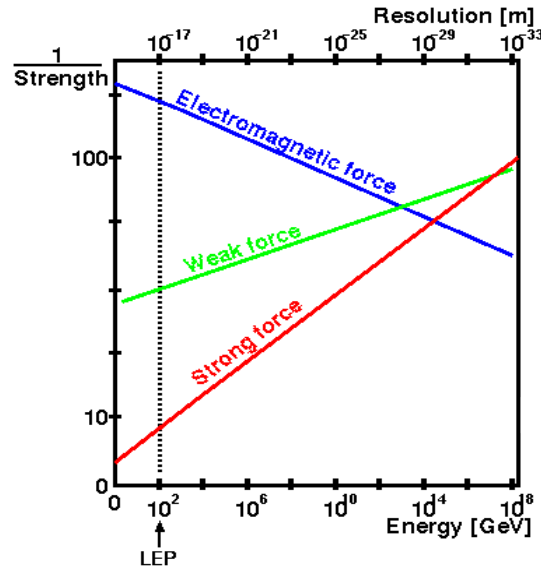
¿Cuán bueno es este modelo?

- **Pro's:**
 - altamente predictivo
 - no existe aún ningún experimento que esté en desacuerdo!
- **Con's:**
 - No incluye la gravedad
 - Describe solo el 4% del universo



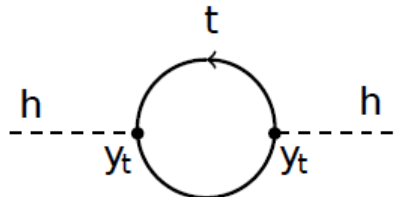
¿Cuán bueno es este modelo?

- **Pro's:**
 - altamente predictivo
 - **no existe aún ningún experimento que esté en desacuerdo!**
- **Con's:**
 - No incluye la gravedad
 - Describe solo el 4% del universo
 - **No permite unificación de fuerzas**



¿Cuán bueno es este modelo?

- **Pro's:**
 - altamente predictivo
 - **no existe aún ningún experimento que esté en desacuerdo!**
- **Con's:**
 - No incluye la gravedad
 - Describe solo el 4% del universo
 - No permite unificación de fuerzas
 - **No explica la “jerarquía de masas”**



The diagram shows a top quark loop (a circle with an arrow) connected to two external Higgs boson lines (dashed lines labeled 'h'). The vertices are labeled y_t . The top quark is labeled 't' at the top of the loop.

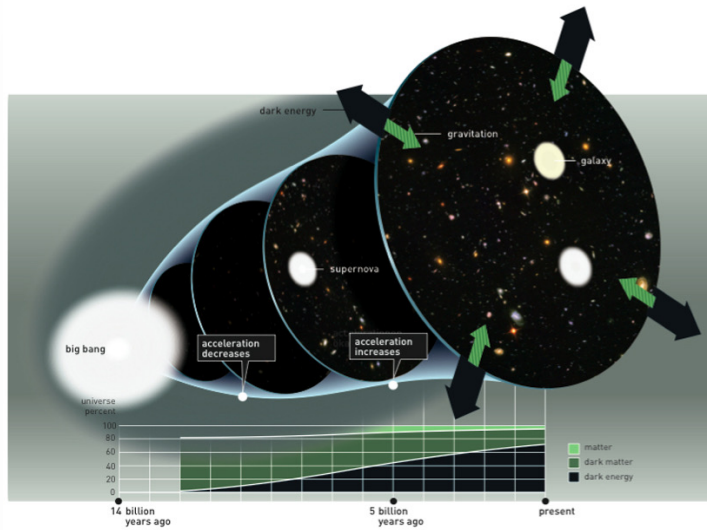
$$-\frac{y_t^2}{8\pi^2} \left[\Lambda^2 - 3m_t^2 \ln \left(\frac{\Lambda^2}{m_t^2} \right) + \dots \right]$$

La masa del Higgs recibe correcciones perturbativas que divergen pero se cancelan “magicamente” (“fine tuning”)

$$\text{¿}1 = 1000000 - 999999\text{?}$$

Algunos misterios

El ME no puede explicar porqué el universo se expande aceleradamente, esto se entiende con la presencia de **energía oscura**



The Nobel Prize in Physics 2011
Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011

Saul Perlmutter

Brian P. Schmidt

Adam G. Riess



Photo: Roy Kaltschmidt, Courtesy: Lawrence Berkeley National Laboratory

Saul Perlmutter



Photo: Belinda Pratten, Australian National University

Brian P. Schmidt



Photo: Homewood Photography

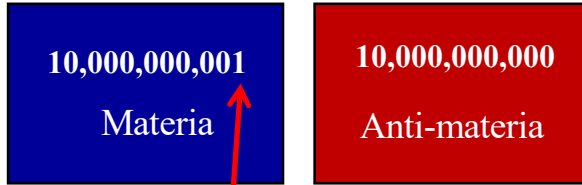
Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011 was awarded "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae" with one half to Saul Perlmutter and the other half jointly to Brian P.

Algunos misterios

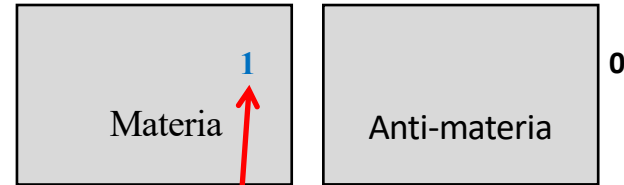
El ME no puede explicar (completamente) la **asimetría entre materia y antimateria**

Inmediatamente después del Big-Bang

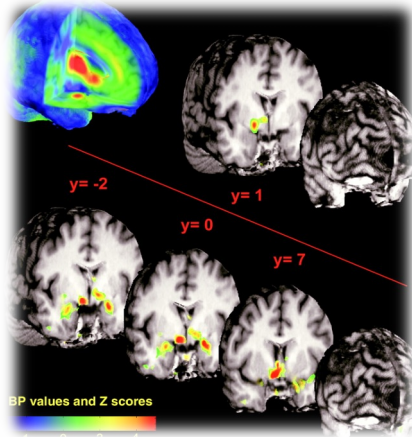


Fijense en este 1

Luego de una gran aniquilación

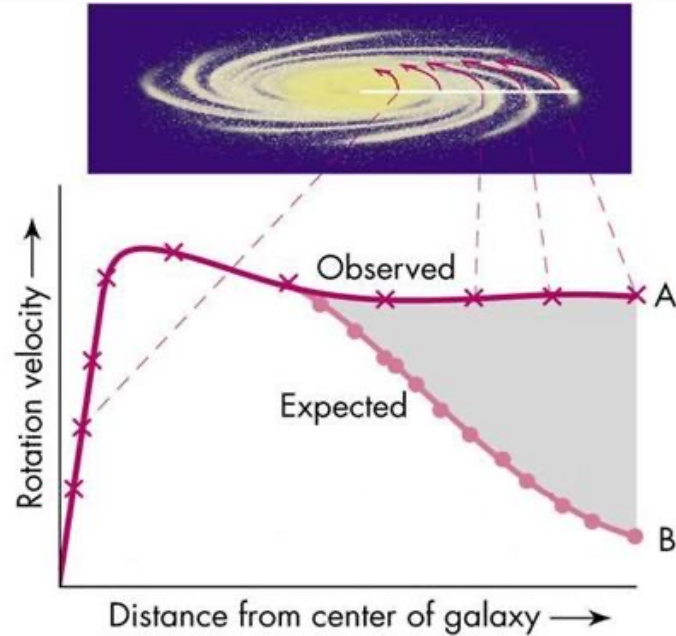


Nosotros



Algunos misterios

Observaciones cosmológicas requieren la existencia de **Materia Oscura**



¿Cuán bueno es este modelo?

- **Pro's:**
 - altamente predictivo
 - **no existe aún ningún experimento que esté en desacuerdo!**
- **Con's:**
 - No incluye la gravedad
 - Describe solo el 4% del universo
 - No permite unificación de fuerzas
 - No explica la “jerarquía de masas”

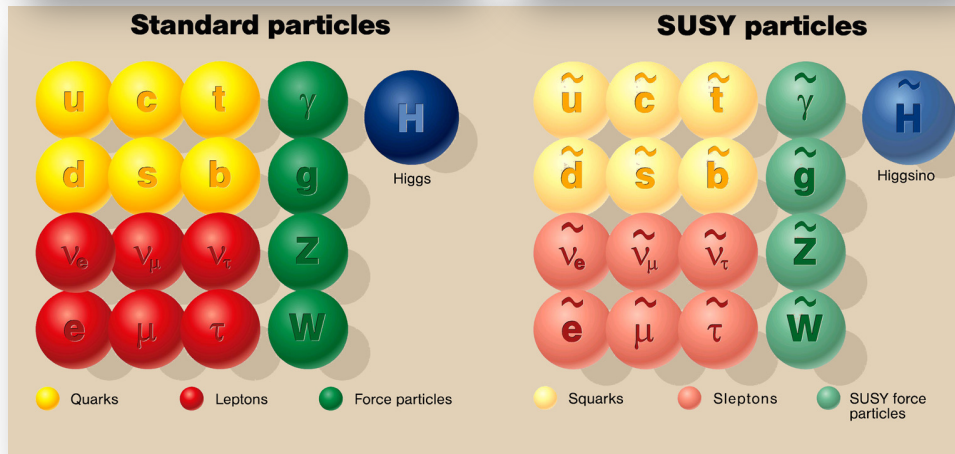
El Modelo Estándar es una teoría efectiva de “bajas” energías de algo más general

Más allá del ME: Super Simetría (SUSY)

Única extensión posible del grupo de Poincaré

$$Q|\text{Boson}\rangle = |\text{Fermion}\rangle$$

$$Q|\text{Fermion}\rangle = |\text{Boson}\rangle$$



- Ninguna partícula SUSY observada aún!
 - **SIMETRIA ROTA** (al estilo ruptura espontánea de Higgs): nadie vió un selectrón, entonces la degeneración en masa esta rota
- partículas SUSY se crean de a pares
- la **más liviana es estable** (**LSP** = **L**ightest **S**upersymmetric **P**article)

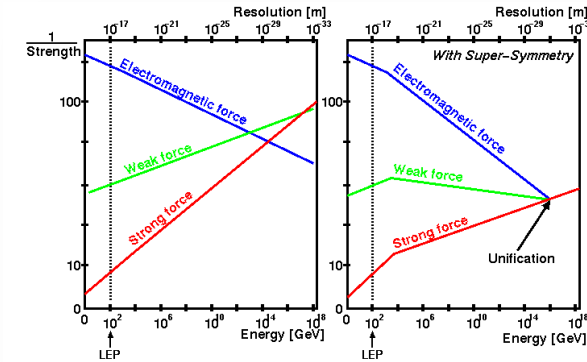
¿Porqué es tan linda SUSY?

- Resuelve el “problema de jerarquías”
 - Las contribuciones de SUSY a la masa del Higgs cancelan las del Modelo Estándar

$$+ \frac{y_S}{16\pi^2} \left[\Lambda^2 - m_S^2 \ln \left(\frac{\Lambda^2}{m_S^2} \right) + \dots \right] - \frac{y_S'^2}{16\pi^2} \left[\ln \left(\frac{\Lambda^2}{m_S^2} \right) + \dots \right]$$

- Provee un candidato natural de materia oscura: el **LSP**

- Permite una unificación de fuerzas



DESCUBRIMIENTO DEL BOSÓN DE HIGGS

Mecanismos de Producción y Decaimiento
¿Cómo se hace esta búsqueda?

6 páginas que cambiaron la historia

1964

VOLUME 13, NUMBER 9

PHYSICAL REVIEW LETTERS

31 AUGUST 1964

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

2 páginas

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

2 páginas

GLOBAL CONSERVATION LAWS AND MASSLESS PARTICLES*

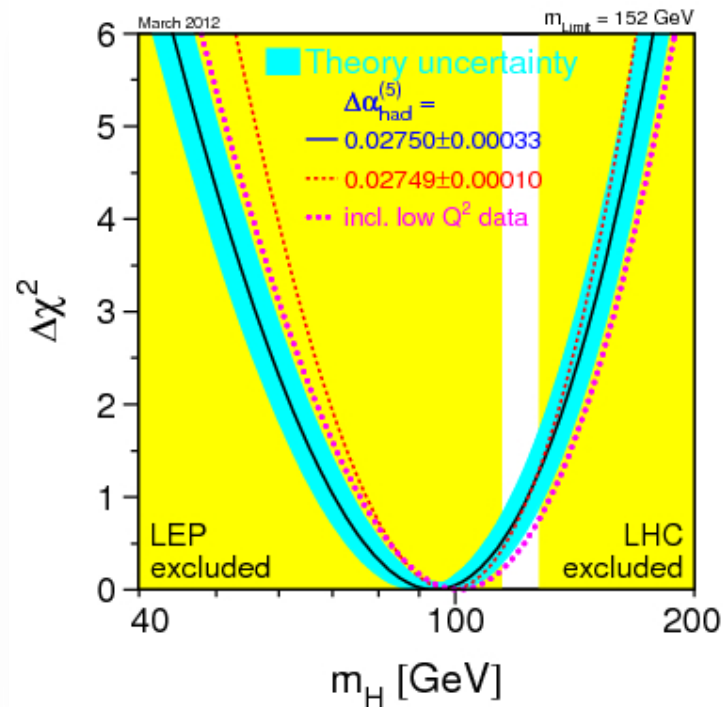
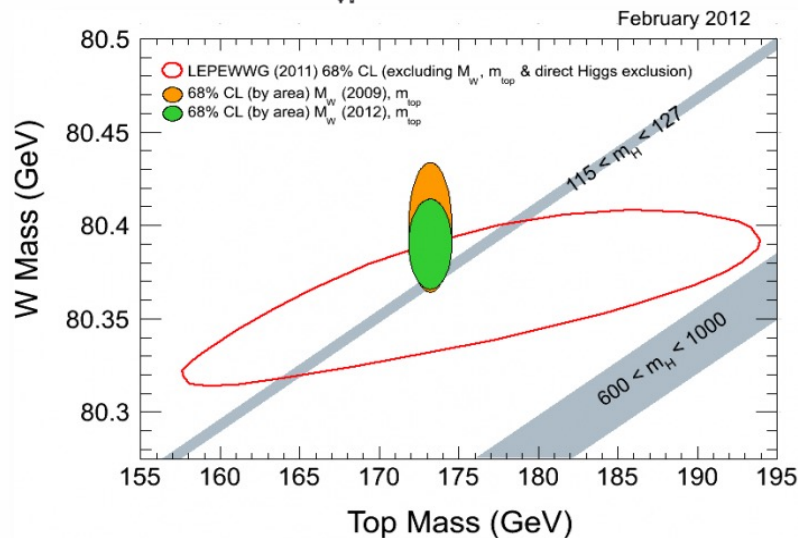
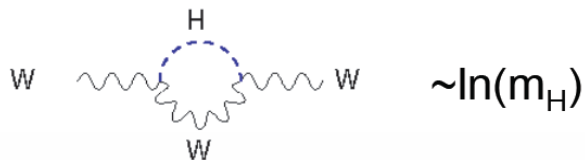
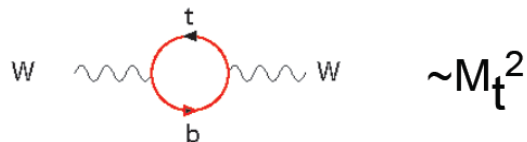
G. S. Guralnik,[†] C. R. Hagen,[‡] and T. W. B. Kibble

Department of Physics, Imperial College, London, England

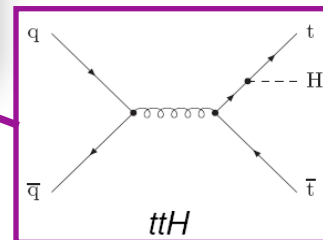
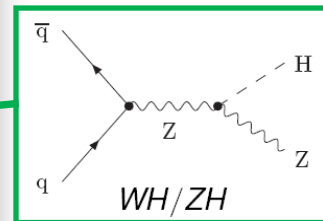
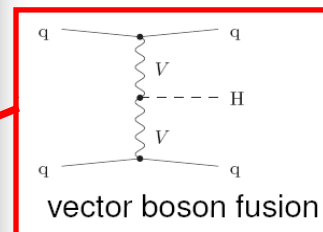
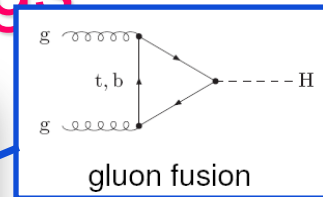
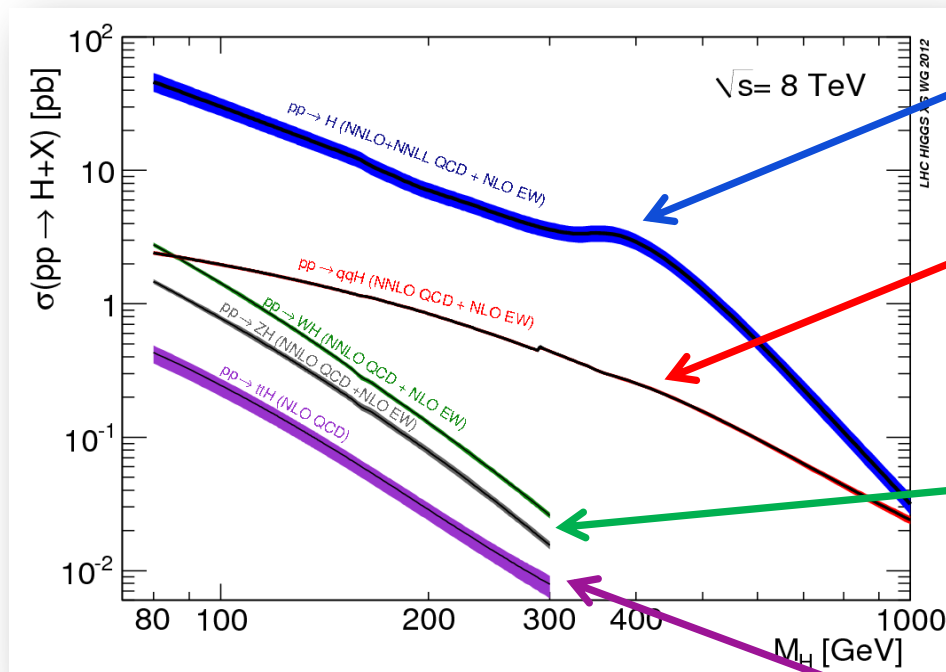
(Received 12 October 1964)

2 páginas

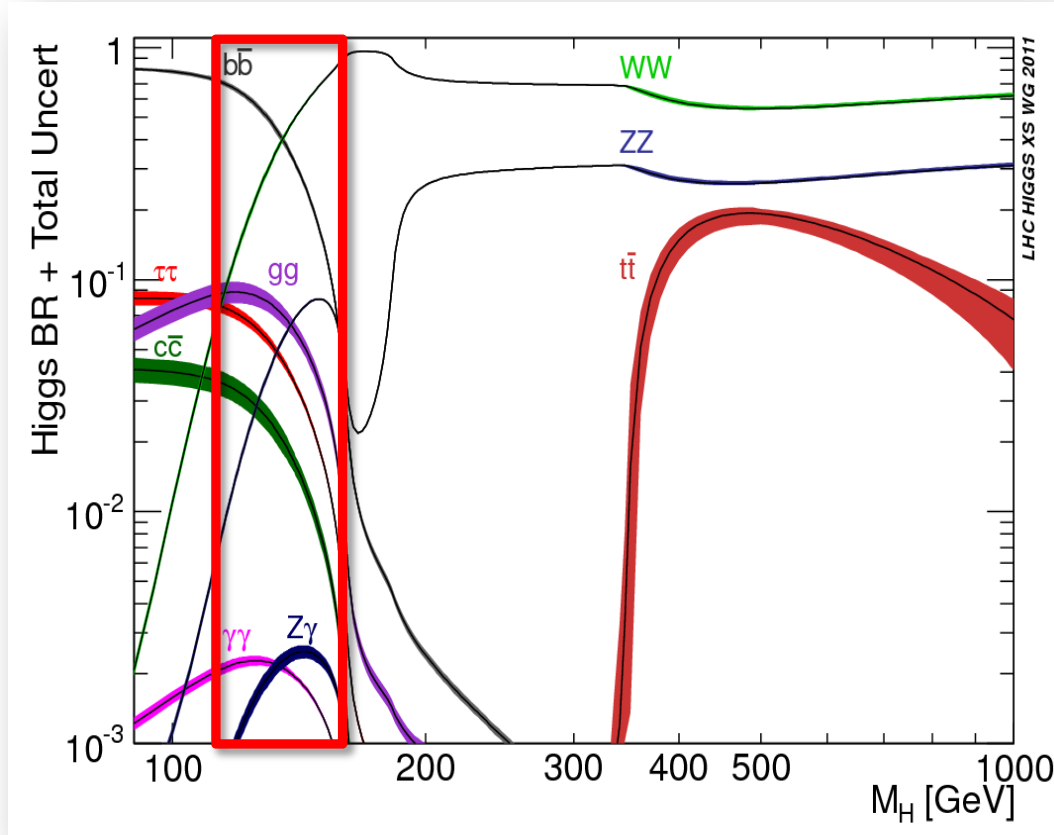
Situación hasta hace 9 años



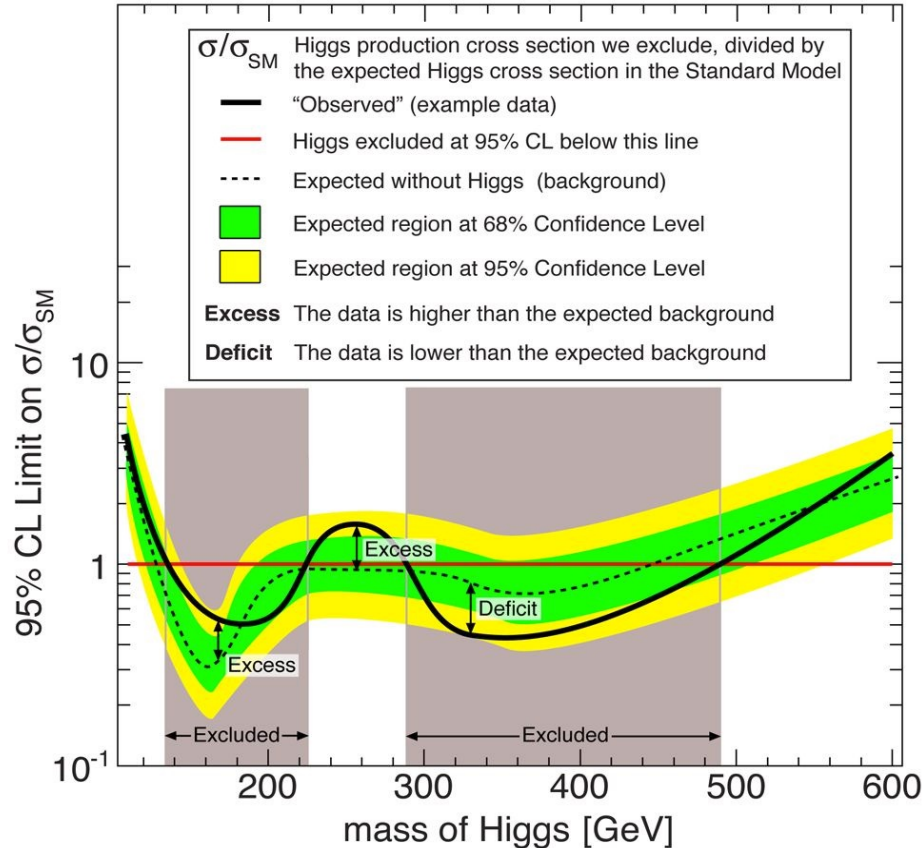
Producción de Higgs



Decaimiento del Higgs

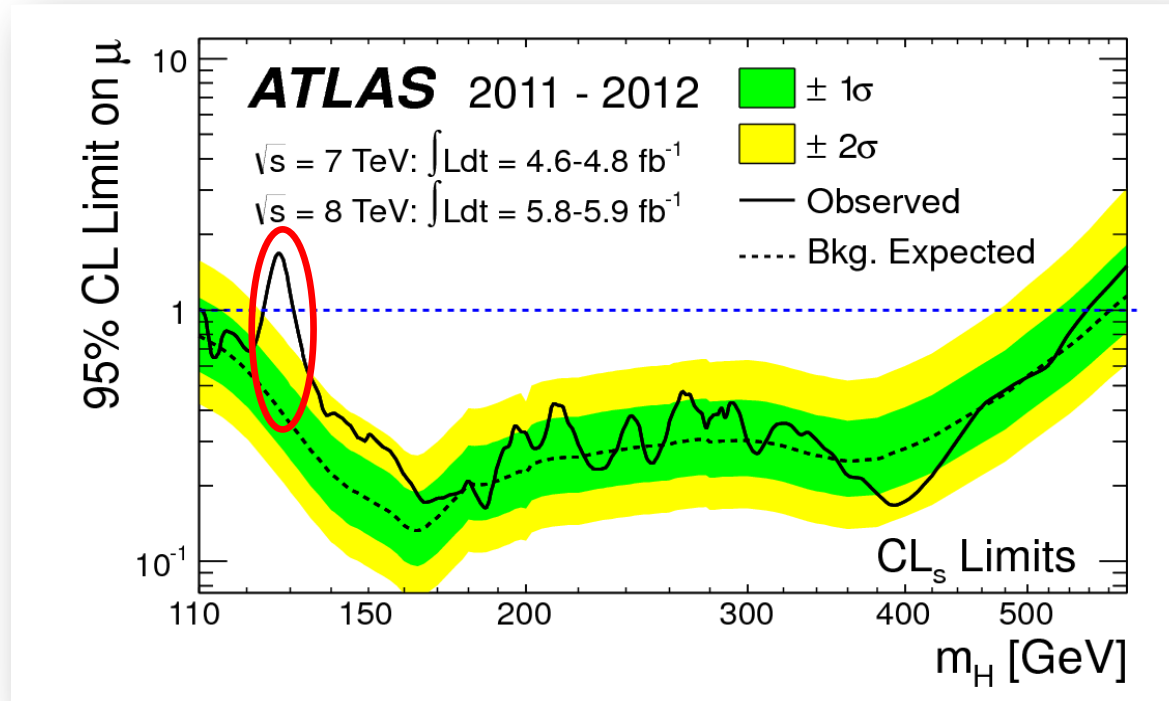


Búsqueda del Higgs: “the basics”



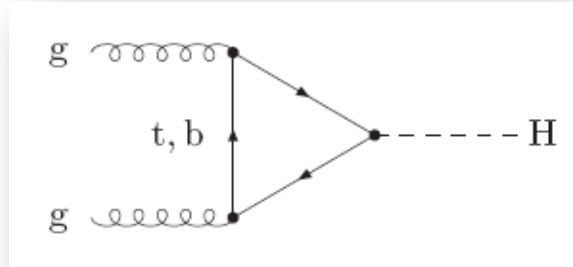
Una nueva partícula

- Julio 4 de 2012: “*Discovery of a Higgs-like particle at 125 GeV*”
 - Sólo 2 análisis con una significancia global / local de 5.0 / 5.9 σ

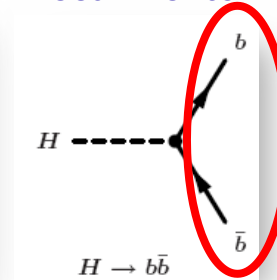


¿Cómo es un “evento de Higgs”?

Producción



Decaimiento



Otros procesos “similares”

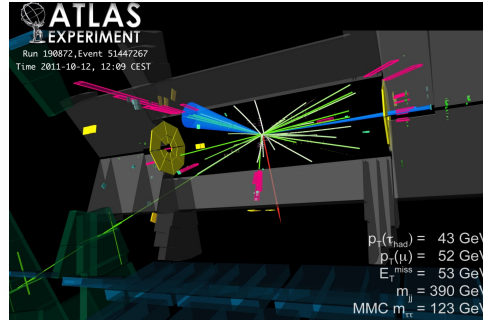


- **Vemos “estados finales”**
 - No podemos decir si UN evento es de Higgs o no
- **¡De cada 1.000.000.000 de estos eventos, sólo 1 es de Higgs!**



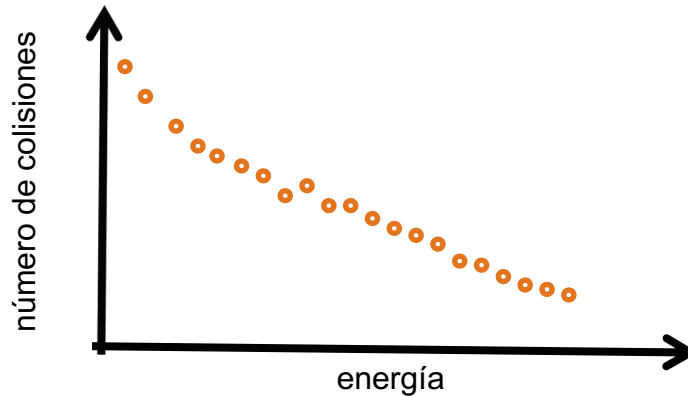
Receta para “ver” el bosón de Higgs

Miramos una colisión de los eventos que se parecen al Higgs

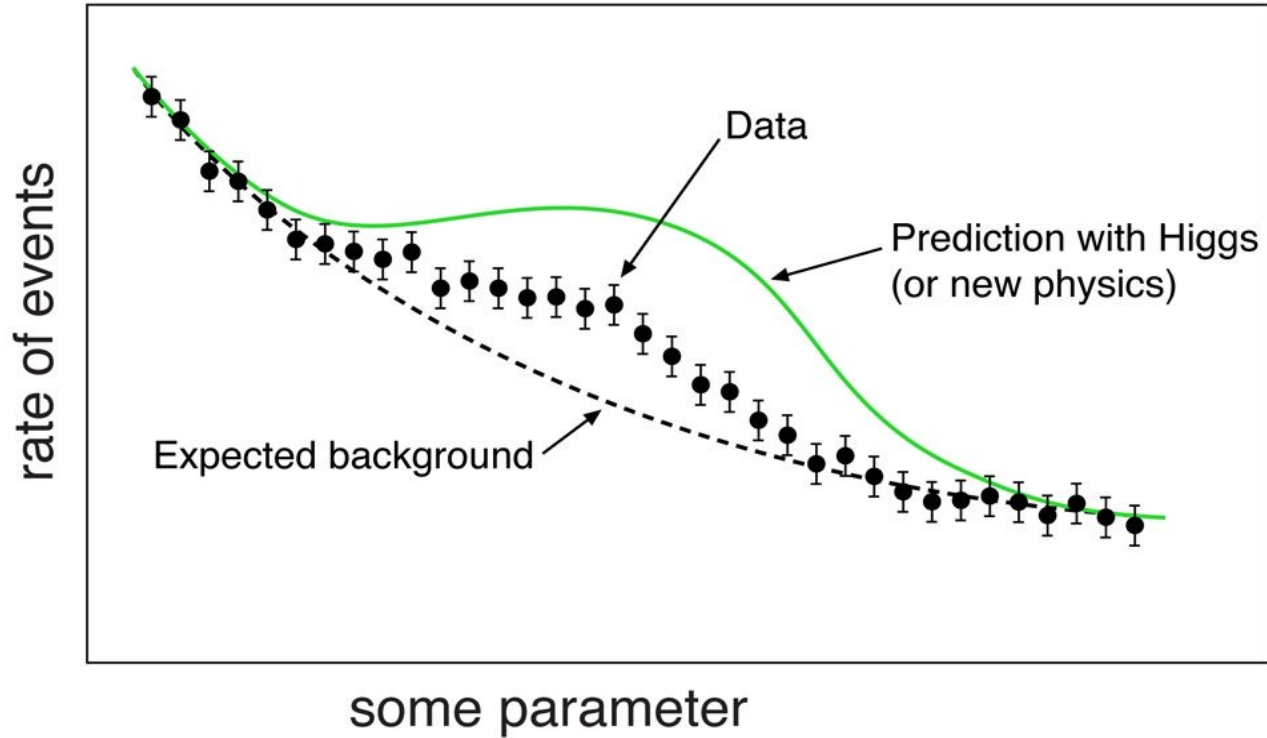


... medimos la masa de los dos “b” del estado final ...

... y contamos cuántas colisiones hay para cada energía.

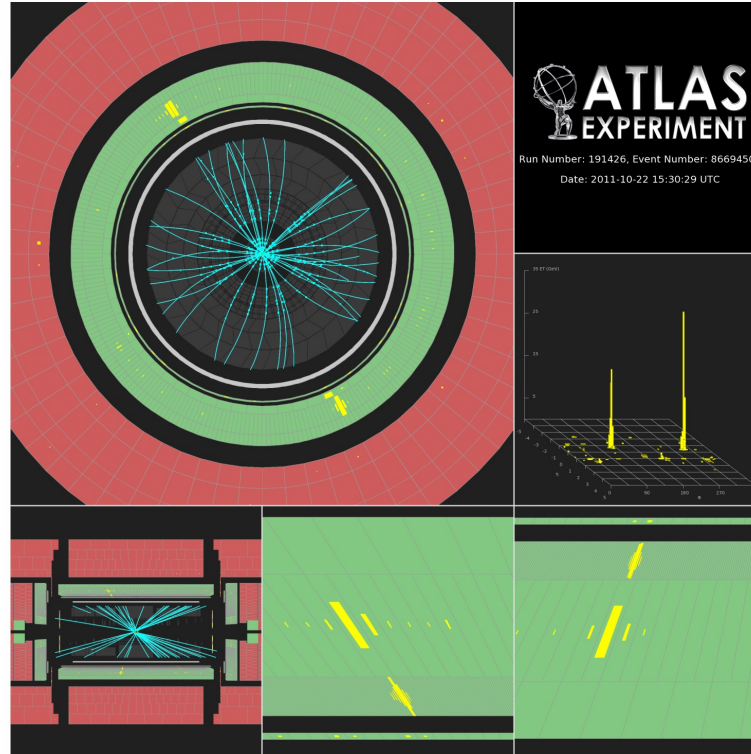


La búsqueda: a contar ...

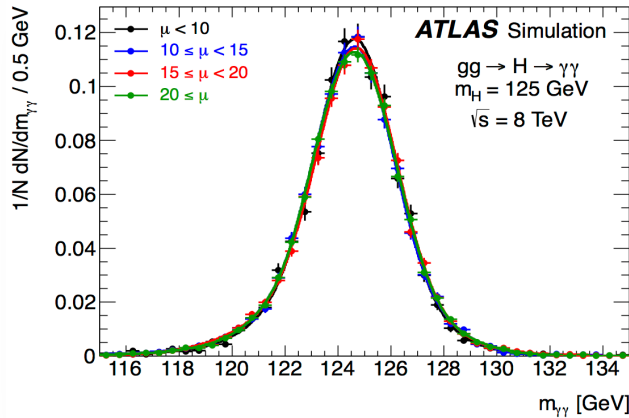


$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

- $110 < m_H < 150 \text{ GeV}$
- $\sigma \times \text{BR} \sim 50 \text{ fb @ } 126 \text{ GeV}$
- **2 γ aislados y energéticos**
 - **Background: producción de 2γ**
- **Dividir en 10 categorías con distinta sensibilidad en base a:**
 - **Región del detector**
 - **γ convertidos o no**
 - **$p_T^{\gamma\gamma}$**
 - **Con o sin 2 jets adicionales**
- **Con esta selección se esperan:**
 - **170 eventos de señal (eficiencia = 40%)**
 - **6340 eventos de background**
 - **S/B $\sim$ 3%**



$H \rightarrow \gamma\gamma$: puntos fuertes



Excelente resolución en masa

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2 E_1 E_2 (1 - \cos\alpha)$$

✓ E-scale entendida a $\sim 0.3\%$

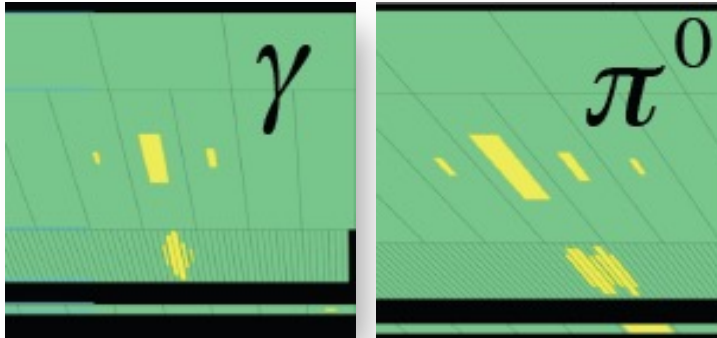
✓ gran resolución angular
($\sigma_z = 1.5 \text{ cm}$)

✓ $s(m_{\gamma\gamma}) = 1.6 \text{ GeV}$

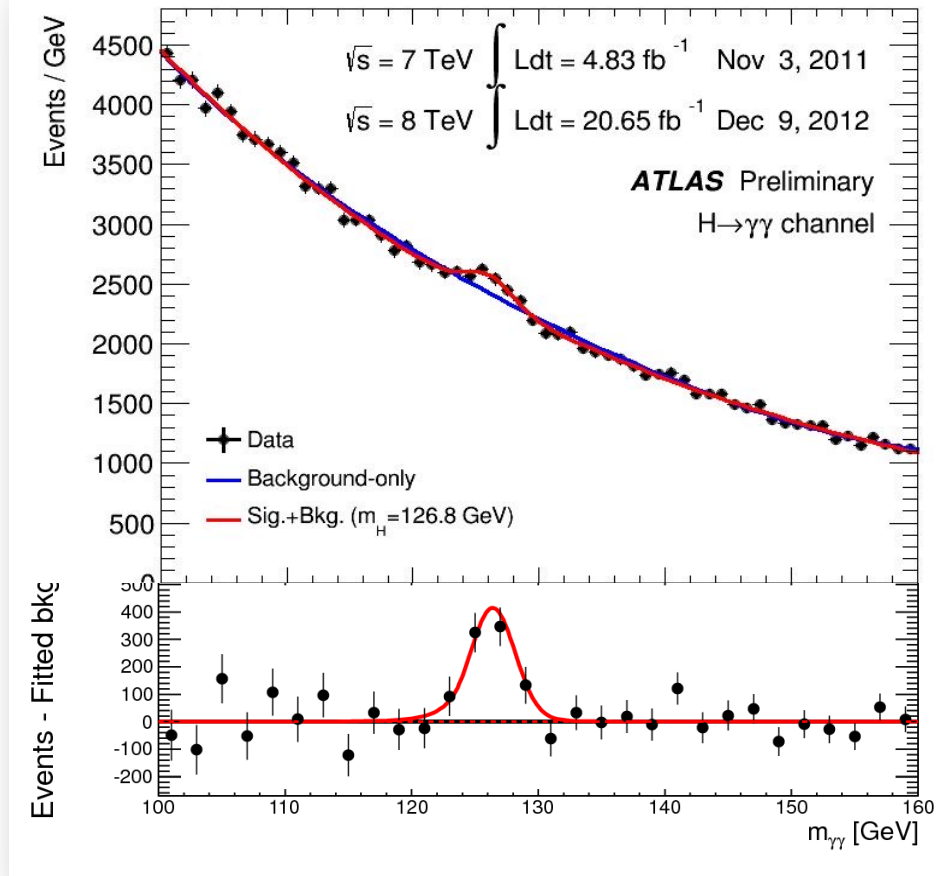
Alta pureza

✓ $\text{prob}(\text{jet} \rightarrow \gamma) \sim 10^{-4}$

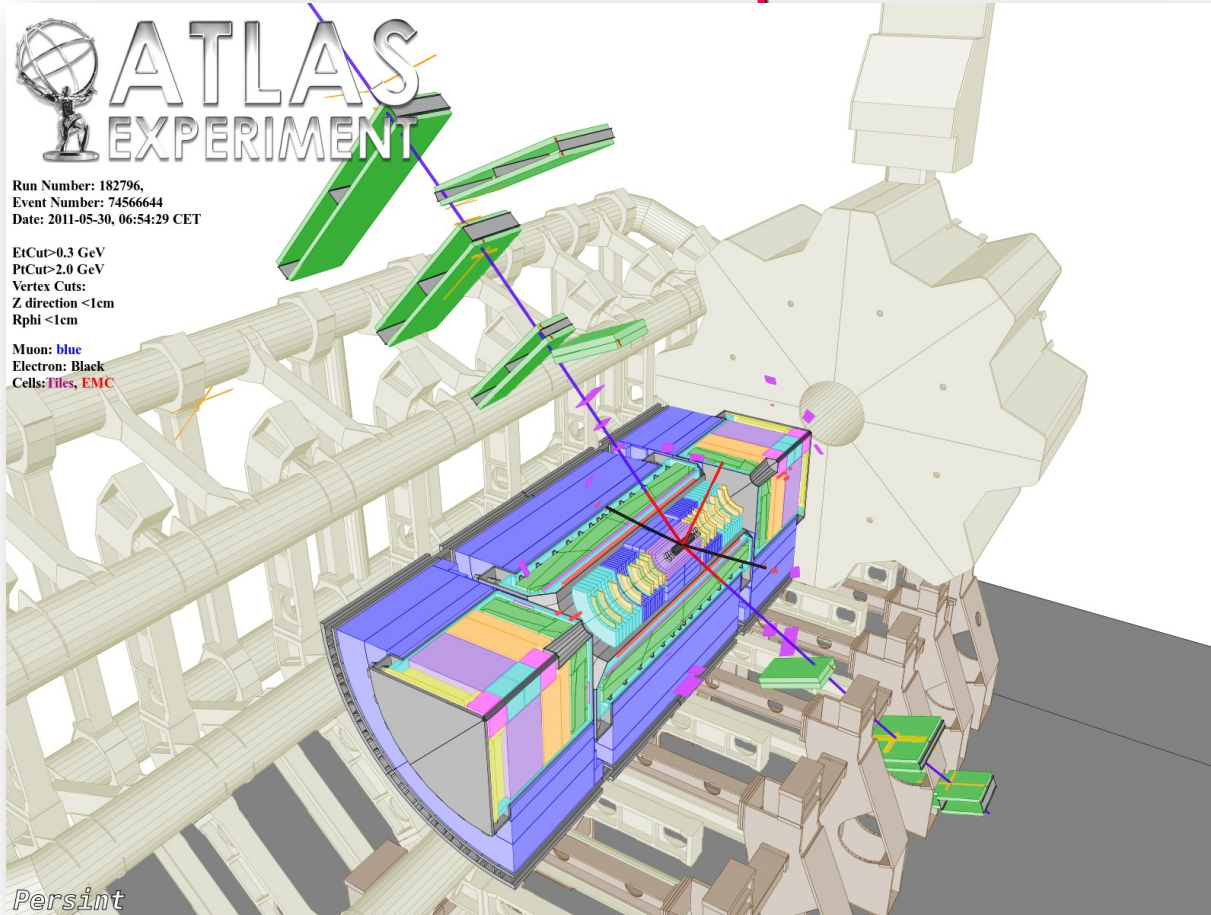
✓ eficiencia $\sim 90\%$



Un análisis de búsqueda ($H \rightarrow 2$ fotones)

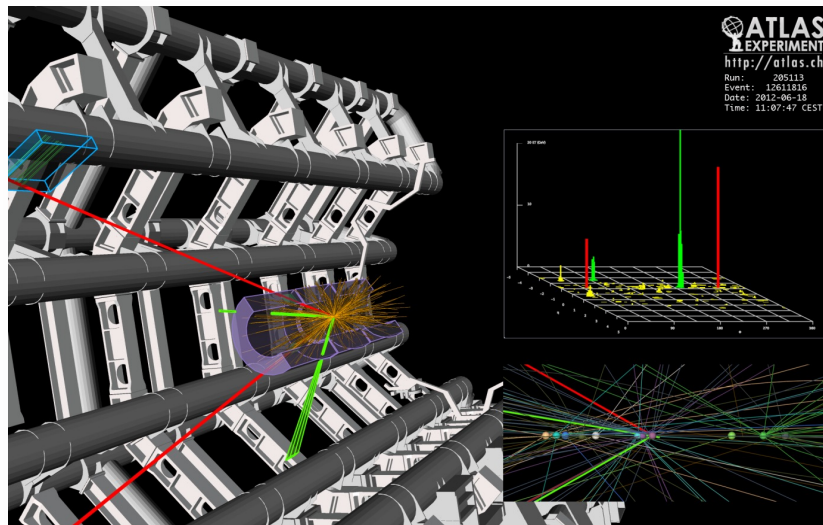


$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptones}$

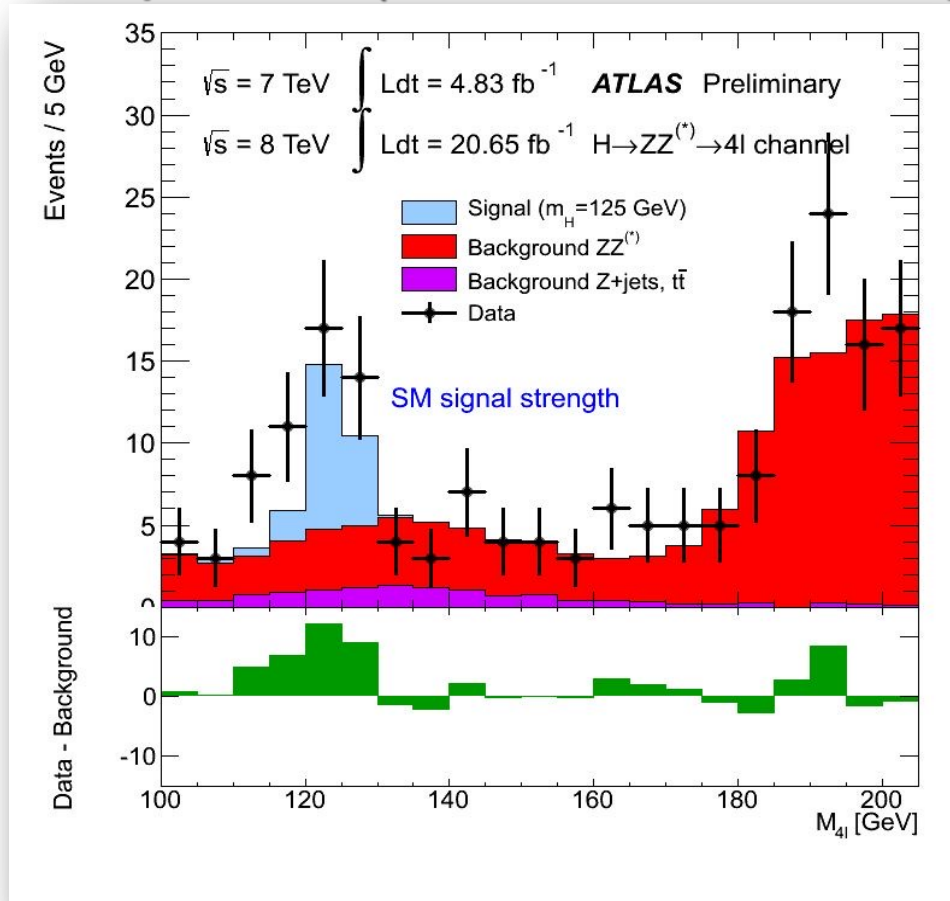


$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l \text{ (4e, 4}\mu, 2e2\mu\text{)}$$

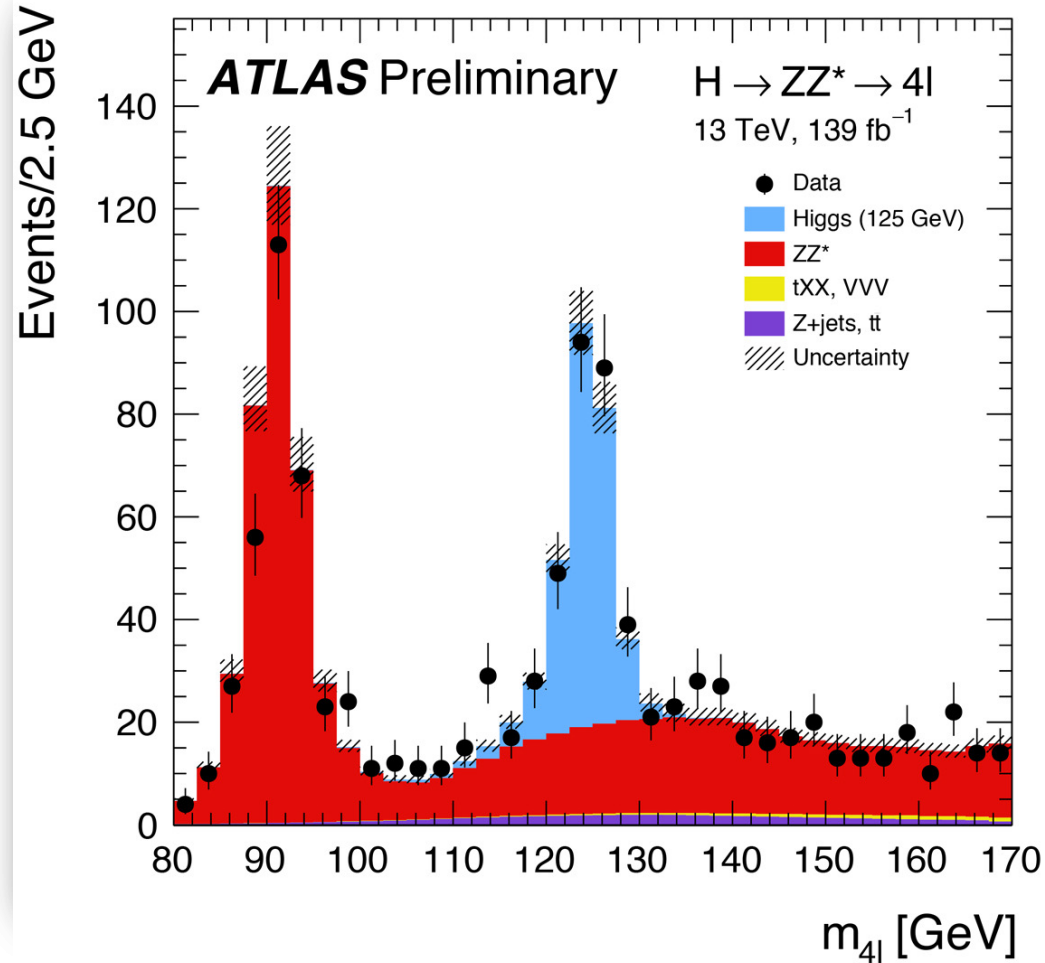
- $110 < m_H < 600 \text{ GeV}$
- $\sigma \times \text{BR} \sim 2.5 \text{ fb @ 126 GeV}$
- **4 leptones (requisitos en masa y momento)**
 - Background: ZZ (irreducible)
 - Z+jets, top (bajo control con isolation + “promptness”)
- **Características principales**
 - Alta aceptación y eficiencia
 - Gran resolución en energía y momento
 - Canal muy limpio
 - control sobre background instrumental



Otra búsqueda ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptones}$)

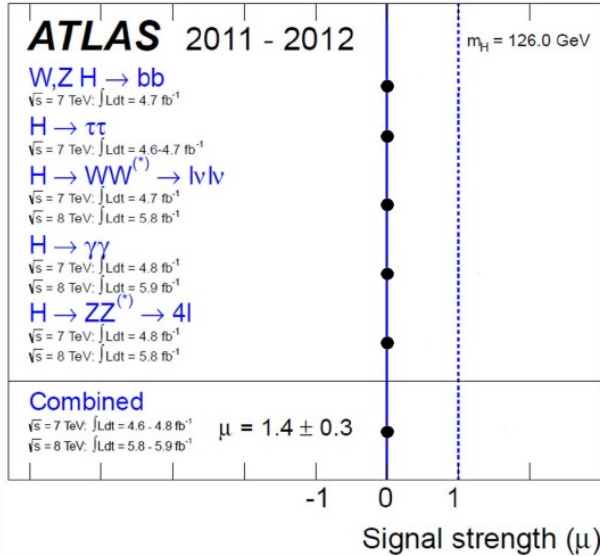


Otra búsqueda ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptones}$)

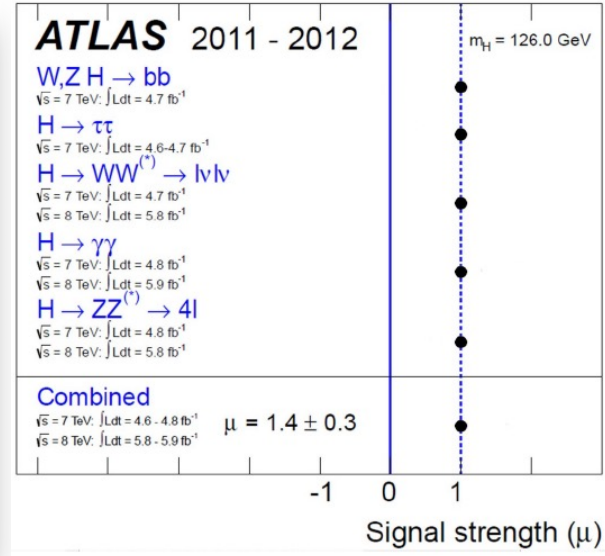


¿Se parece al Modelo Estándar?

$$\mu = \frac{\text{Measured event yield}}{\text{Yield expected from SM Higgs}}$$

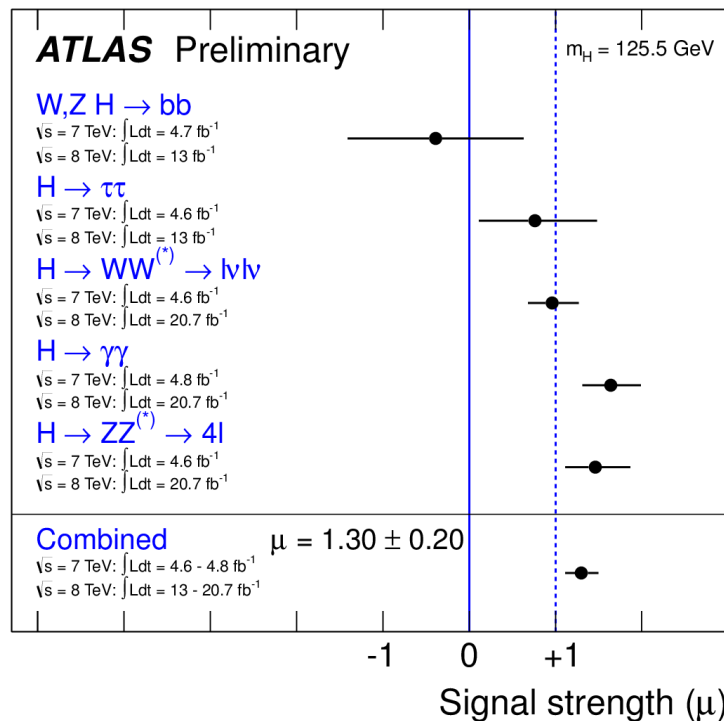


Sin Higgs



Con Higgs

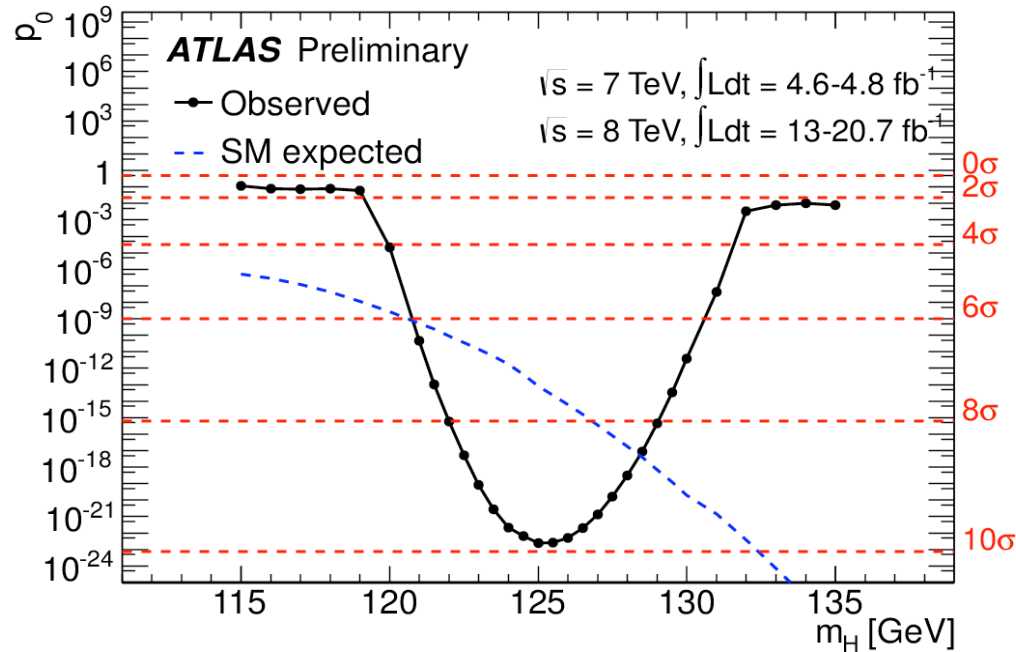
Consistencia de los resultados



Consistentes para

- ✓ *distintos mecanismos de producción*
- ✓ *distintos modos de decaimiento*

¿Una fluctuación azarosa?



Probabilidad de una fluctuación azarosa: 2×10^{-23}

Conclusiones

Universe Accelerating?



The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

Why No Antimatter?



Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

Dark Matter?



Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

Origin of Mass?



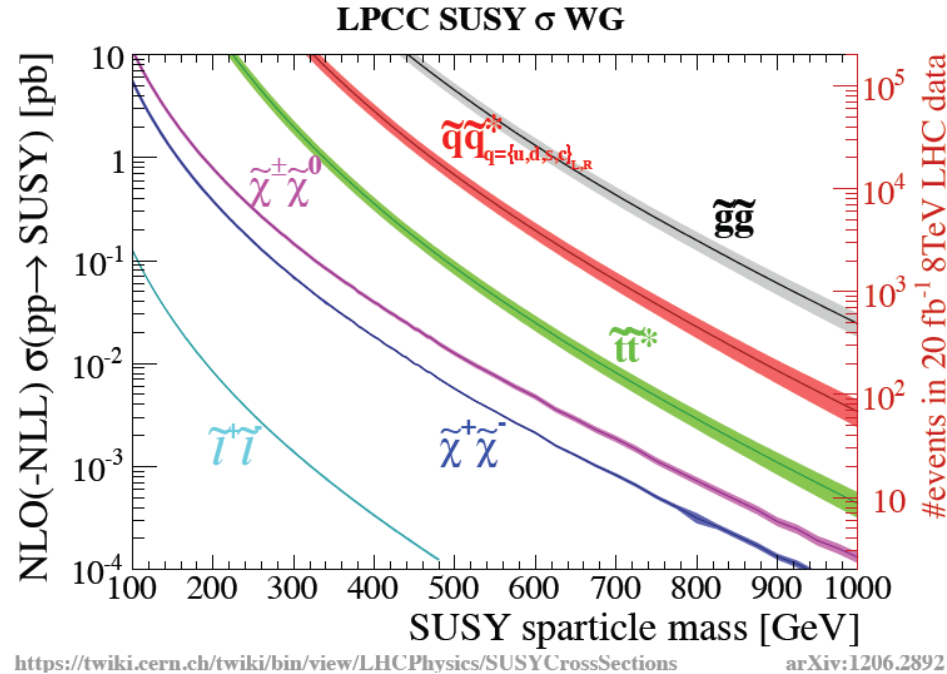
In the Standard Model, all particles are thought to have mass. But where does the mass come from? Called the Higgs mechanism, the answer is expected soon? Is it possible that there are other types of particles that have mass?

Back Up

¿QUÉ HAY MAS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR?

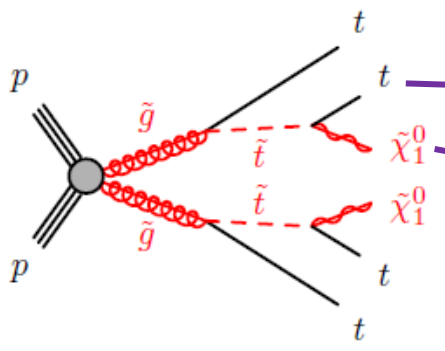
¿ Quién es SUSY? ¿ Dónde esta?

Producción de SUSY en el LHC

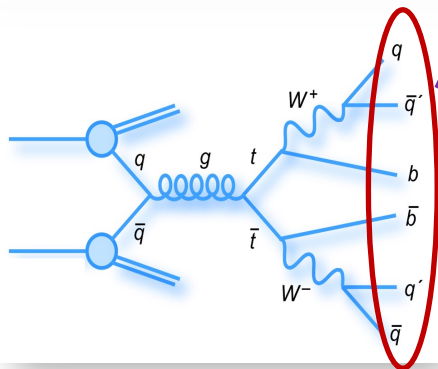


- Si $m(\text{gluino}) \sim 800$ GeV, el LHC ya fabricó 5.000 pares de gluinos
- “Natural” SUSY: los squarks de la 3^{er} generación son los más livianos

Sólo vemos estados finales



SEÑAL



FOND O

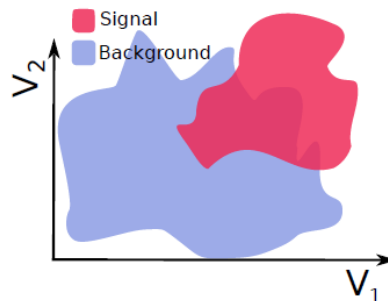
quarks $\rightarrow$ jets

LSP → Energia Faltante (MET)

Jets + MET

Jets + MET

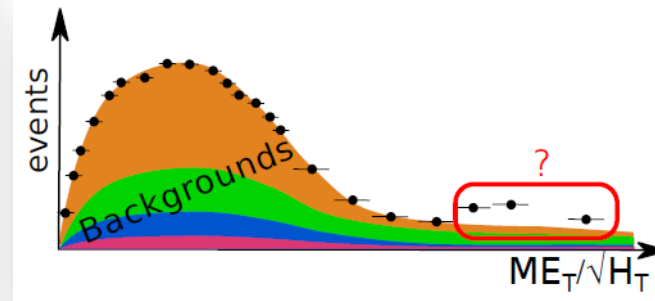
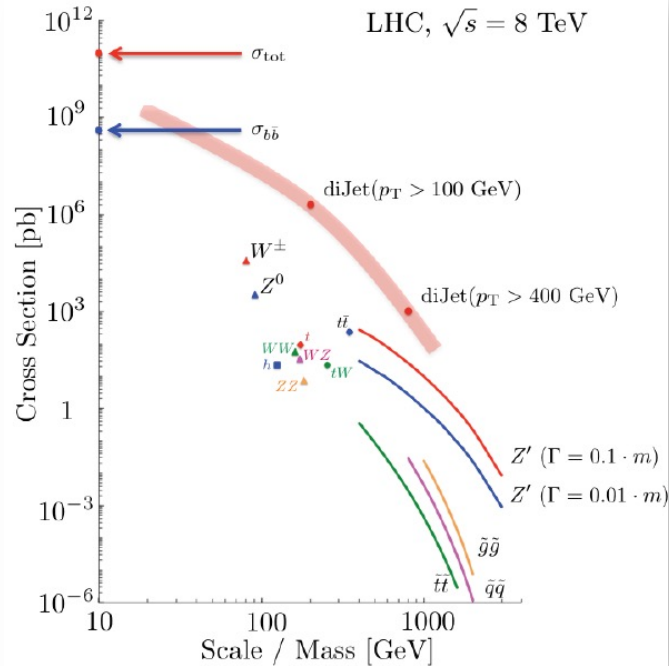
Selección de eventos que maximize señal / fondo, por ejemplo:



$$E_{\text{T}}^{\text{miss}}/\sqrt{H_{\text{T}}} > 4\text{GeV}^{1/2}$$

$$M_J^\Sigma = \sum_{fat-jets} m_{jet}^{R=1.0}$$

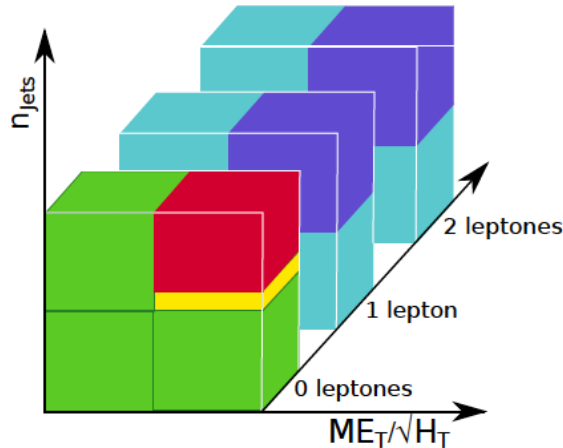
Determinación de los fondos



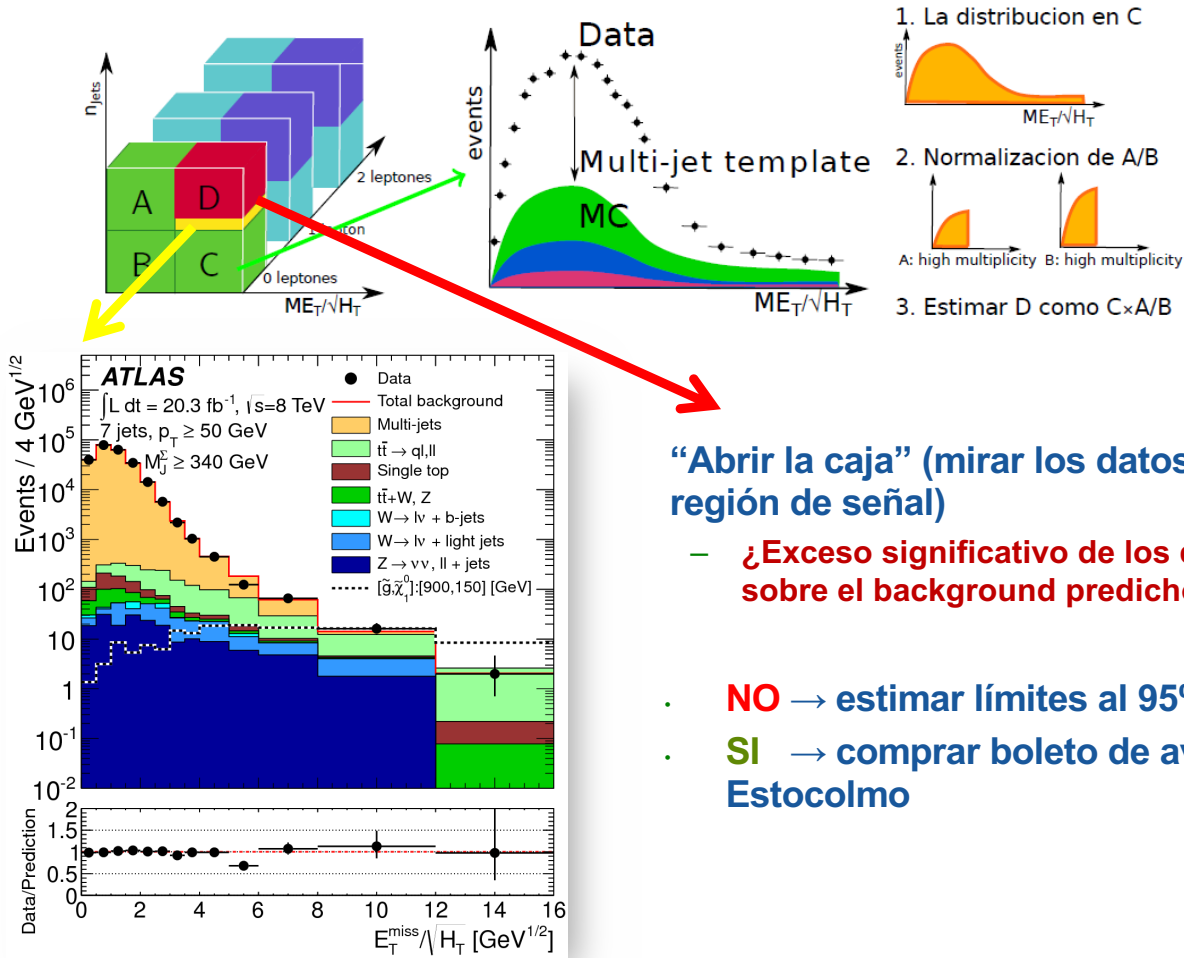
Búsqueda de SUSY = búsqueda de un exceso significativo de los datos sobre el fondo esperado en tails de distribuciones sensibles

Determinación de los fondos

- ▶ Obtener la mejor descripción posible del background en regiones donde se espera señal (SR).
- ▶ ¿Cómo cuantificar si la predicción es correcta?
 - ▶ ¿Comparación datos vs. predicción del BKG en regiones de señal? NO
 - ▶ *Blinding* de los datos.
 - ▶ Ajustar la predicción a los datos en las SRs preassume que no existe señal.
 - ▶ Comparación datos vs. simulación en regiones de control (multi-jet y 'leptonic').
 - ▶ Cinemáticamente similares a las SR pero ortogonales.



Estrategia del análisis

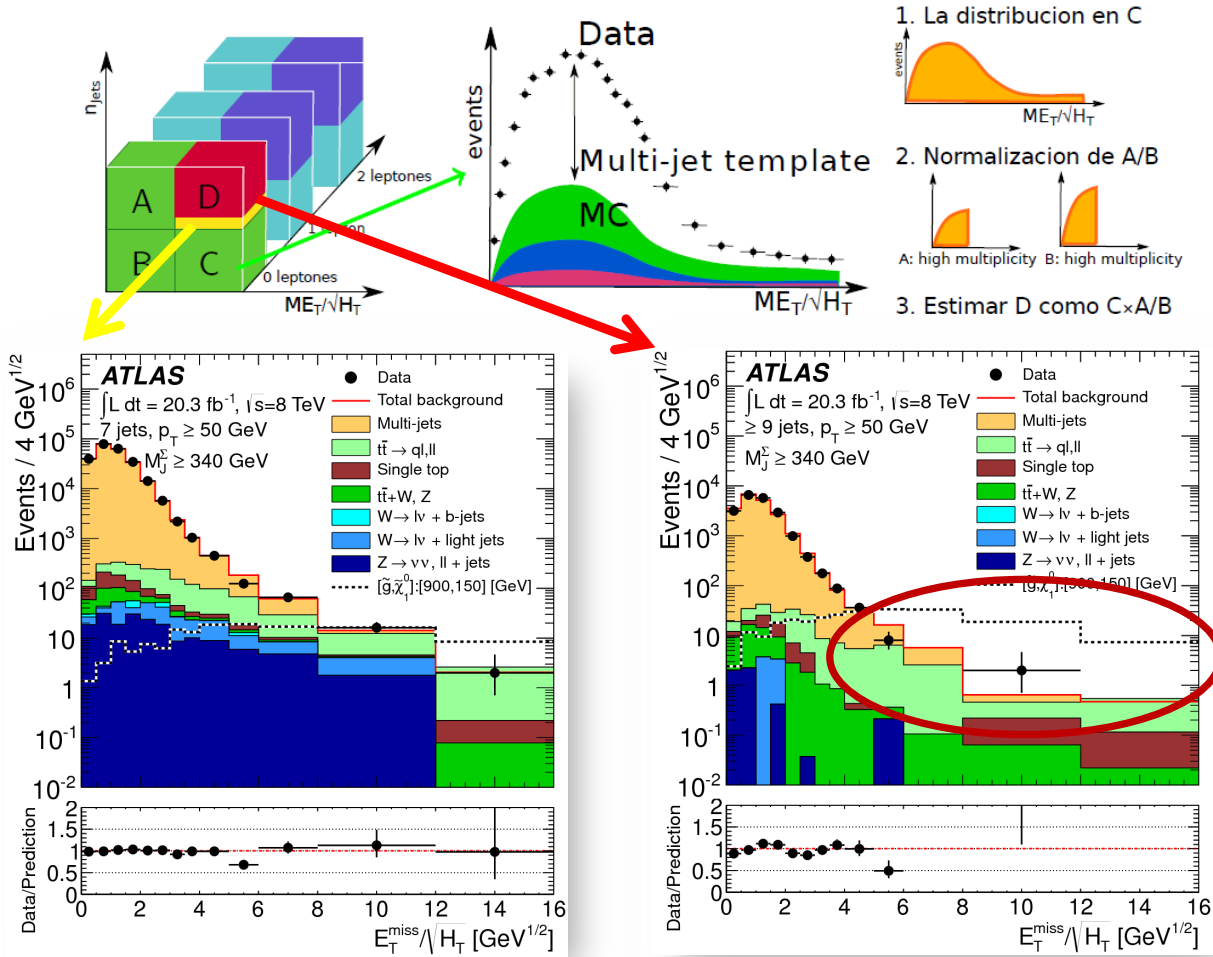


“Abrir la caja” (mirar los datos en la región de señal)

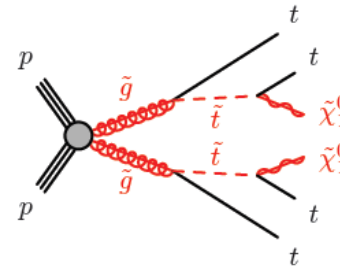
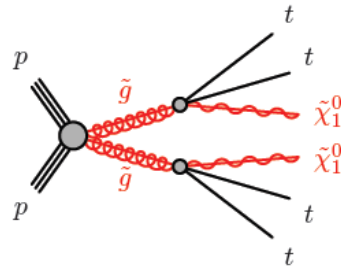
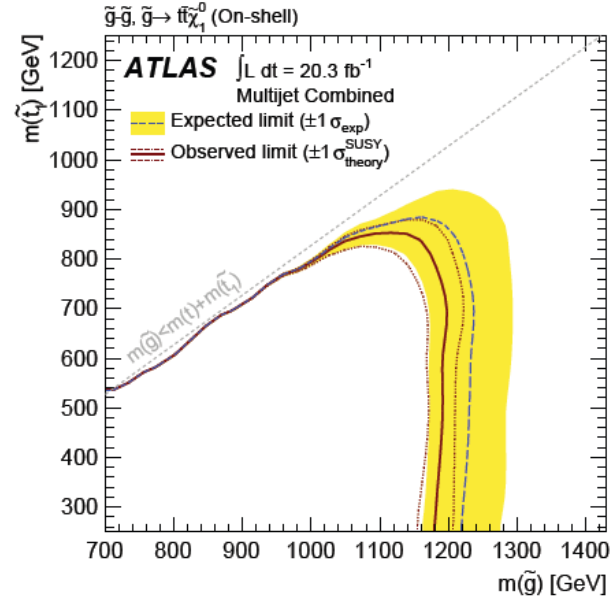
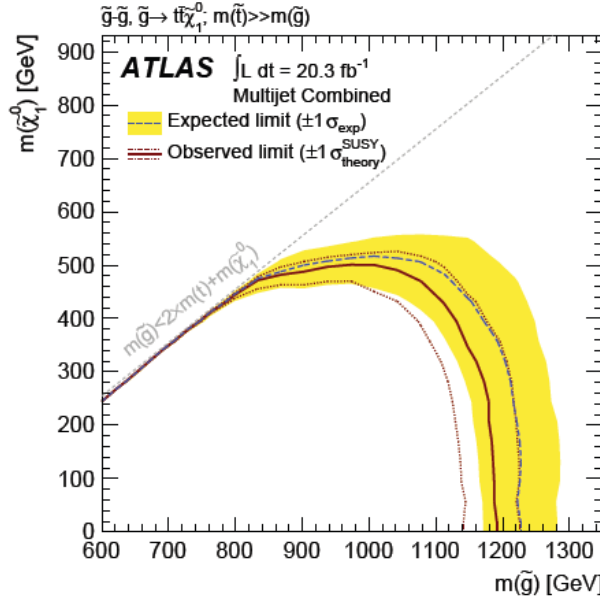
— ¿Exceso significativo de los datos sobre el background predicho?

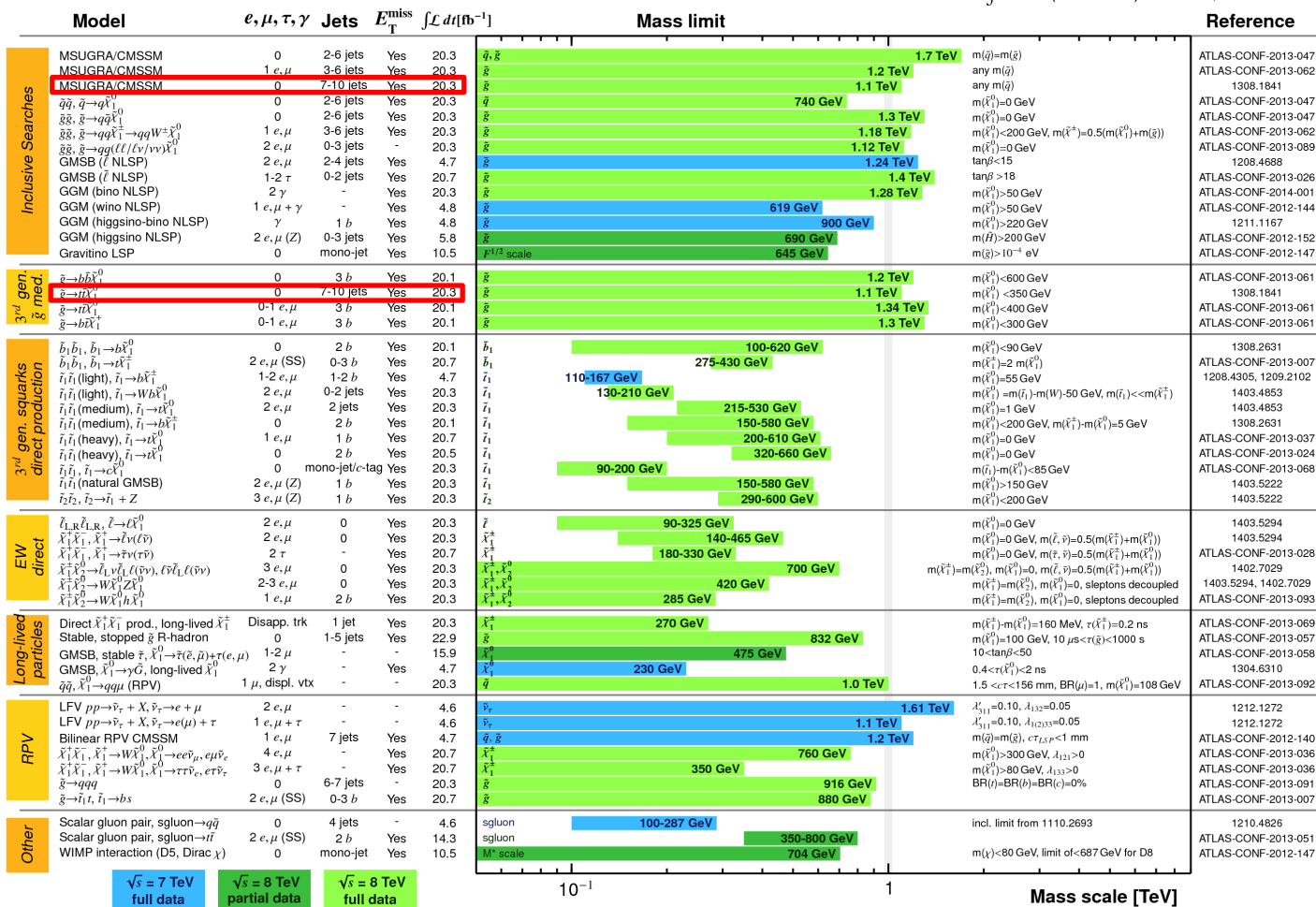
- **NO** → estimar límites al 95% CL
- **SI** → comprar boleto de avión a Estocolmo

Estrategia del análisis



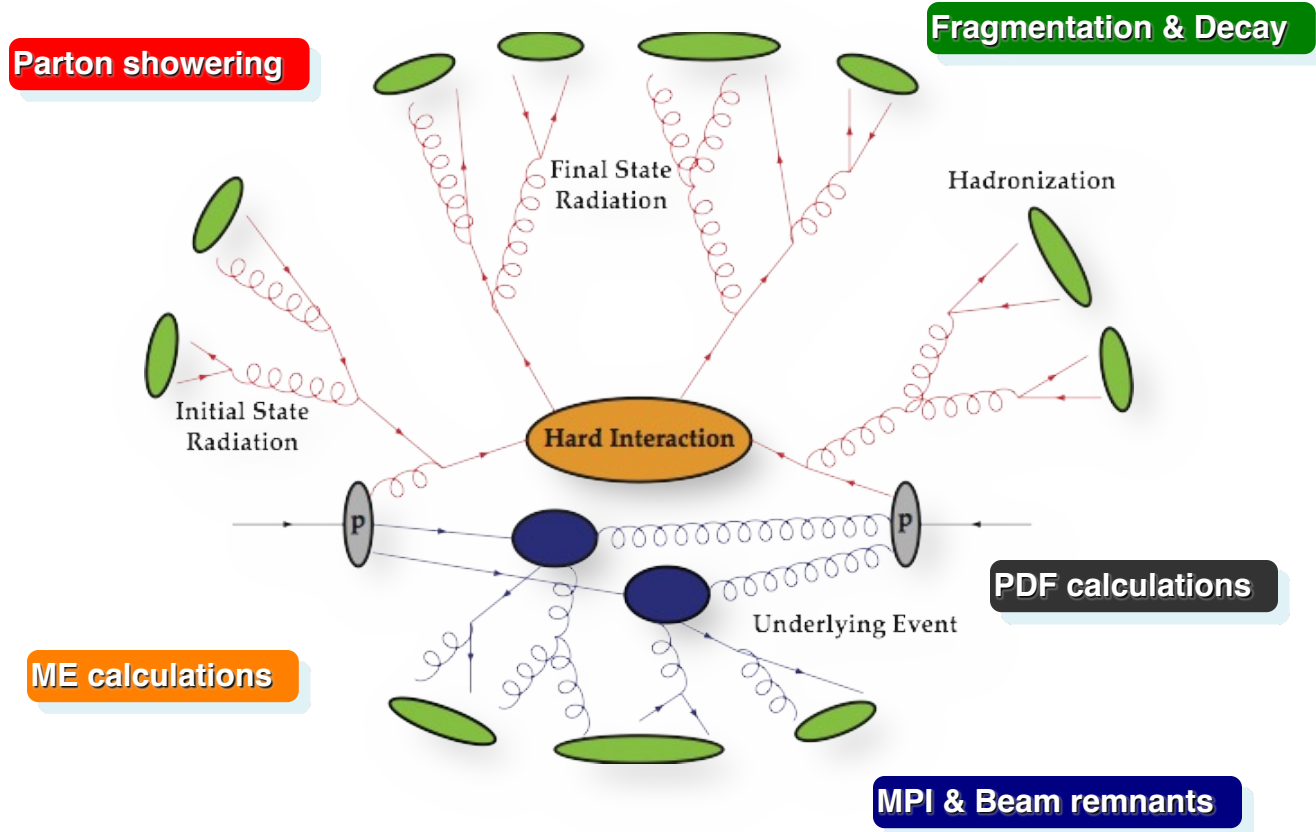
Límites (Gtt model)





*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed minus 1 σ theoretical signal cross section uncertainty.

Simulación de Eventos

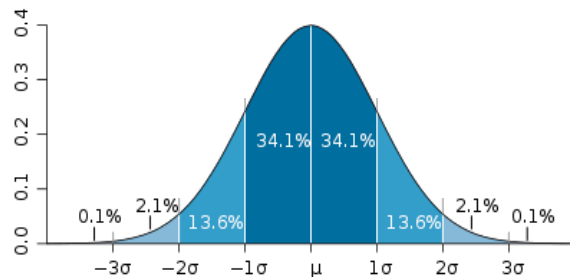


Intervalos de Confianza(C.I.)

Un intervalo de confianza da un rango estimado de valores que incluyen el verdadero (y desconocido) valor μ de un parametro poblacional X

$$\hat{\mu} = \langle X \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_i$$

El estimador del verdadero parametro $\hat{\mu}$ se calcula con la media muestral $\langle X \rangle$



C.I. central para una muestra gaussiana

$1\sigma \rightarrow 68.27\%$

$2\sigma \rightarrow 95.45\%$

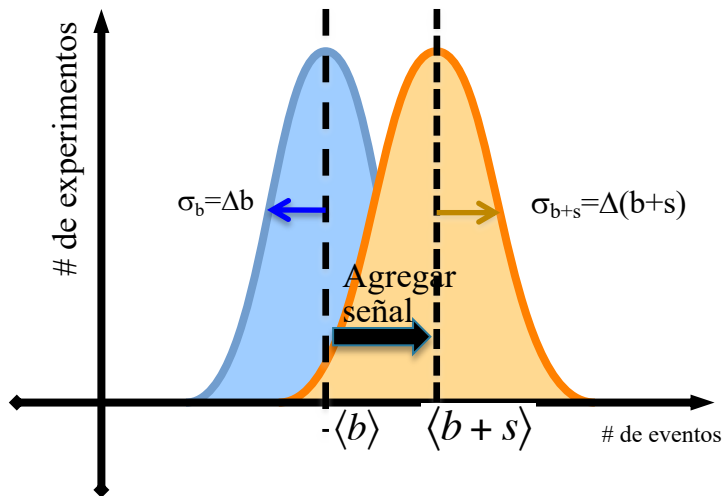
$3\sigma \rightarrow 99.75\%$

$5\sigma \rightarrow 99.99994\%$

Si repetimos el experimento N veces, el nivel de un intervalo de confianza (C.L. 90%, 95%, 99%, ...) se refiere al número de veces ($n/N \cdot 100$ experimentos) que el intervalo contiene al valor verdadero

Límite Esperado

- Generar un ensemble de N experimentos usando la distribución medida de $\langle b \rangle + \Delta b$ ($\langle b \rangle$ es la media poissoniana, Δb es gaussiana)
- “Límite Esperado”: máximo # de eventos de señal en la muestra tal que $b+s$ C.I. contenga la predicción del background, $\langle b \rangle$, 95% de las veces.



Límite Observado:

máximo # de eventos de señal en la muestra tal que $b+s$ C.I. contenga N_{obs} 95% de las veces

El límite se traduce en la medición de un observable usando modelos teóricos y acceptance/efficiency de señal

Simulation tools

Event Generators

- General purpose generators (HERWIG, PYTHIA, SHERPA)
 - 1 to 2, 2 to 2, 2 to 3 processes
 - Hadronization
 - Underlying Event
 - Tuned to Tevatron and LHC data
- Matrix Element Generators (ALPGEN, MADGRAPH, MC@NLO)
 - ME expressions for multi-particle final state (LO)
 - Interfaced with parton shower generators for hadronization

Detector Simulation

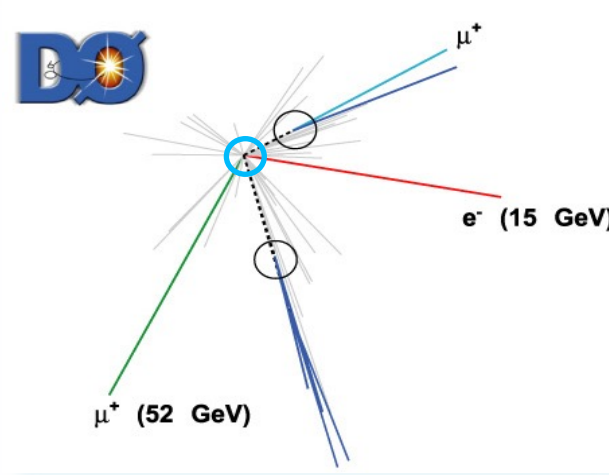
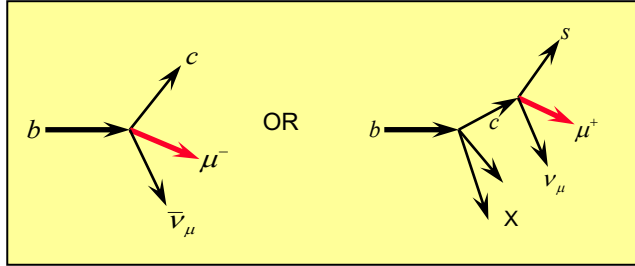
- Fast Simulation
 - Detector response and resolution parameterized
- Full Simulation
 - Passage of particles through detector simulated with GEANT
- Trigger emulation

Simulated events are treated as collider events in data analysis.

b-jet Identification

- Semileptonic decays of the b-quark

- $B(b \rightarrow \mu + X) \approx 20\% \Rightarrow$ detect μ in jets



- life time ≈ 1.5 ps $\Rightarrow c\tau \approx 0.5$ mm

- Look for secondary vertices or tracks with large impact parameter w.r.t. interaction point

