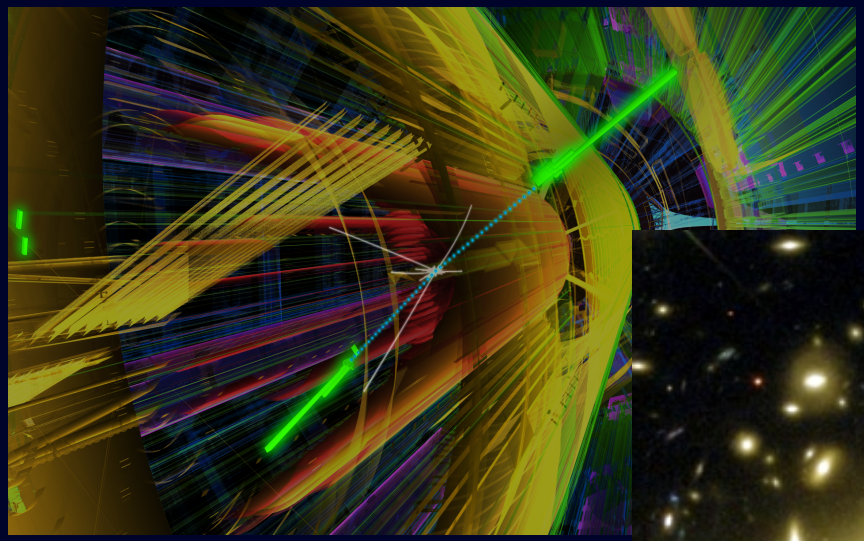
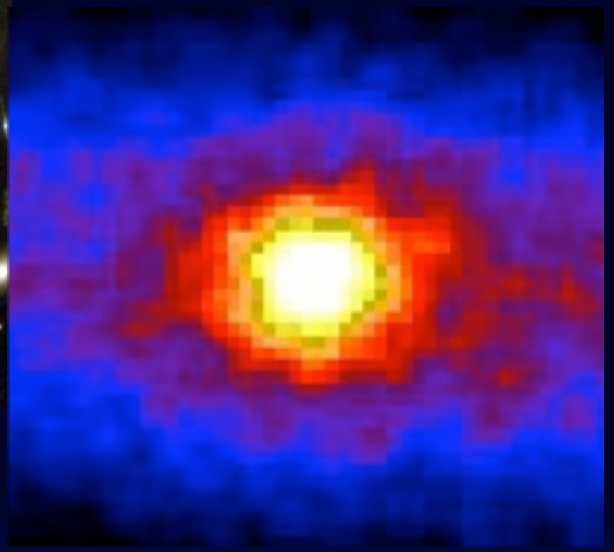
La Física de Partículas más allá del Higgs



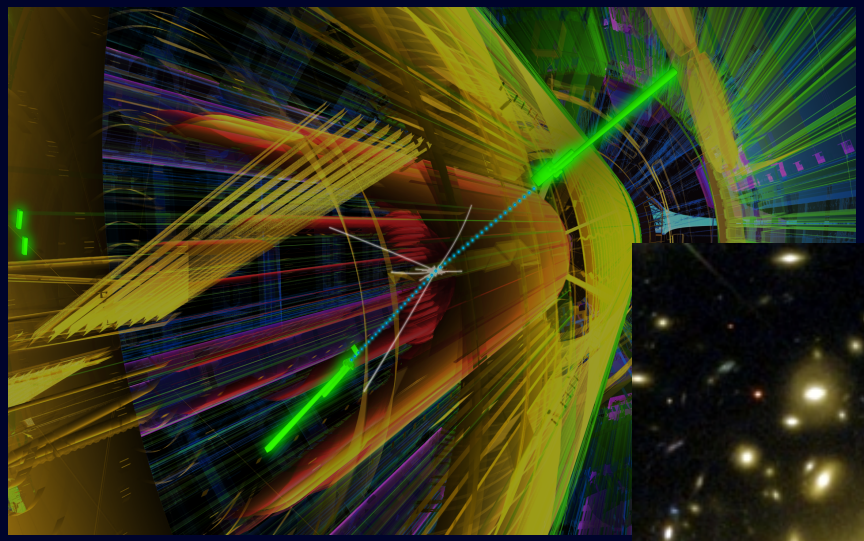


Marcela Carena
Fermilab & Uchicago

Instituto Balseiro, S.C. de Bariloche, Diciembre 19, 2015

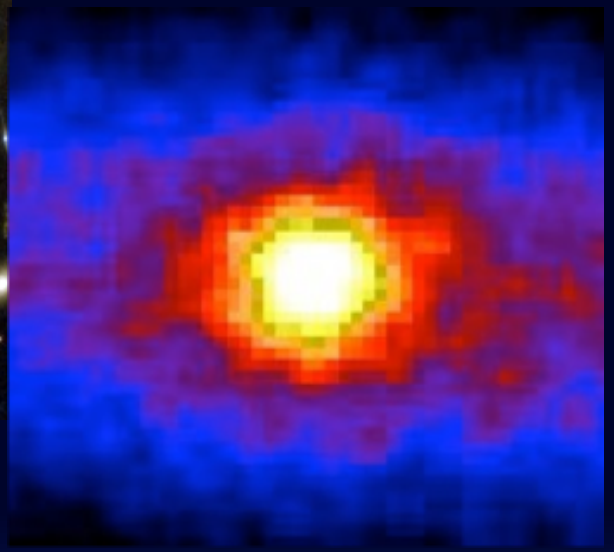
60 Aniversario 1955 - 2015

Los Grandes Misterios de la Física de Partículas



¿Qué da masa a las partículas y les impide moverse a la velocidad de la luz?

¿De qué está hecha la madeja cósmica y qué la mantiene unida ?



¿Qué es lo que distorsiona las imágenes de galaxias lejanas?

¿Cuáles son los secretos codificafos en los minúsculos, enigmáticos Neutrinos?

Avances en la Física de Partículas en el último cuarto de siglo

- Triunfo del Modelo Estándard (ME) de partículas a nivel cuántico
- La falta de desintegración del protón y las mediciones del ángulo de Weinberg

➔ excluyen la Unificación de Fuerzas en el ME en favor de la Teoría de Supersimetría

En Fermilab

Descubrimiento del quark top en 1995

Descubrimiento del neutrino tau en el 2000

El legado del LEP 2@CERN

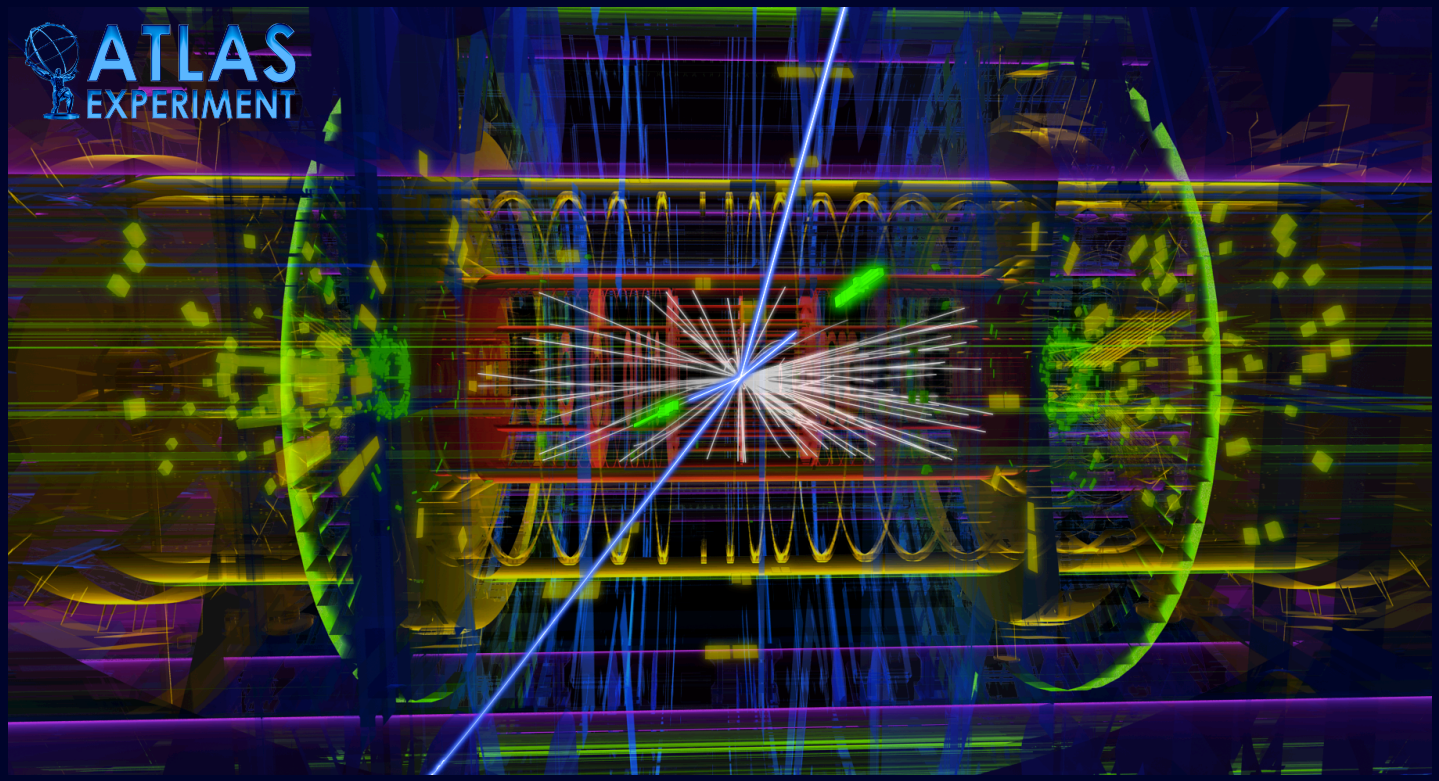
- No se descubre el Higgs, pero medidas de precisión acotan su rango de masa
- Se excluye la posibilidad de bariogenesis a la escala electrodébil en el ME !

La Física de Partículas a comienzos del siglo 21

- **Oscilación de Neutrinos provee evidencia conclusiva de que son masivos**
- **Estudios del Fondo Cósmico de Microondas prueban la existencia de Materia Oscura**
- **Estudios de Supernova y del CMB dan evidencia de Energía Oscura**

El Tevatron y el LHC empiezan la carrera por el bosón de Higgs

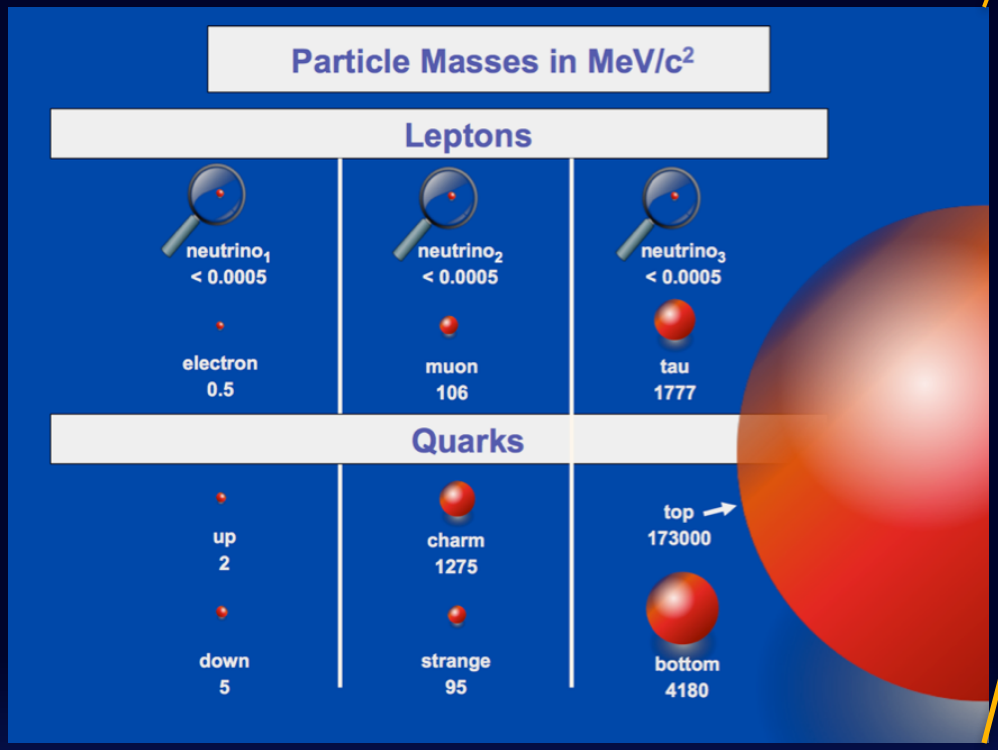
El descubrimiento del bosón de Higgs - 4 de Julio, 2012

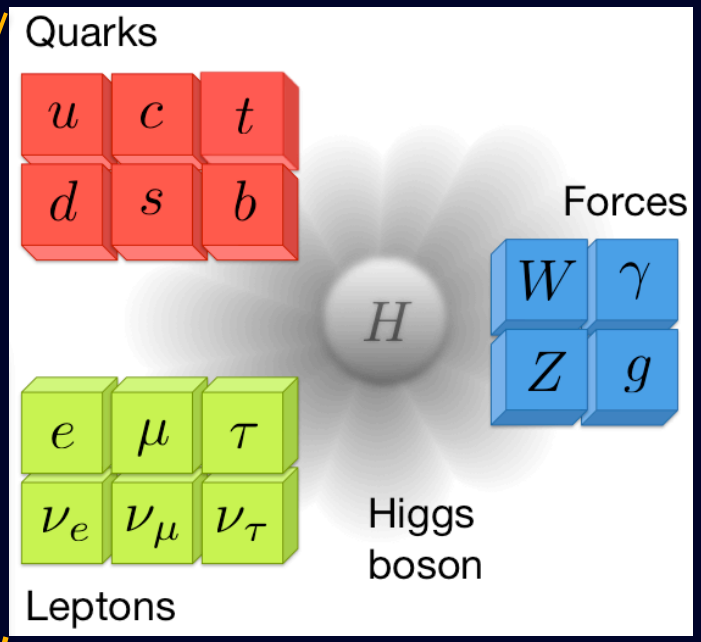


- Una nueva variedad de partícula, no observada anteriormente
    - Un nuevo tipo de interacción entre partículas
- Una nueva era para la física de altas energías y la cosmología

¿Por qué es importante el bosón de Higgs?

Las partículas subatómicas del Modelo Estándard





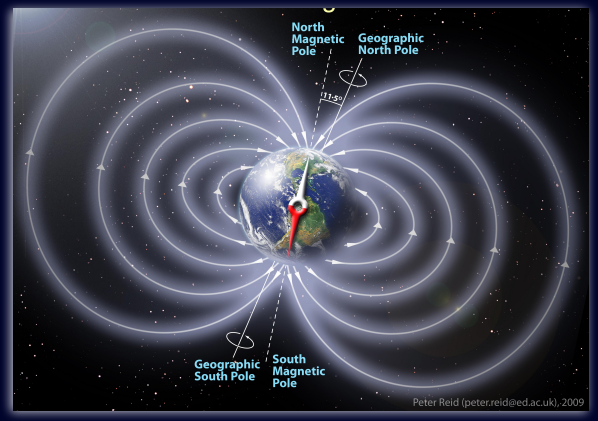
Todas han sido producidas en el laboratorio

Tienen masas muy diferentes

¿Cuál es el origen de las masas de las partículas elementales?

Un campo de energía que permea todo el espacio

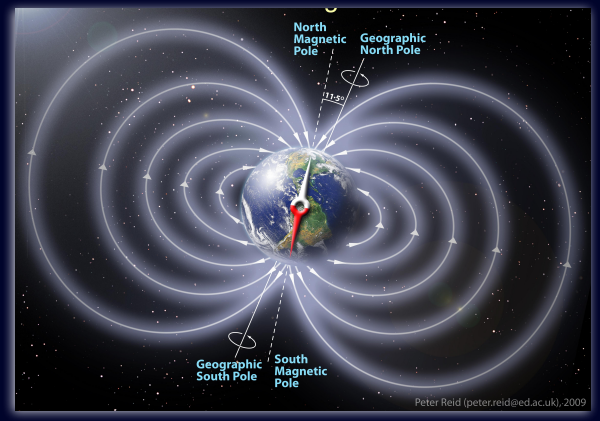
Campo Magnético terrestre



Campo de Higgs

Un campo de energía que permea todo el espacio

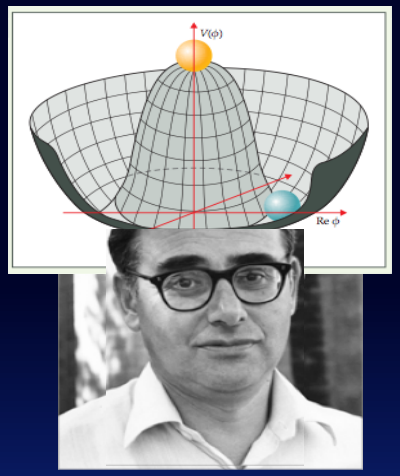
Campo Magnético terrestre



Campo de Higgs

¿Cómo se "prende" el campo de Higgs?

Via la ruptura espontánea de simetría (SSB) $\longleftrightarrow$ $V(\phi) = -m^2|\phi|^2 + \lambda|\phi|^4$



Goldstone's Mexican Hat

La simetría del sistema no es respetada por el estado fundamental

Ideas de materia condensada aplicadas a partículas

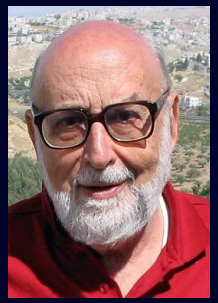
Debido a la simetría hay vacíos degenerados y como el vacío cuántico es como un sistema de muchos cuerpos es difícil transicionar de un vacío degenerado a otro ➔ SSB

Aún hay partículas sin masa: Bosones de Goldstone: ¿Dónde están?

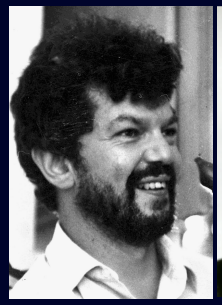
¿Quién inventó el mecanismo de “Brout-Englert-Higgs”?

Nambu, Goldstone and Anderson penned important early chapters in the story of the Higgs Boson

“It is likely, then, considering the superconducting analog, that the way is now open for a degenerate-vacuum theory of the Nambu type without any difficulties involving either zero-mass Yang-Mills gauge bosons or zero-mass Goldstone bosons. These two types of bosons seem capable of ‘canceling each other out’ and leaving finite mass bosons only.” **-- Phillip Anderson, 1962**



Englert



Brout

Higgs

“The purpose of the present note is to report that...the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass...This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenomenon to which Anderson has drawn attention” **-- Peter Higgs, 1964**

“ I couldn't have imagined 50 years ago, when I was working with my colleagues Gerald Guralnik and Tom Kibble on our paper, that society would spend billions of dollars and that thousands of scientists worldwide would be involved in the search for a particle and a mechanism that stem from those three papers published in 1964”. -- **Carl Hagen, 2013**

Kibble Hagen Guralnik

El mecanismo de BEH + GHK & el bosón de Higgs (1964)

Un campo escalar elemental con auto-interacciones

produce ruptura espontánea de la simetría electrodébil en el vacío

- respetando la coreografía sofisticada de las simetrías de gauge -

y puede generar la masa de los bosones de gauge

Una nueva partícula en el espectro

Los fermiones también adquieren masa via un nuevo tipo de interacción (int. de Yukawa) con el campo escalar

Partículas más pesadas interactúan más con el Higgs

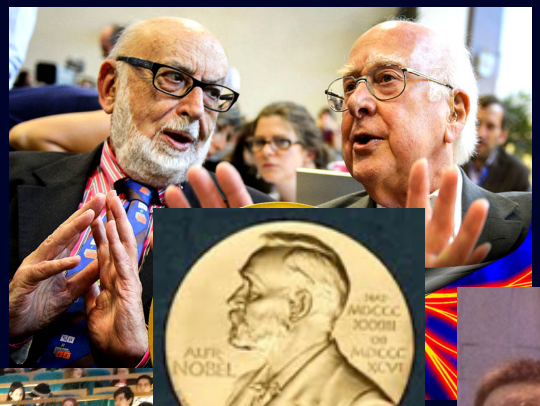
Weinberg-Salam: el Modelo Estándard de Partículas Elementales (1967)

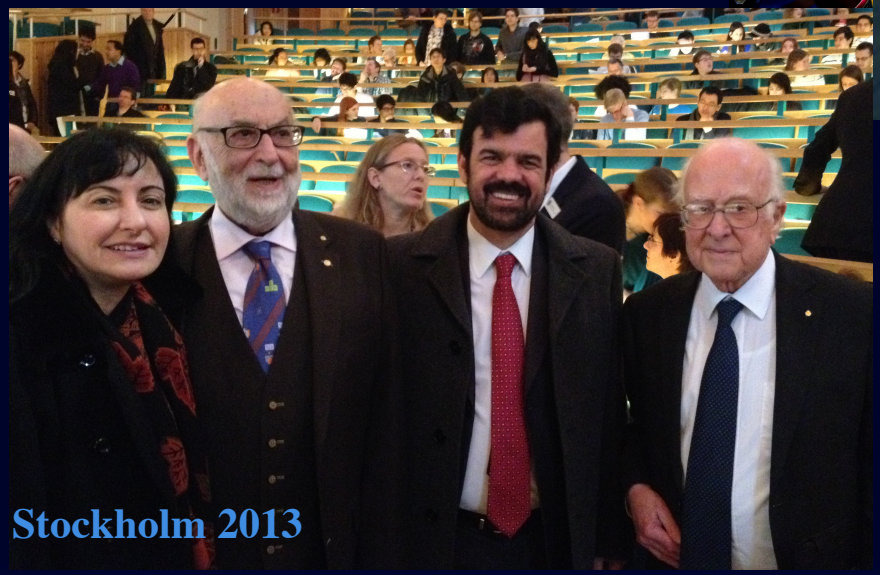
Medio siglo más tarde:

El decubrimiento del bosón de Higgs en el LHC

Y el Nobel para Englert y Higgs

Y el Nobel para Englert y Higgs





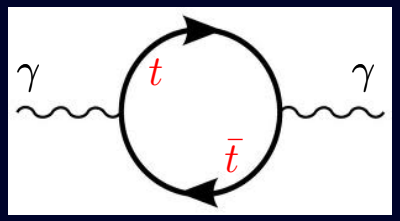
Higgs explica:

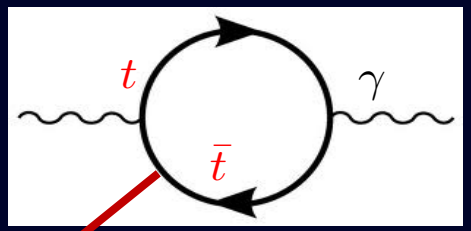
mi primer trabajo fue rechazado por ser irrelevante para la fenomenología

Fluctuaciones Cuánticas producen el Higgs en el LHC

El fotón se propaga en el vacío

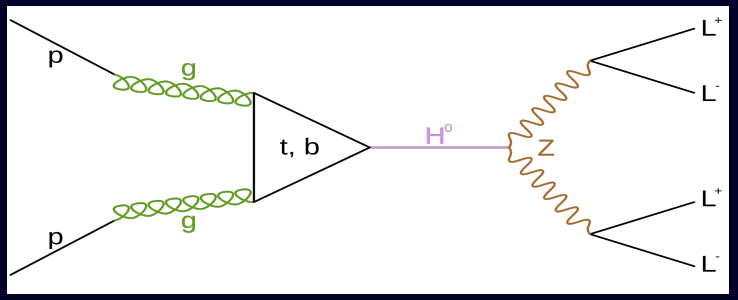
Partículas virtuales se crean y aniquilan

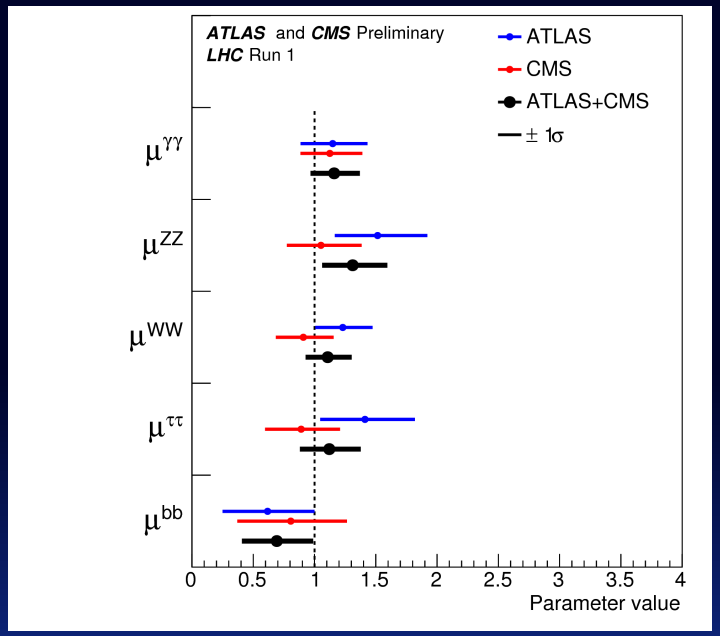




El Higgs decae en dos fotones: H

Similarmente, se produce via gluones y decae en 4 leptones via Z virtuales





¿Qué tipo de Higgs es éste?

La señal es compatible con el Higgs del ME

Pero también puede permitir la existencia de física más all del ME

¿Por qué esperamos Física más alla del Higgs?

Para explicar la materia oscura, bariogenesis, la generación dinámica de las propiedades de los fermiones, las minúsculas masas de los neutrinos,…

Nada de esto requiere nueva física a la escala electrodébil, pero …

- **El Higgs es especial : es un escalar**

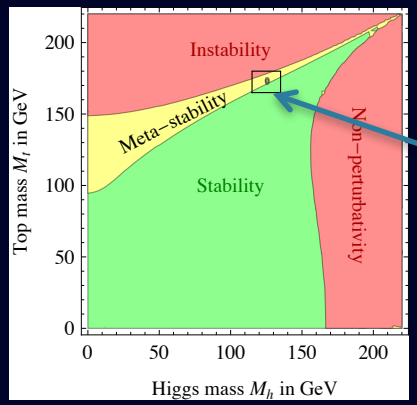
Las masas de escalares no están protegidas por simetrías de gauge y a nivel cuántico son sensibles a la nueva física a altas energías

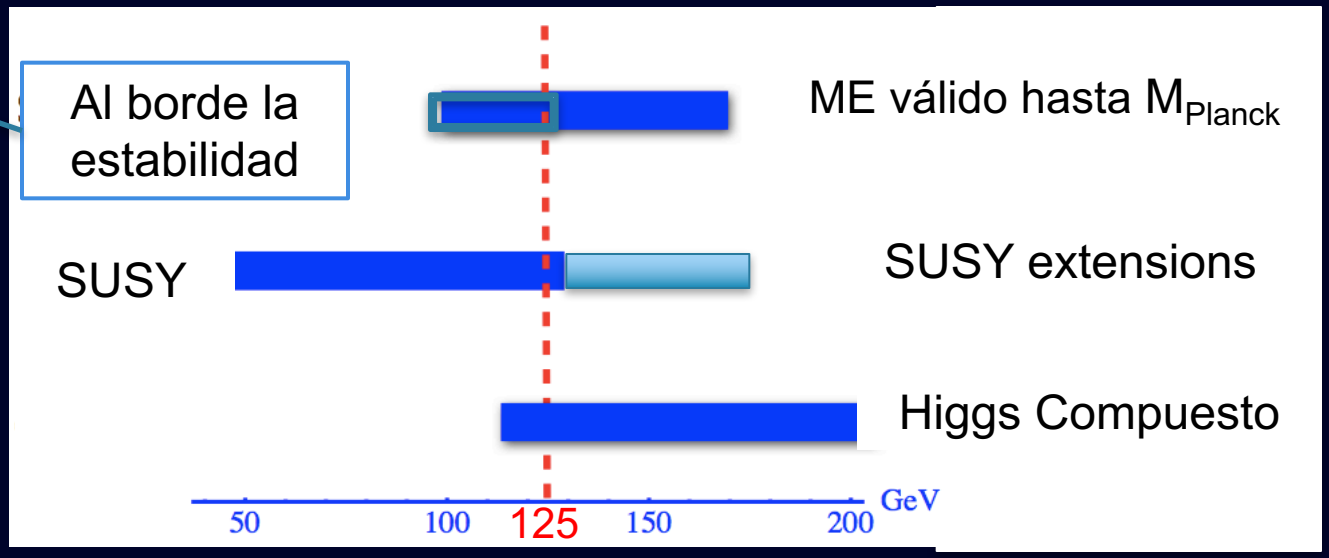
El Modelo Estándard con el Higgs es una teoría consistente pero….

Partículas escalares, como el Higgs no pueden sobrevivir en presencia de estados pesados como aparecen a escalas de Unificación/String/Planck

➔ Cierto tipo de Nueva Física **a escalas del LHC** podría solucionar el problema

Buscando Respuestas bajo la Luz del bosón de Higgs





Supersimetría (SUSY)

simetría entre fermiones y bosones

Higgs elemental protegido por la simetría

Modelos de Higgs Compuesto

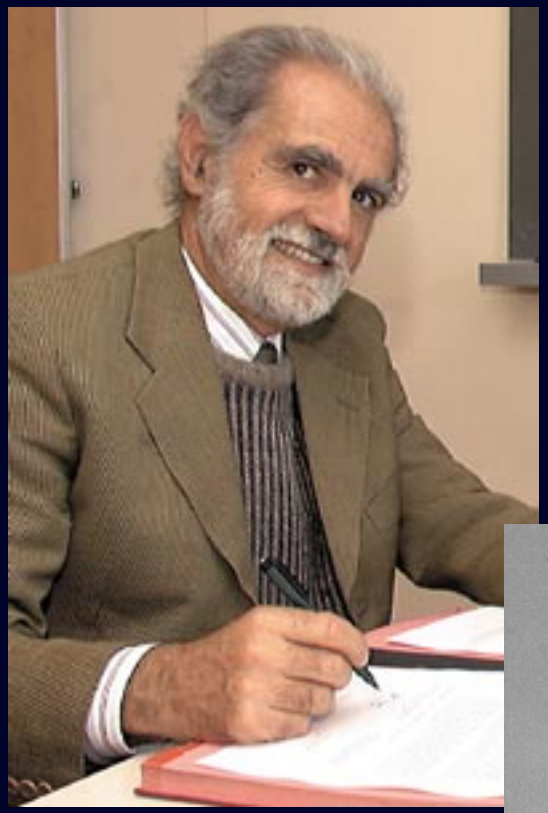
El Higgs no existe arriba de una cierta escala, a la cual aparecen nuevas interacciones fuertes

Modelos con múltiples bosones de Higgs

Para explicar las jeraquías de masas fermiónicas a la escala electrodébil

Y otra vez de moda:

Twin Higgs and Mirror Worlds



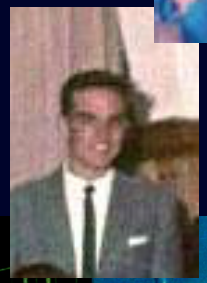
SUSY:

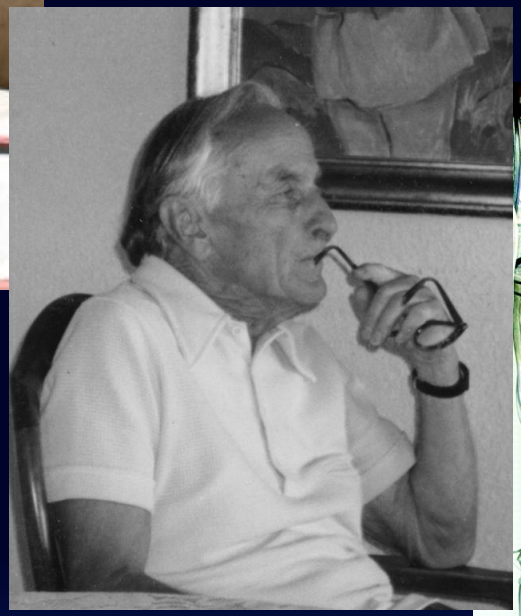
una teoría política elegante

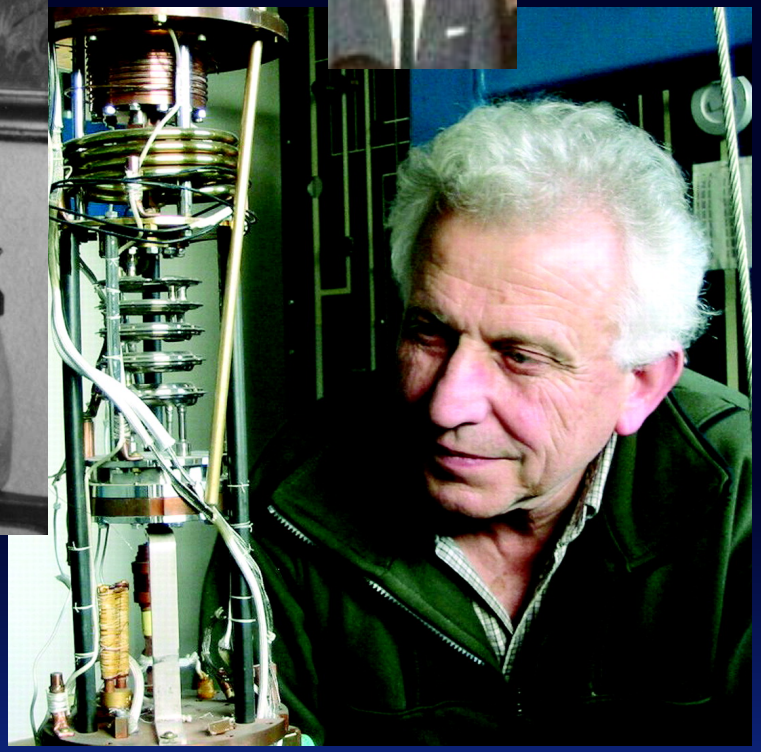
Vs

El Higgs Compuesto

complejo …







O el triunfo del

Modelo Estándard

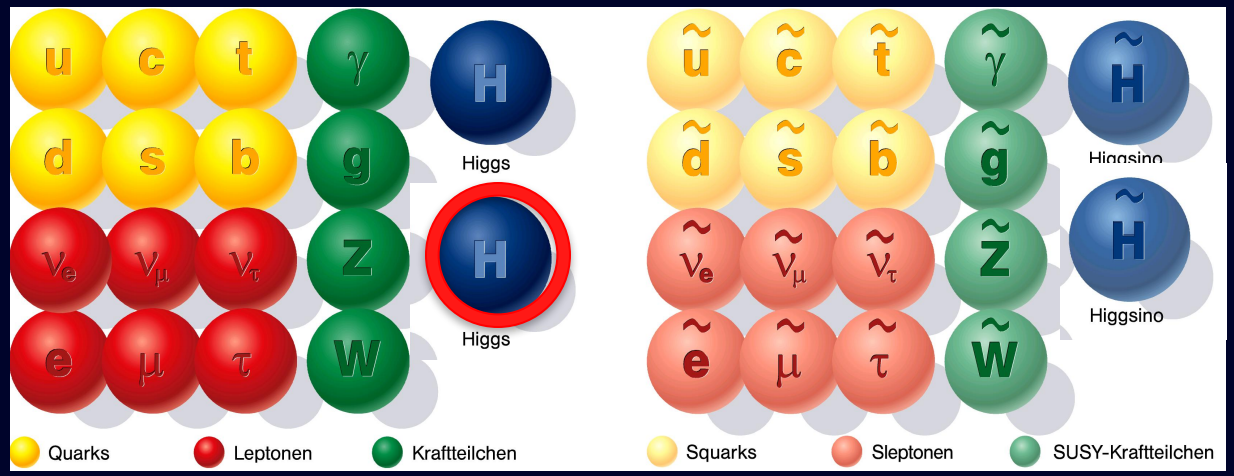
Instituto
Balseiro
San Carlos de Bariloche
Comisión Nacional de Energía Atómica
Universidad Nacional de Cuyo

Algunas cosas son "time independent"

SUPERSYMETRIA

Por cada fermión existe un boson de igual masa y acoples

Así como para cada partícula existe una anti-partícula



Requiere al menos 4 nuevos bosones de Higgs

- **Ayuda a estabilizar la jerarquía entre las escalas débil y de Planck**
- **Provee un buen candidato para la materia oscura**
- **Provee un mecanismo para generar bariogenesis**
- **Permite la unificación de fuerzas**
- **Induce dinámicamente la ruptura de simetría electrodébil**

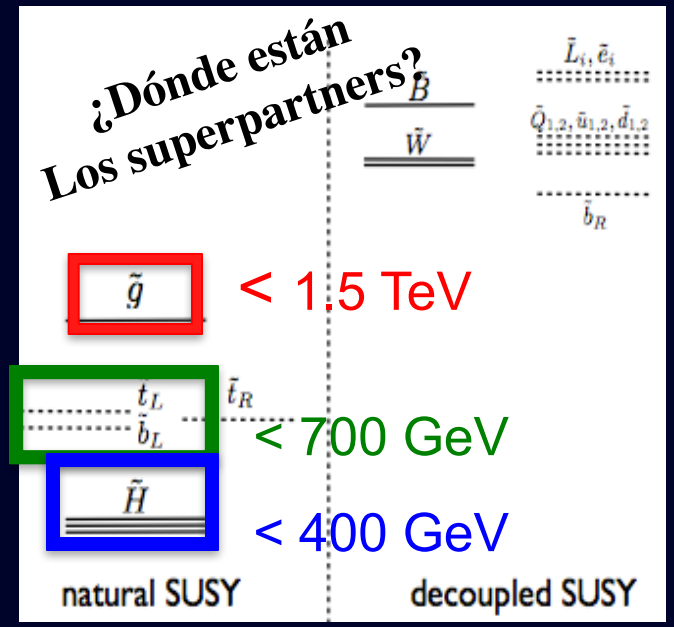
Es String friendly

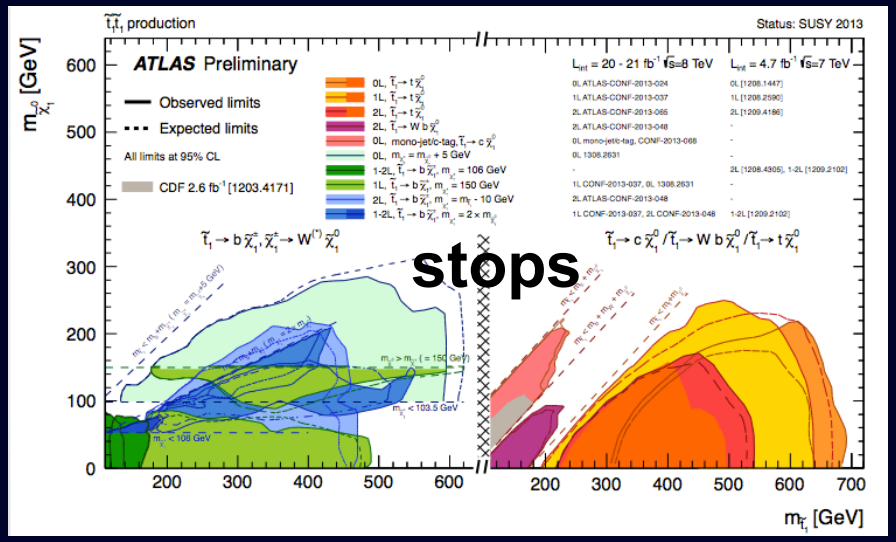
A good BSM

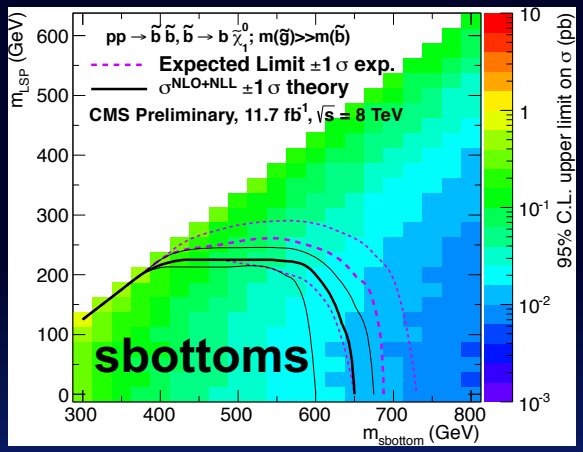
SUSY tiene que estar rota en la naturaleza:
ninguna partícula supersimétrica descubierta aún

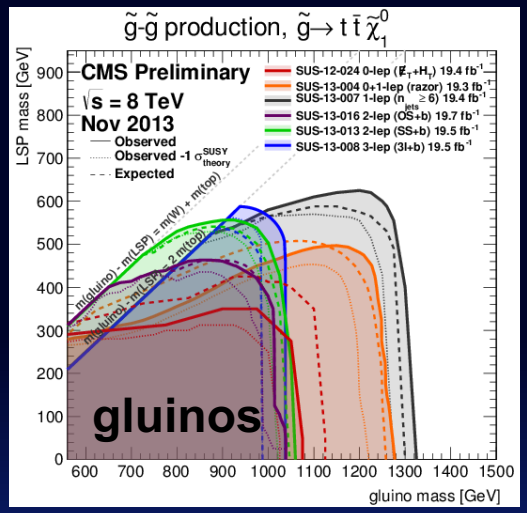
SUSY Weltschmerz*?

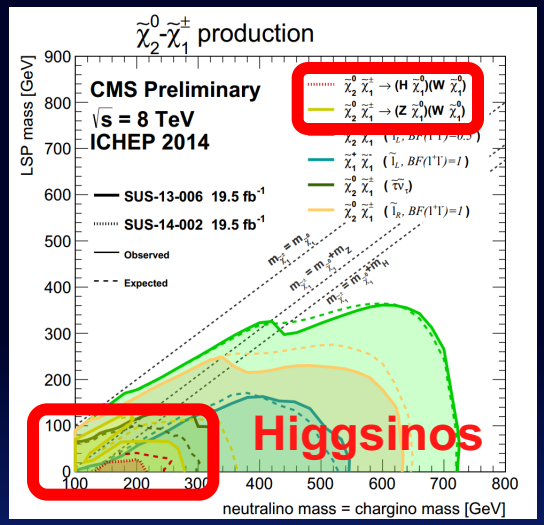
ATLAS/CMS están buscando incesantemente las señales supersimétricas.











El sentimiento que experimenta quien entiende que la realidad física nunca puede satisfacer los requerimientos de la mente

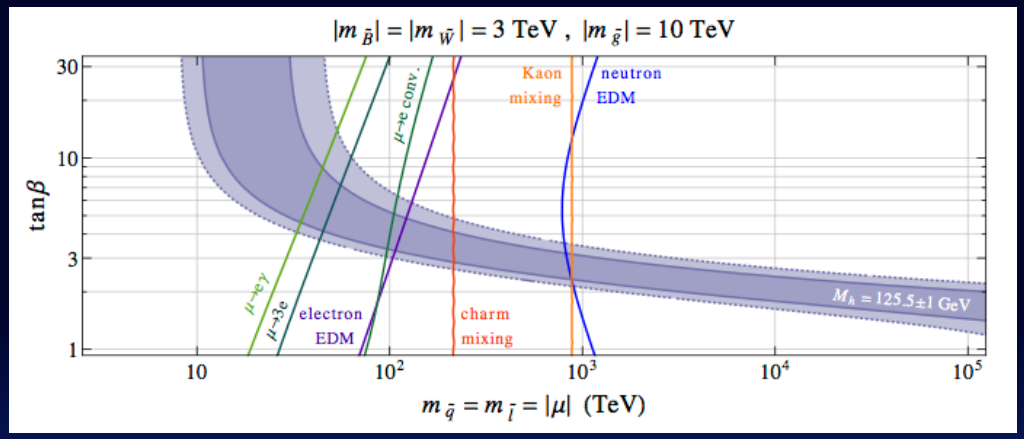
¿Dónde se esconde SUSY?

- Es posible tener modelos SUSY con superpartículas al alcance del LHC pero con señales degradadas de energía faltante o eventos con pocos jets

Aún hay modelos SUSY con partículas a escalas bajas que pueden evadir la búsqueda en el LHC [non-minimal "Natural" SUSY models]
y ayudar a problemas de jeraquías entre fermiones y sfermiones de la 3ra generación
o ayudar a reproducir la masa del Higgs sin necesidad de stops my pesados:

- extra singletes o tripletes del ME o singlets grupos de simetría de gauge adicionales

- SUSY a escalas más altas [Unnatural SUSY]



Experimentos a bajas energías, pueden probar la estructura de sabor y CP con sfermiones super pesados (PeV)

- PeV squarks already probed by CP violation in Kaon mixing
- CP violation in charm mixing and the neutron EDM reach up to O(100 TeV)
- EDMs particularly interesting:

Ni siquiera un colisionador protón-protón a 100 TeV puede explorar estas escalas

SUSY2215

SUSY: THE NEW HOPE

- QUANTUM MECHANICS AND QFT STILL HOLD
- THE ORBITAL COLLIDER STILL SEES NOTHING

THREE CENTURIES OF TRIUMPH FOR SUSY AND STRINGS!

The seasonal trends
Extremely-weeny constrained SUSY
NSFWMSSM
FF3C10ACBA9-MSSM
MSSM retrograde
Anthropic landscaping and trimming it down
The problem of condensed matter: They still don't get it
Strings - The Perpetual Revolution
Number of free parameters: P or NP complete?

Invited seminar
How to ensure your model remains predictability-free

Forum
Is choice moral?
"Every time you choose a path of action, a multiverse is killed"

Special topic
If the universe is not supersymmetric is it necessarily existing?

The perpetual conference

5 Jan - 5 Mar: Chamonix
15 Mar - 30 June: Hainan Island
1 July - 15 Sep: Wailea, Maui
15 Sep - 20 Nov: Jumeirah 1
21 Nov - 24 Dec: Hainan Island

Sponsored by:
The Milner-Zuckerberg Institution

Consecuencias de un Higgs de masa 125 GeV para SUSY

- Por lo menos 4 Higgs con differentes masas y propiedades

2 Higgs: h y H, par ante CP, con ángulo de mezcla α

1 Higgs A, impar ante CP y 1 Higgs cargado H^{+-}, con ángulo β

$$v = \sqrt{(v_1^2 + v_2^2)}$$

$$\tan\beta = v_2/v_1$$

La masa del Higgs más liviano está relacionada por SUSY a la masa del Bosón Z

$$M_h^2 = \underbrace{M_Z^2 \cos^2 2\beta}_{< (91\ \mathrm{GeV})^2} + \Delta m_h^2$$

→ **Correcciones radiativas importantes que dependen del espectro de top y stops**

- Es posible que h sea el Higgs del ME de 125 GeV que vemos en el LHC

Esto , junto con mediciones de procesos de producción nos da info sobre los stops

- El resto de los 3 Higgs pueden ser pesados (> 1 TeV)

O sólo unos poco cientos de GeV (Alineamiento) y observables en el LHC

- Medidas de precisión de acoples del 125 GeV Higgs con otras partículas del ME

dan info indirecta de otros Higgs bosons, Stops, Sbottoms, Staus o Materia Oscura

Una nueva era para las medidas de precisón del Higgs

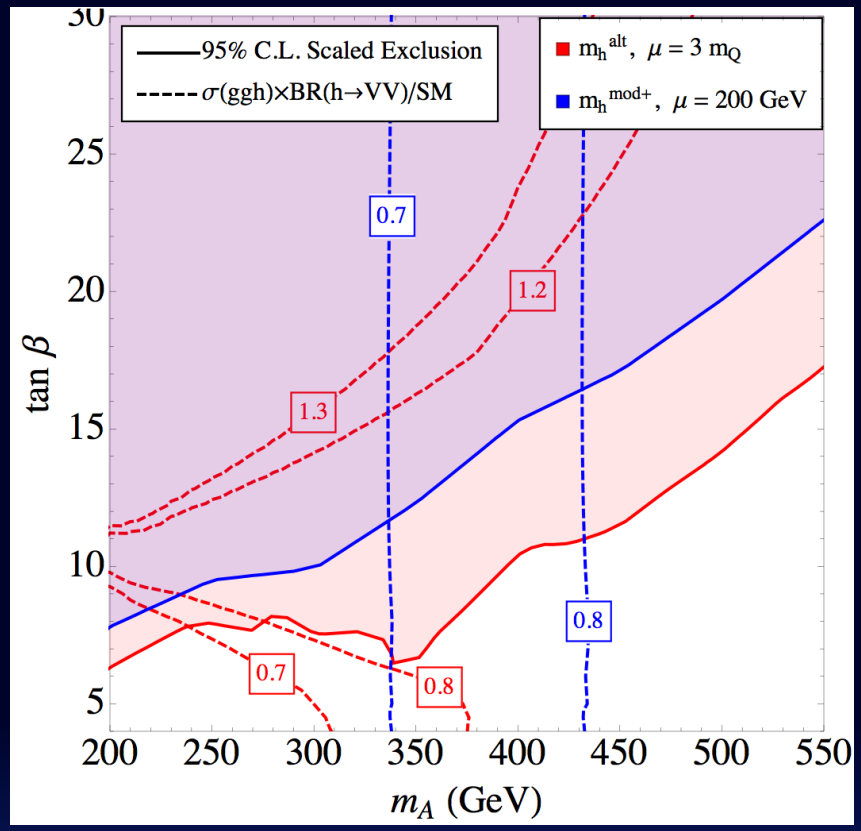
Búsqueda de otros Higgs: A/H → ττ
Vs Precisión en física del Higgs : h → WW/ZZ

— σ(bbH/A+ggH/A) × BR(H/A → $\tau\,\tau$) (8 TeV)
--- σ(bbh+ggh) × BR(h → WW)/SM

Complementaridad entre ambos métodos para probar el sector de Higgs en SUSY

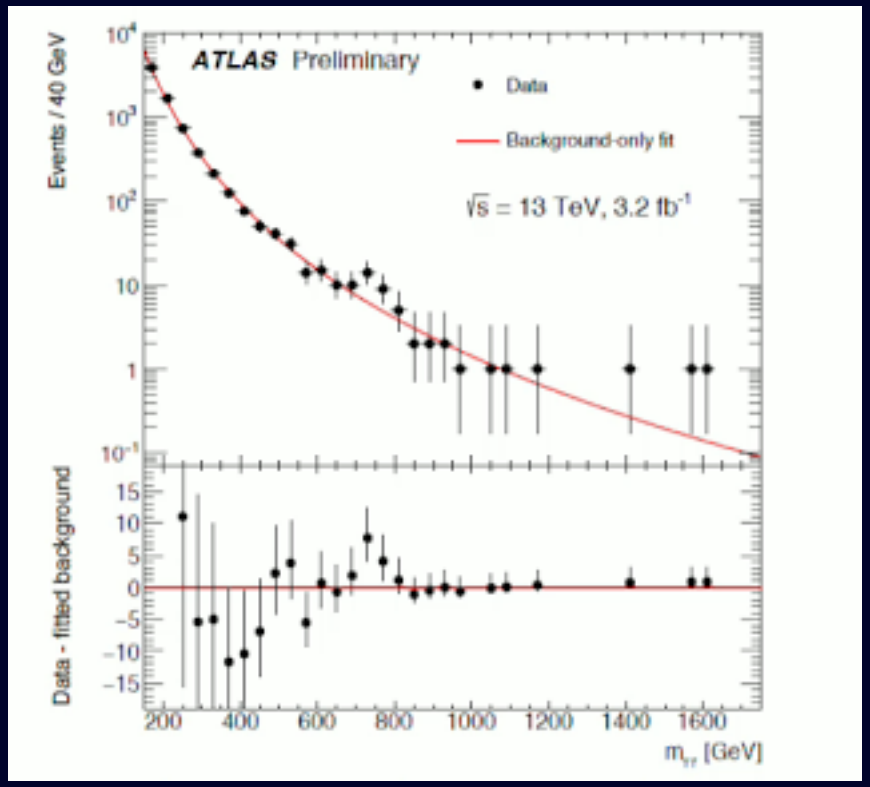
A

Correlaciones entre las mediciones son importantes par elucidar el tipo de nueva física



M.C., Haber, Low, Shah, Wagner'14

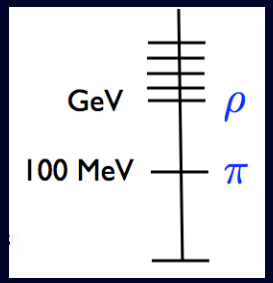
¿Posible evidencia de un nuevo bosón decayendo en fotones en el LHC?



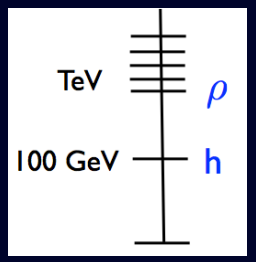
$m_{NEW} \sim 750$ GeV ?

- El efecto ~ 4σ y difícil de explicar en el ME, pero puede ser una fluctuación estadística
- Modelos propuestos: la mayoría requieren imaginación para explicar porque no se vio en Run 1 con más datos
- Run II va a confirmar o excluir el exceso

Modelos de Higgs Compuestos
The Higgs as a pseudo Nambu-Goldstone Bosons (pNGB)



Inspirados en los piones de QCD



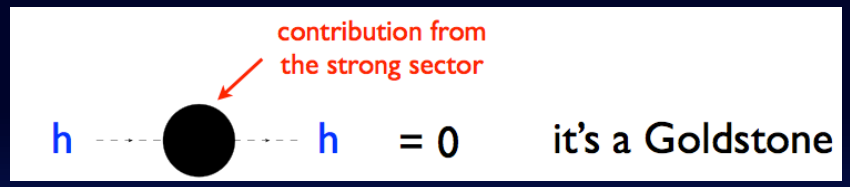
QCD con 2 sabores: simetría global $SU(2)_L \times SU(2)_R / SU(2)_V$.

π^{+-} π^0 son Goldstones asociados con la ruptura espontánea

$$g, g' \to 0 \quad \& \quad m_q \to 0$$
$$\Rightarrow m_\pi = 0$$
$$m_q \neq 0 \Rightarrow m_\pi^2 \simeq m_q B_0$$
$$e \neq 0 \Rightarrow \delta m_{\pi^\pm}^2 \simeq \frac{e^2}{16\pi^2}\Lambda_{QCD}^2$$

El Higgs es liviano porque es un Pseudo bosons de Nambu-Goldstone (PNGB) -- una especie de pion – de un nuevo sector fuerte

La masa está protegida por la simetría global



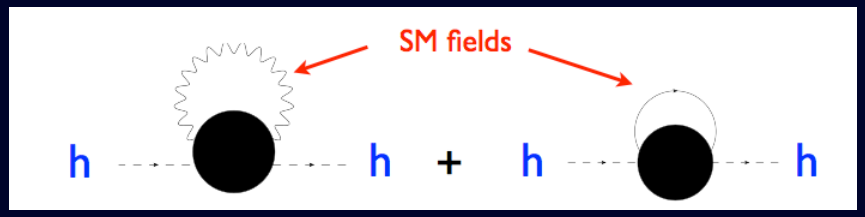
Una alternativa interesante para generar EWSB via interacciones fuertes

Georgi,Kaplan'84

El Higgs como un PNGB

El Higgs es liviano porque su masa se genera via correcciones radiativas:

Masa a un loop via la ruptura explícita de la simetría global debido a acoplamientos del ME



Dynamical EWSB: large set of vacua, some of them break $SU(2)_L \times U(1)_Y$

El potencial de Higgs depende del grupo de simetría global considerado
-en algunos casos uno tiene más de un boosn de Higgs-
Y
Del detalle de la inclusión de los fermiones en las representaciones del grupo

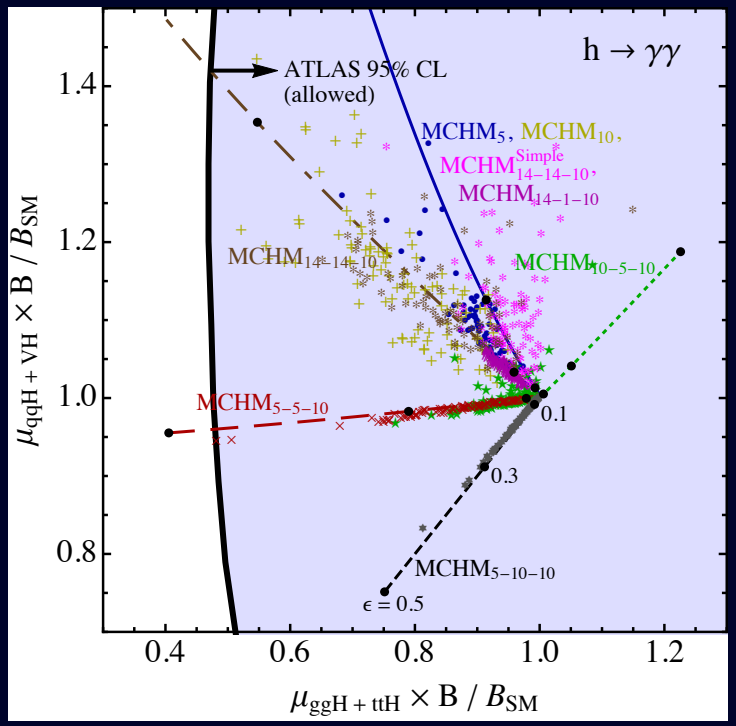
- Calcular la masa del Higgs es complicado debido a la dinámica fuerte

$$\mathbf{m_H^2 \propto m_t^2 M_T^2 / f^2}$$

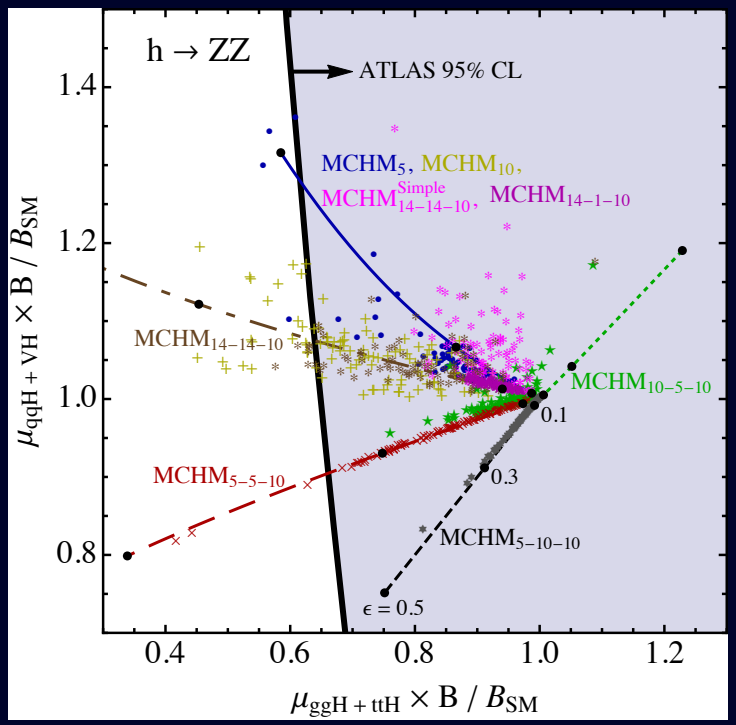
- **Resonancias pesadas (few TeV) puede detectarse en el LHC**

Modelos de Higgs Compuestos confrontando el experimento

h a di-fotones



h a ZZ



M.C., Da Rold, Ponton'14

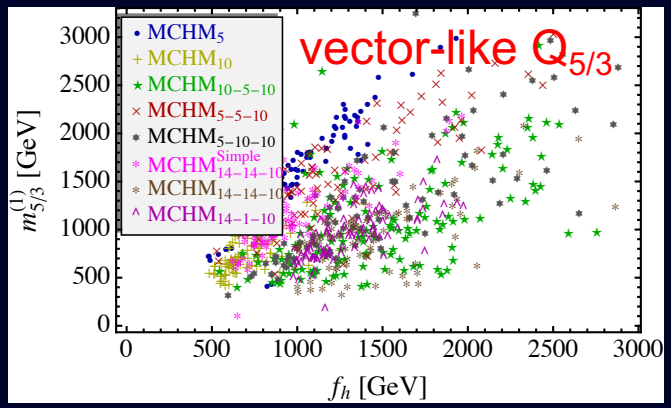
después de la ruptura elctrodébil: $\varepsilon = v_{SM}/f$ data de precision requiere $f > 500$ GeV

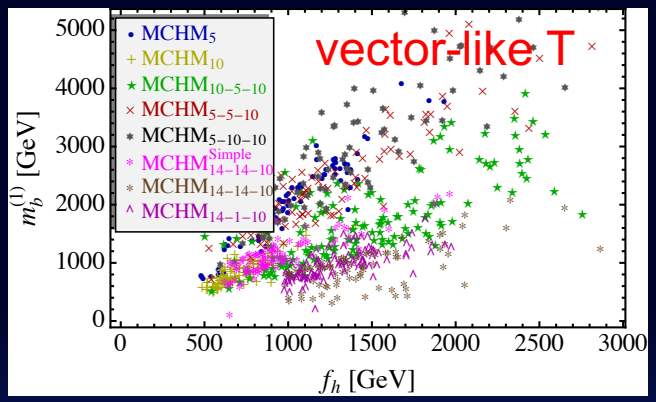
Más datos del LHC pueden darnos informacion de la teoría en el ultravioleta

Modelos de Higgs Compuestos **y la búsqueda de nuevos Fermions**

Pair production, single production, or exotic Higgs production of vector-like fermions

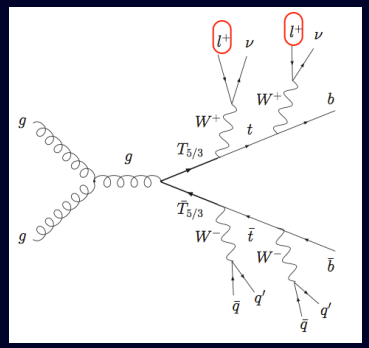
[masses in the TeV range and possibly with exotic charges: Q = 2/3,−1/3, 5/3,8/3,−4/3]



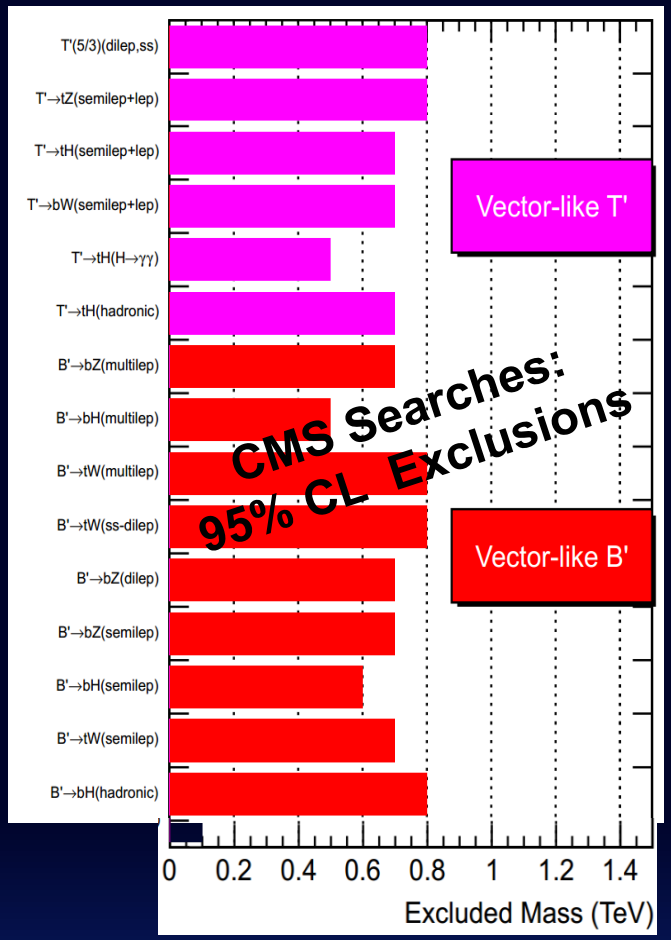


M.C., Da Rold, Ponton'14

SS di-leptons



Gran variedad de señales,muchas con leptones my energéticos



LHC exclusion for M_f < 800 GeV]

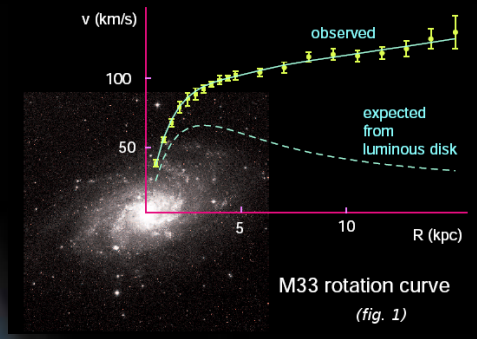
Connecciones entre

El bosón de Higgs

y el Misterio de la Materia Oscura

El poder del Lado Oscuro

Mantiene al universo como un todo y forma el ***85% de toda la materia que hay en él***



¿Qué es la Materia Oscura?

¿Cuáles son sus propiedades?

¿Tiene subestructura?

¿Cómo encontrarla más diréctamente?

Interactúa muy débilmente → **Gravedad**
(no tiene carga)

→ **¿Interacciones con el Higgs?**

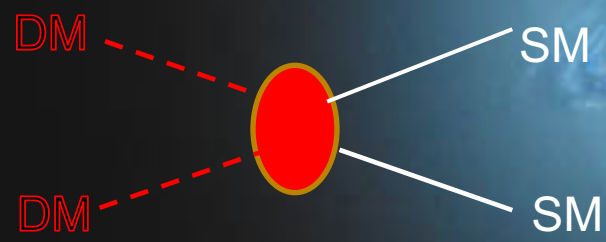
© 2003 Don Dixon/cosmographica.com

El poder del Lado Oscuro

Historia de la abundancia de materia oscura: **WIMP Dark Matter ?**

Se produce y se aniquila de a pares temprano en la historia del universo

La densidad de materia oscura decrese cuando el Universo se expande



<u>Finalmente se para la aniquilación de materia oscura</u>

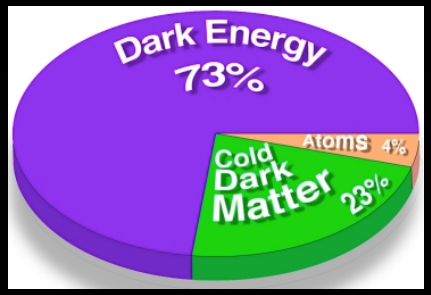
Cuanto más pequeña la tasa de aniquilación

Más grande la abundancia de materia oscura que quedó

© 2003 Don Dixon/cosmographica.com

El poder del Lado Oscuro

Remanente de Materia Oscura



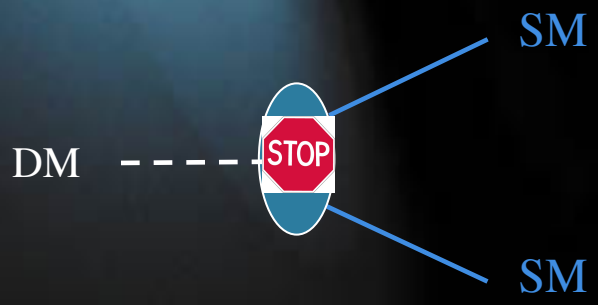
- Materia Oscura = partícula/s de naturaleza desconocida, pesada, eléctricamente neutra

- Masa estimada de la abundancia remanente

- $\Omega_{DM} \sim \langle \sigma_A v \rangle^{-1}$ si $\sigma_A \sim k\, \alpha_W^2 / m_\chi^2 \sim$ pocos pb ➔ $m_\chi \sim 0.1\text{-}1$ TeV

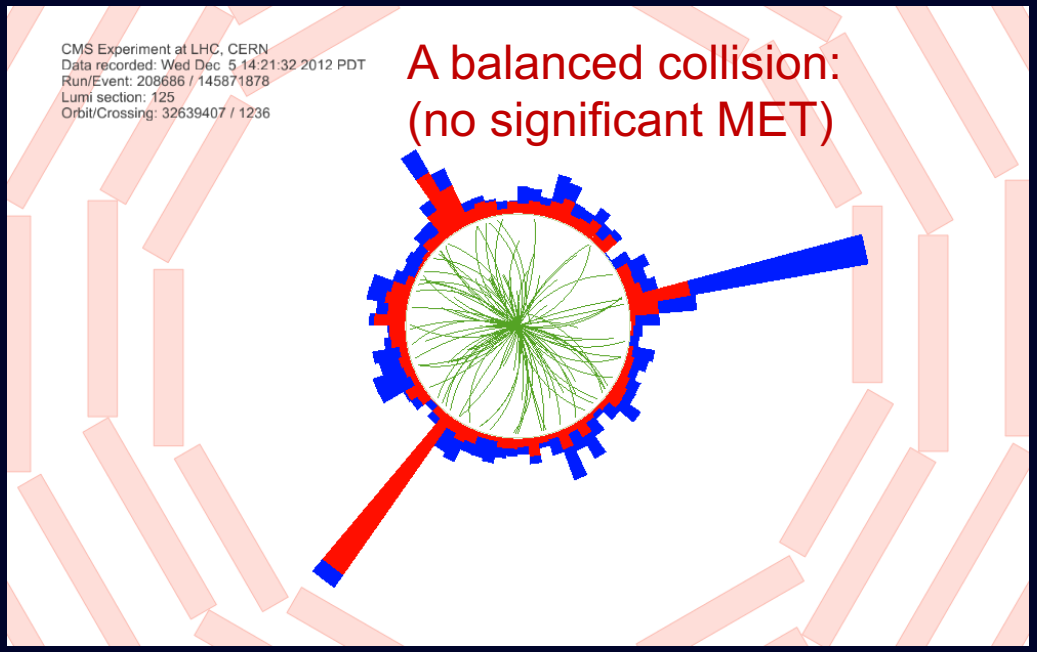
- va bien con una partícula débilmente interactuante ➔ **WIMP**

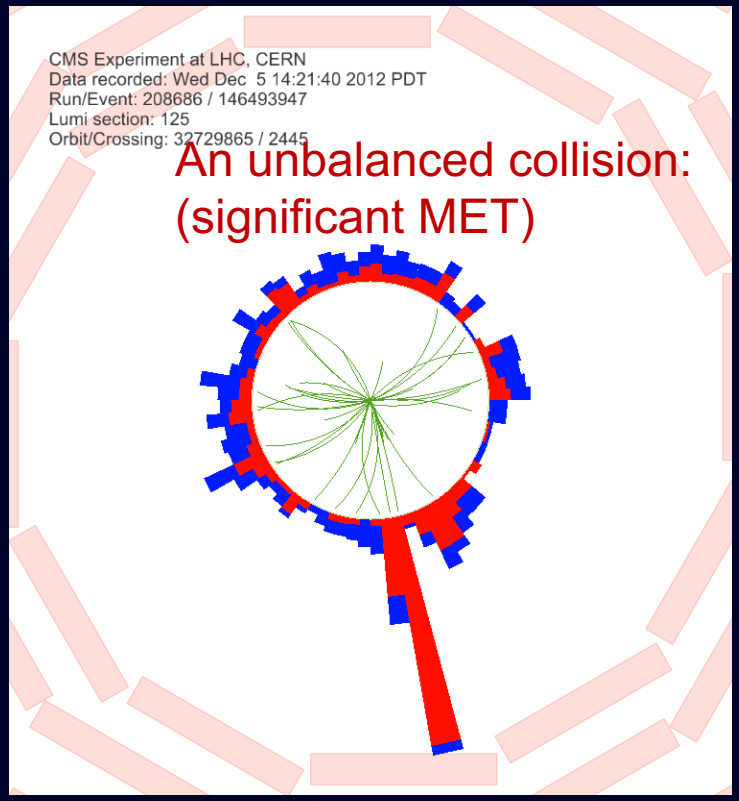
CAVEAT: para prevenir el decaimineto del WIMP a materia visible más liviana se inventa una nueva simetría de "carga de materia oscura" tal que:



© 2003 Don Dixon/cosmographica.com

Podemos crear materia oscura en el LHC

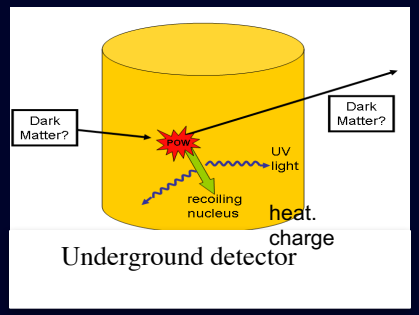




Podemos calcular la energía que se pone y la que sale de la colisión

Si hay falta mucha energía, hemos creado materia oscura

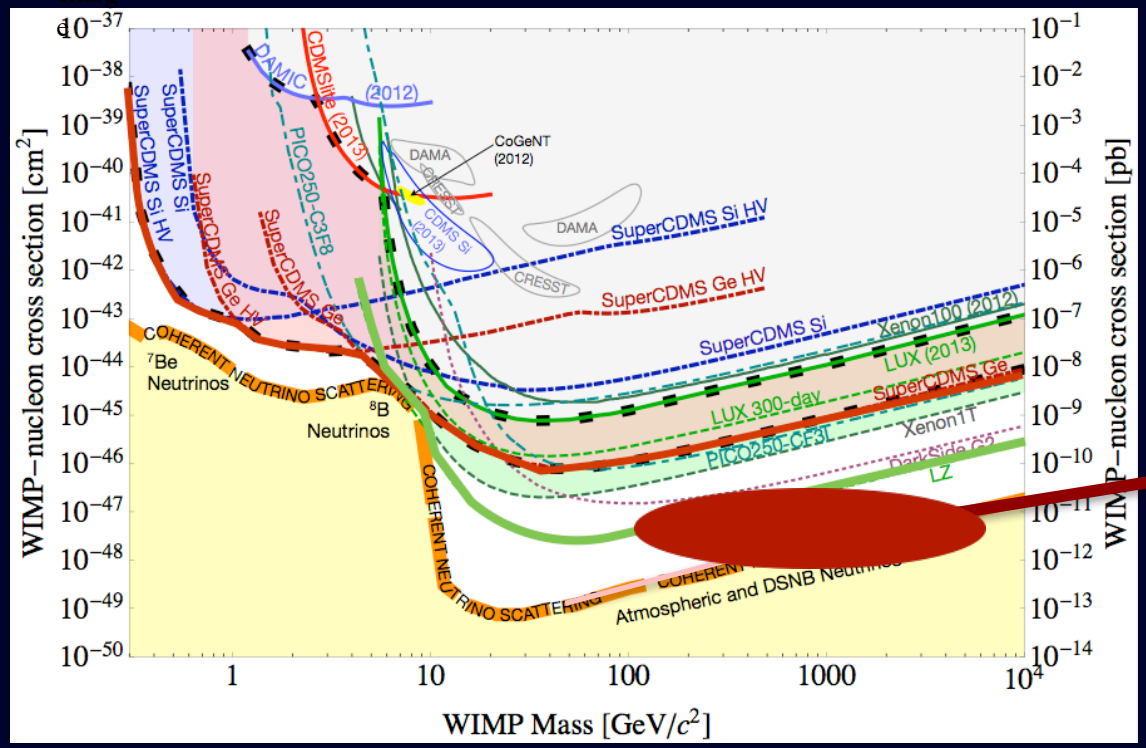
Se necesita entender perfectamente la respuesta de los detectores y las predicciones de los procesos del ME

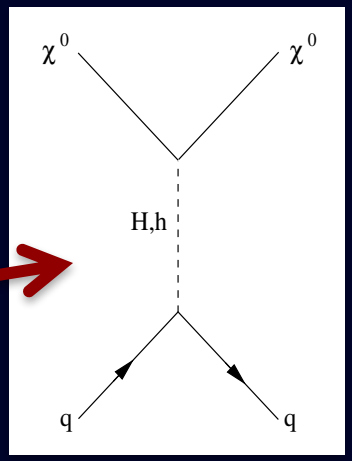


Detección Directa de la Materia Oscura

Puede ccleo en el detector y ser observada

Starting to Probe the Higgs Portal





- Mixed Wino-Higssino or Bino-Higgsino ➔ can have suppressed couplings with the Higgs bosons by tuning M_2 (M_1), tan β and μ
- Relevant destructive interference between h and H possible Huang, Wagner '14

Estamos probando esta idea fascinante

de la materia oscura, usando

Colisionadores, telescopios y detectores muy especializados

Prioridad en Física de Partículas y Campos y Cosmología

- Muchísimas ideas en desarrollo

- Astrophysical observations of structure may shed info on DM nature even if DM only interacts gravitationally with visible matter

Avances revolucionarios en nuestro entendimiento del Universo vienen de la conjunción de Ideas y Experimentos exitosos

El Mecanismo de Higgs ⟷ LHC

Qué viene ahora?

La Materia Oscura y el Imbalance de Materia y Antimateria requieren nuevas ideas y nueva física que podemos descubrir en la próxima decada

El bosón de Higgs puede jugar un rol preponderante en la comprensión de ambos misterios y conectarlos con los neutrinos