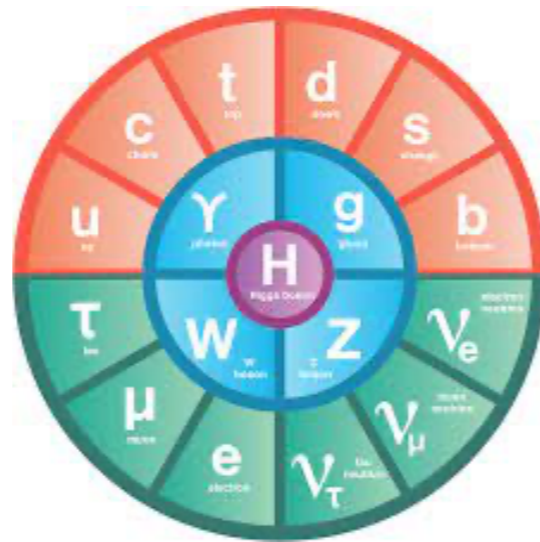
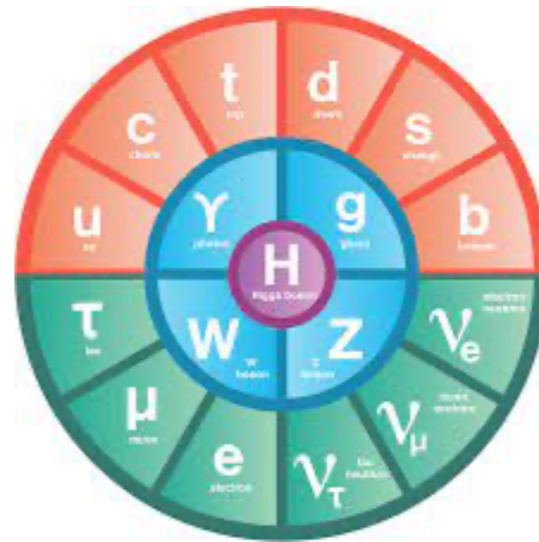


Éxitos, anomalías y retos del EW-SM a sus 50 años



Gabriel López Castro, ICN-UNAM, 06/12/24

Éxitos, anomalías y retos del EW-SM a sus 50 años



Gabriel López Castro, ICN-UNAM, 06/12/24



"Never underestimate the joy people derive from hearing something they already know"

SM@50

Case Western Reserve University

June 1-4, 2018

VOLUME 19, NUMBER 21

PHYSICAL REVIEW LETTERS

20 NOVEMBER 1967



A MODEL OF LEPTONS*

Steven Weinberg†

Laboratory for Nuclear Science and Physics Department,
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts

(Received 17 October 1967)

SM@50

Case Western Reserve University

June 1-4, 2018



VOLUME 19, NUMBER 21

PHYSICAL REVIEW LETTERS

20 NOVEMBER 1967

A MODEL OF LEPTONS*

Steven Weinberg†

Laboratory for Nuclear Science and Physics Department,
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts

(Received 17 October 1967)

Progress of Theoretical Physics, Vol. 49, No. 2, February 1973

CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction

Makoto KOBAYASHI and Toshihide MASKAWA

Department of Physics, Kyoto University, Kyoto

(Received September 1, 1972)

In a framework of the renormalizable theory of weak interaction, problems of *CP*-violation are studied. It is concluded that no realistic models of *CP*-violation exist in the quartet scheme without introducing any other new fields. Some possible models of *CP*-violation are also discussed.

Violación de CP en el SM

⇒ ∃ 3 family of quarks

+

QCD (Fritzsch, Gell-Mann,
Leutwyler)

- ★ Modelo económico, predictivo y exitoso
- ★ La teoría y los experimentos más precisos en física
- ★ Interacción de teoría y experimento
- ★ No hay algo en la tierra que lo ponga en duda (seriamente)
- ★ \exists anomalías que deben confirmarse o refutarse
- ★ Enigmas sin resolver (origen del sabor, 3 generaciones, ...)
- ★ Nadie duda que el SM debe extenderse (ν 's, DM)
- ★ Nuevas preguntas y nuevos experimentos

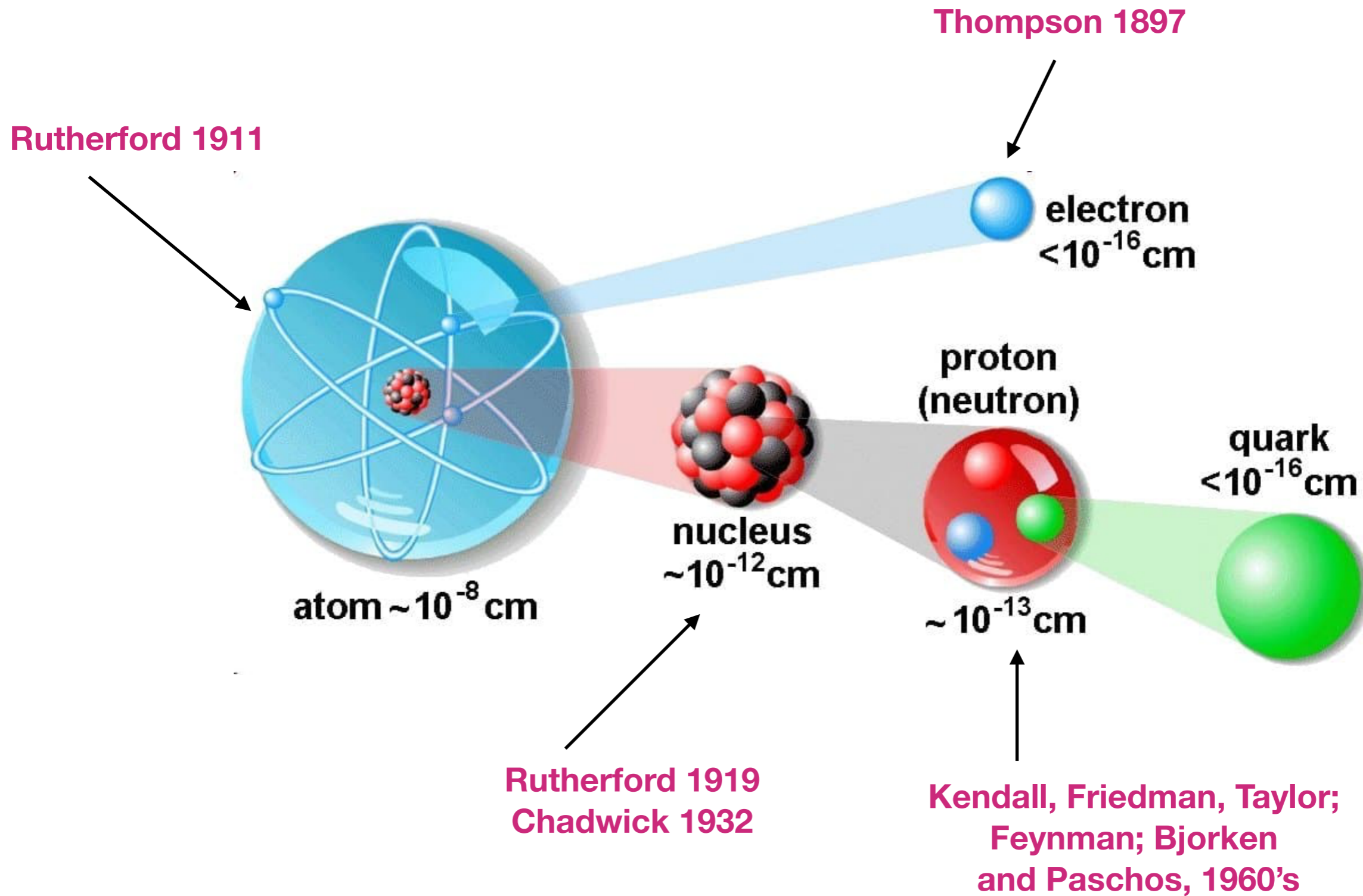
La prehistoria



$$\hbar = c = 1$$

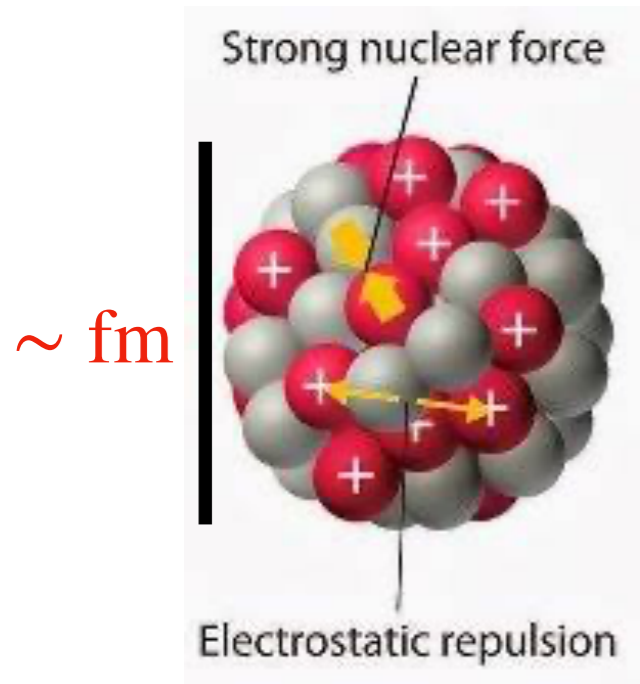
$$[\text{masa}] = [\text{energía}] = [\text{distancia}]^{-1} = [\text{tiempo}]^{-1} = \text{eV}$$

Interacciones fundamentales y componentes



Una vez descubierto el protón en 1919....

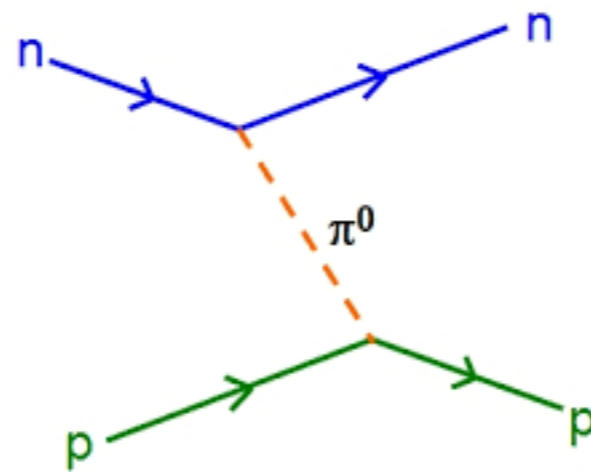
1er modelo de interacciones fuertes: estabilidad núcleos



1932: **Chadwick** descubre el neutrón ($q=0$)

1932: **Heisenberg**, (n, p) isodoblete

1935: **Yukawa** propone teoría $\mathcal{L}_Y = -g\bar{N}N\phi$



$$\implies V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-m_M r}$$

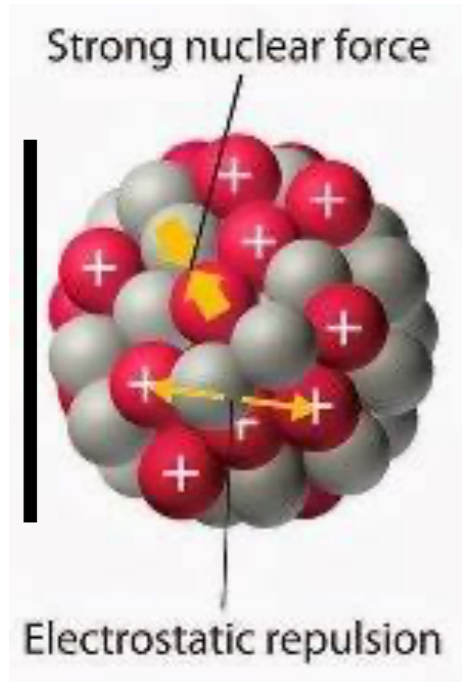
$$m_M = \frac{1}{r_N} = 100 \sim 200 \text{ MeV}$$

Una vez descubierto el protón en 1919....

1er modelo de interacciones fuertes: estabilidad núcleos



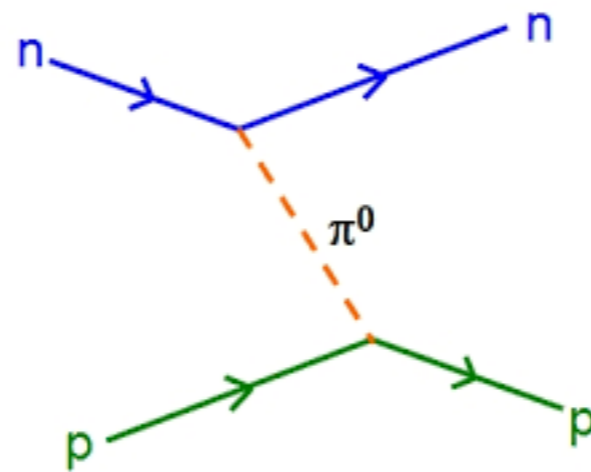
~ fm



1932: **Chadwick** descubre el neutrón ($q=0$)

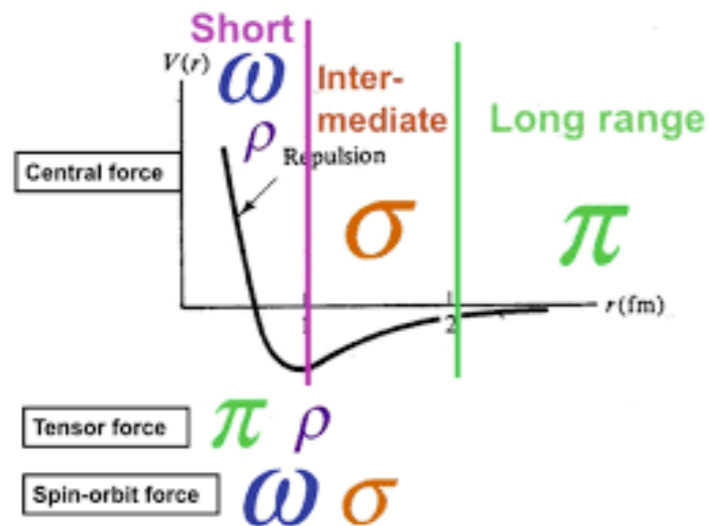
1932: **Heisenberg**, (n, p) isodoblete

1935: **Yukawa** propone teoría $\mathcal{L}_Y = -g\bar{N}N\phi$



$$\Rightarrow V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-m_M r}$$

$$m_M = \frac{1}{r_N} = 100 \sim 200 \text{ MeV}$$

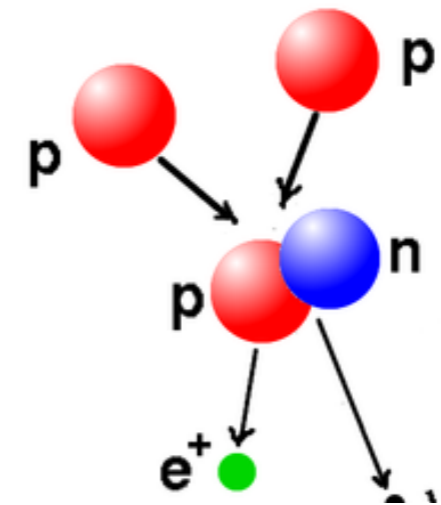
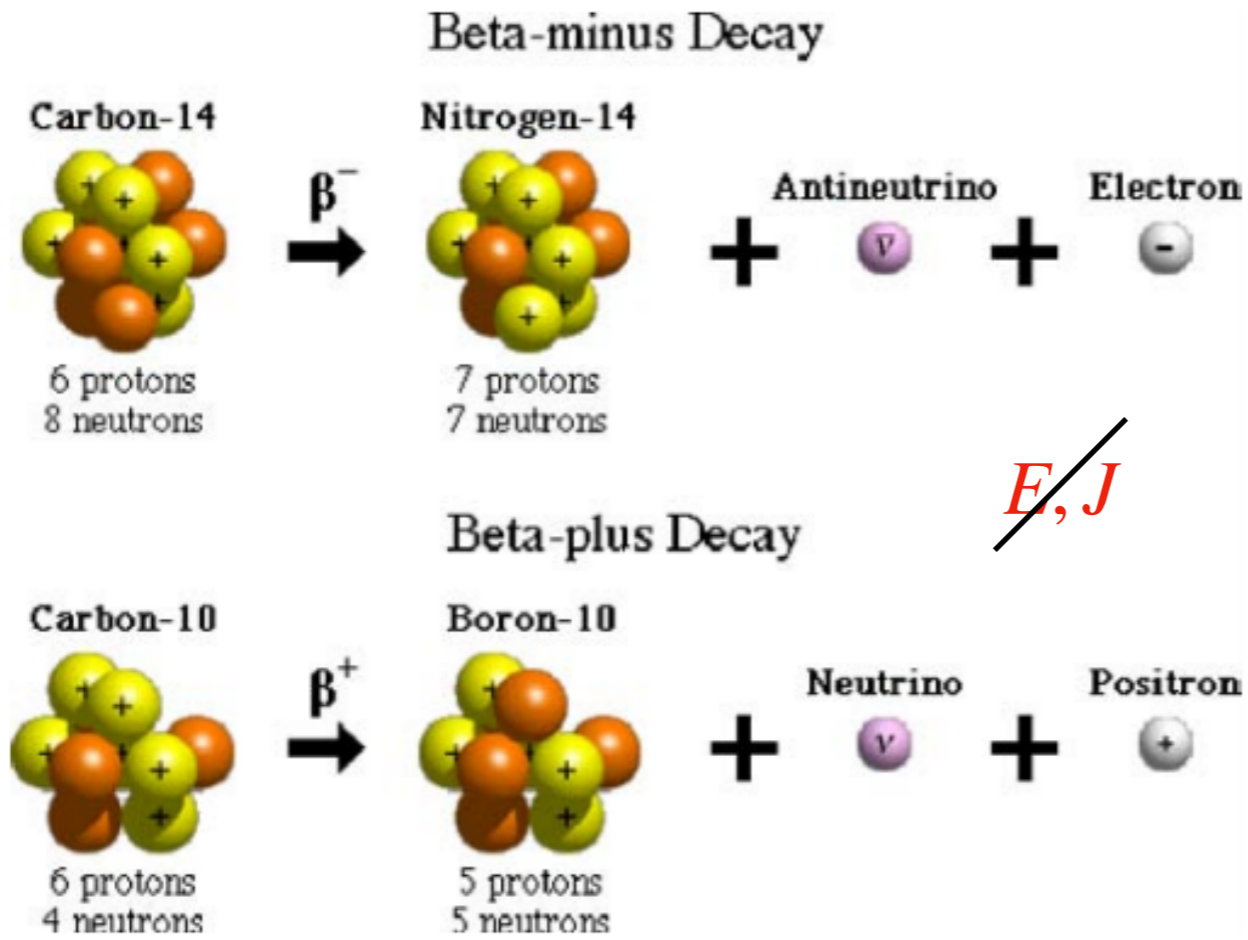


quarks (1964)... **QCD (1973)** ...teorías efectivas > (1976)

...Interacciones fundamentales y componentes

Núcleos: α , β , γ

Interacciones débiles



$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$$

$$p \rightarrow n e^+ \nu_e$$

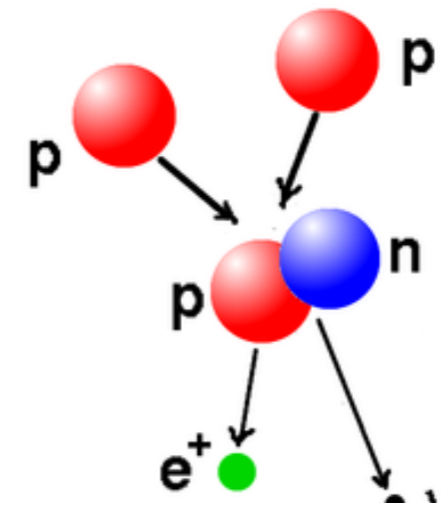
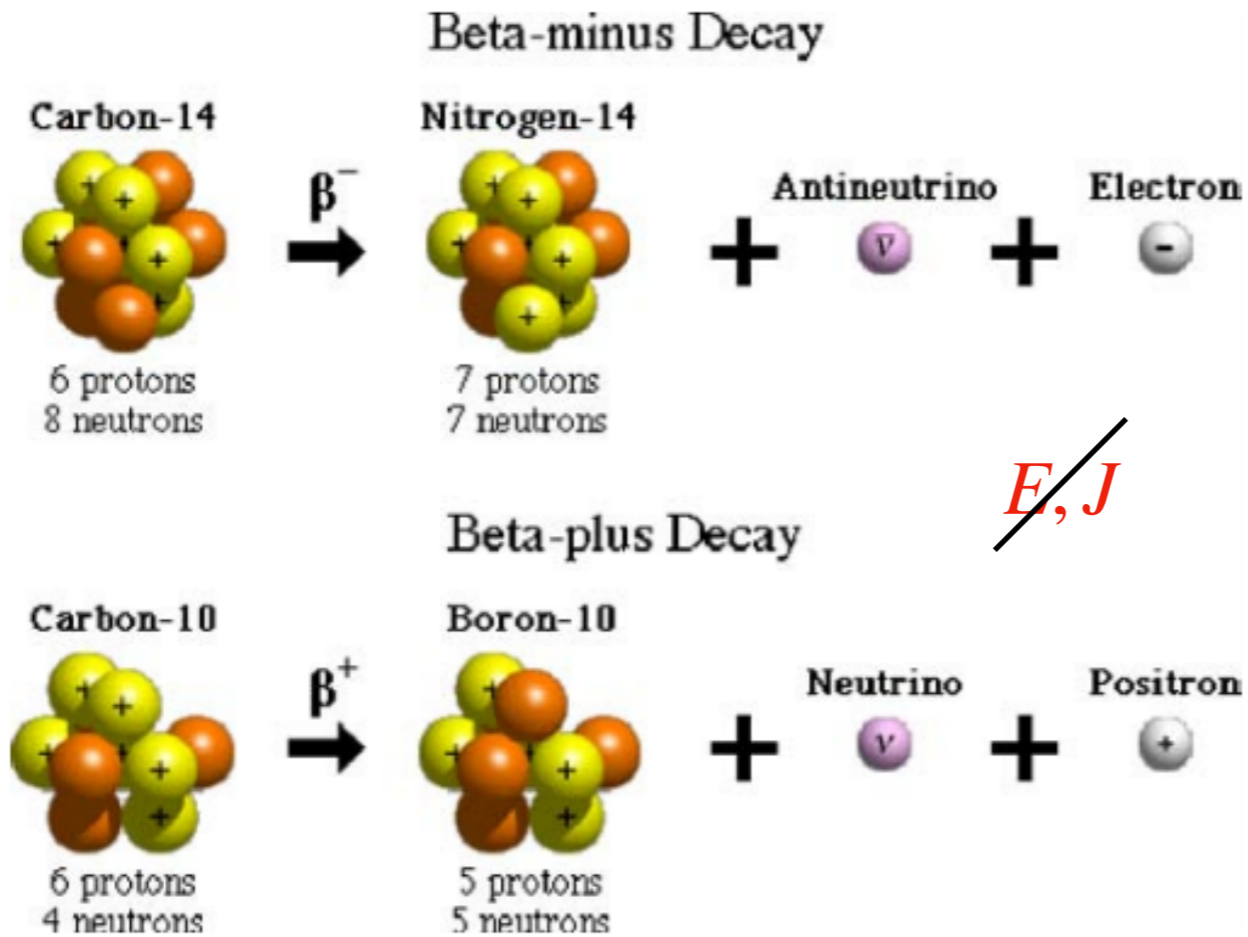
Pauli
1930,

Courtesy of Thomas Jefferson National Accelerator Facility - Office of Science Education.
Used with permission.

...Interacciones fundamentales y componentes

Núcleos: α, β, γ

Interacciones débiles



$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$$

$$p \rightarrow n e^+ \nu_e$$

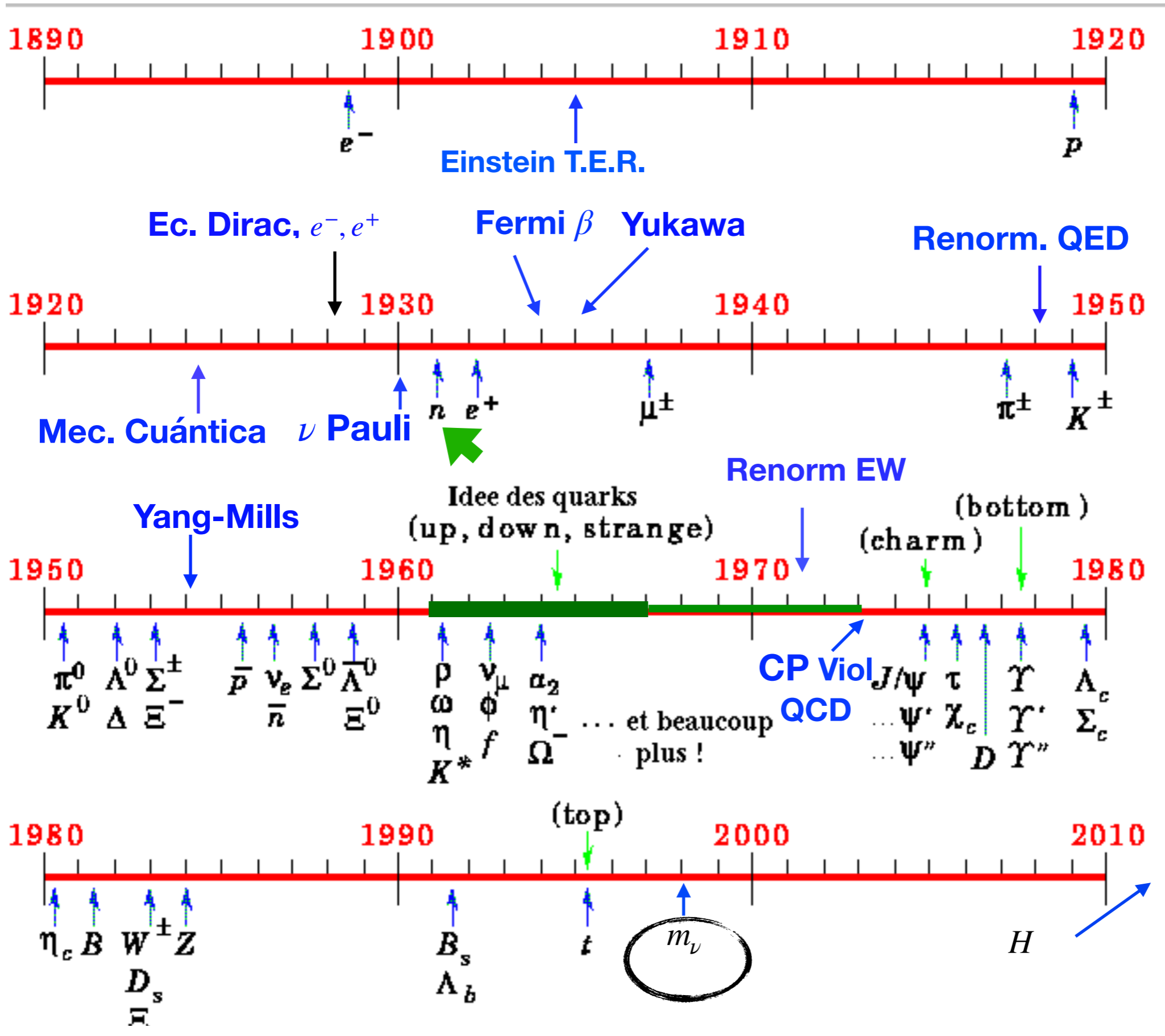
Pauli
1930,

Courtesy of Thomas Jefferson National Accelerator Facility - Office of Science Education.
Used with permission.

Teoría de **Fermi 1934**

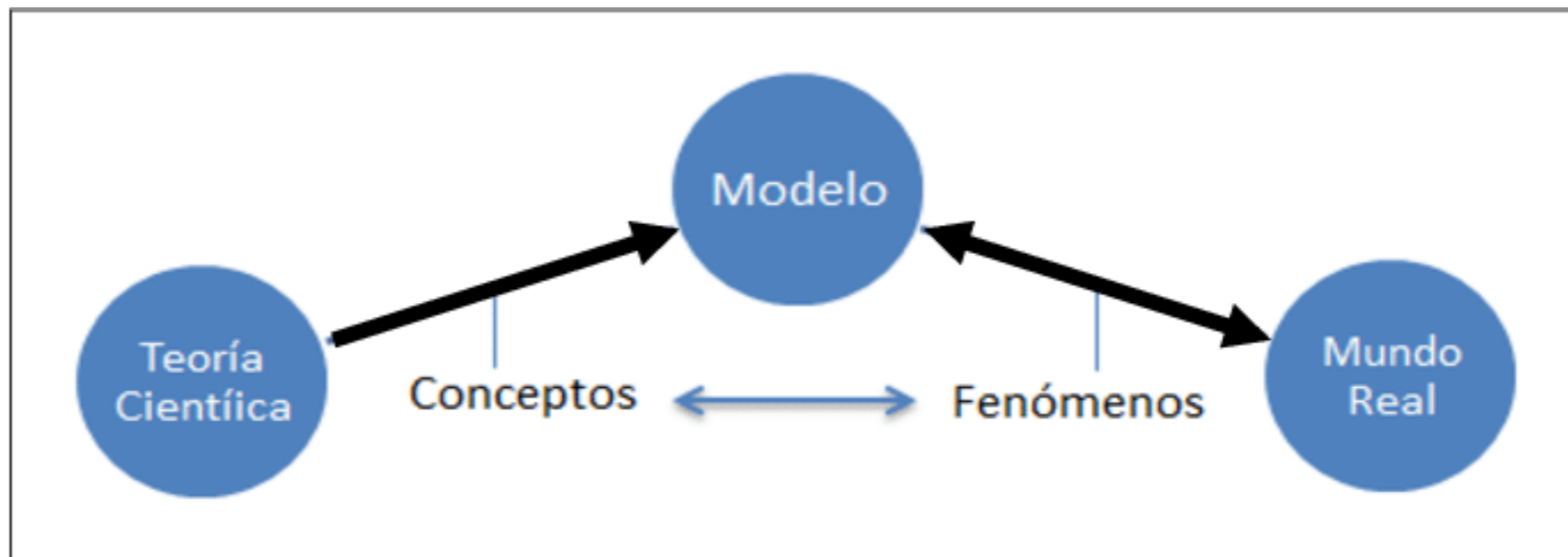
$$\mathcal{L}_F = -G(\bar{\psi}_p \gamma_\mu \psi_n) \times (\bar{\psi}_e \gamma^\mu \psi_\nu)$$





Modelo EW (61),
Higgs Mech. (64)
Weinberg (67)

El Modelo Estándar de Interacciones fundamentales



El Modelo estándar: $TCC+SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ +RES

$$\mathcal{L}_{SM} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. + y_{ij}\bar{\psi}_i\psi_j\phi + h.c. + \left|D_\mu\phi\right|^2 - V(\phi)$$

1961 **Glashow**, leptones y bosones sin **masa**, autointeracciones W^\pm, Z

1967 **Weinberg**, **masa leptones**, $Hf\bar{f}$

1964 **Brout, Englert, Higgs...** **Masas** W^\pm, Z, m_H, \dots

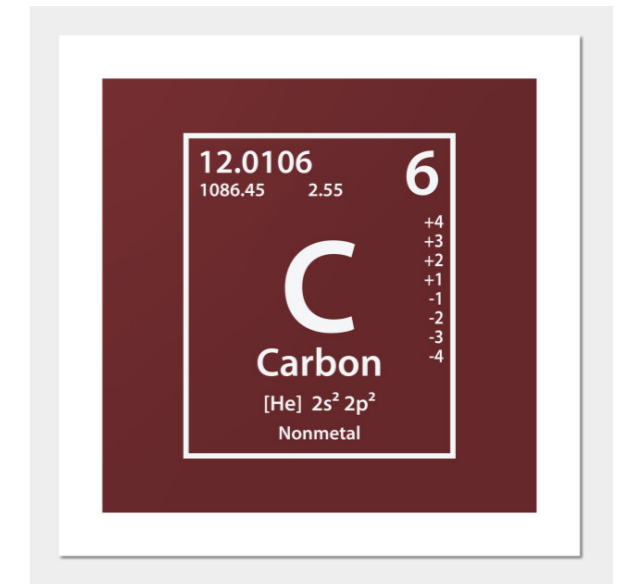
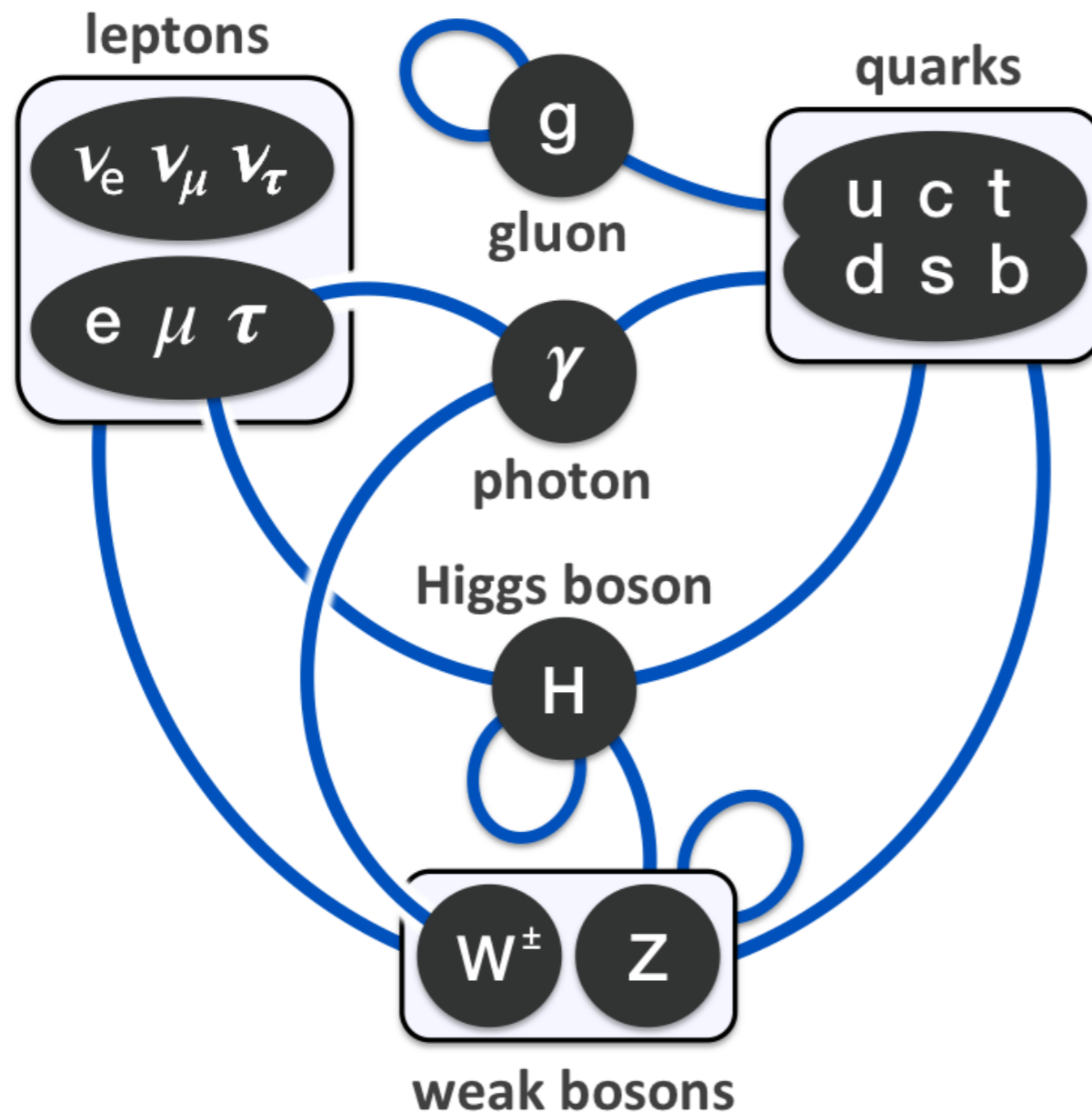
- ✓ 6 leptones, 6 quarks, agrupados en 3 generaciones
- ✓ bosones (γ , W^\pm , Z^0 , G_i , H)
- ✓ 18 parámetros libres ($m_\nu = 0$) \implies **Predicciones**
- ✓ Al menos 3 generaciones (violación de simetría CP)

Campos: objetos fundamentales que crean y destruyen partículas y antipartículas (excitaciones)

Fortaleza de una teoría científica:



- 1) variedad de fenómenos que explica,
- 2) capacidad de hacer predicciones "falsables" (capacidad de someter a prueba)



Sabor

masa → 2,4 MeV/c²
carga → 2/3
espín → 1/2
nombre → u
up

Simetrías y consecuencias de TCC

*

- Homegeneidad del espacio-tiempo \implies conservación (E, \vec{p})
- Isotropía del espacio-tiempo \implies \exists y conservación $J = L + S$
- Invariancia Grupo de Lorentz \implies \exists antipartículas (e^+, e^-, \dots)
- + hermiticidad \implies Conservación CPT
- Invariancia U(1) electromagnética \implies Conservación Q
- Simetrías accidentales U(1) \implies Conservación de L y B

Simetrías y consecuencias de TCC

*

- Homegeneidad del espacio-tiempo \implies conservación (E, \vec{p})
- Isotropía del espacio-tiempo \implies \exists y conservación $J = L + S$
- Invariancia Grupo de Lorentz \implies \exists antipartículas (e^+, e^-, \dots)
- + hermiticidad \implies Conservación CPT
- Invariancia U(1) electromagnética \implies Conservación Q
- Simetrías accidentales U(1) \implies Conservación de L y B

* El sabor no se conserva en las interacciones débiles cargadas

* C , P , T y CP no son simetrías de las interacciones débiles

* Las interacciones débiles son universales entre generaciones

Amplitud de probabilidad $\mathcal{M} = \mathcal{M}_0 + \mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2 + \dots$

- ◆ Perturbativo si $g^2/(4\pi) \ll 1$.
- ◆ Calcular con precision requerida por experimento
- ◆ Finita a cada orden redefiniendo parámetros del SM
- ◆ **Renormalizabilidad:** predictivo en términos de parámetros del MS

Renormalizabilidad, perturbatividad, predictibilidad

Amplitud de probabilidad

$$\mathcal{M} = \mathcal{M}_0 + \mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2 + \dots$$

“Clásico”
↓

Cuántico, divergente
⤵

- ◆ Perturbativo si $g^2/(4\pi) \ll 1$.
- ◆ Calcular con precision requerida por experimento
- ◆ Finita a cada orden redefiniendo parámetros del SM
- ◆ **Renormalizabilidad:** predictivo en términos de parámetros del MS

Renormalizabilidad, perturbatividad, predictibilidad

Amplitud de probabilidad

$$\mathcal{M} = \mathcal{M}_0 + \mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2 + \dots$$

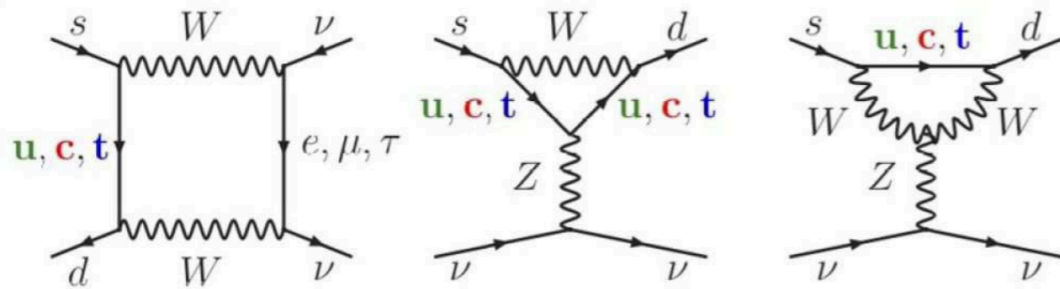
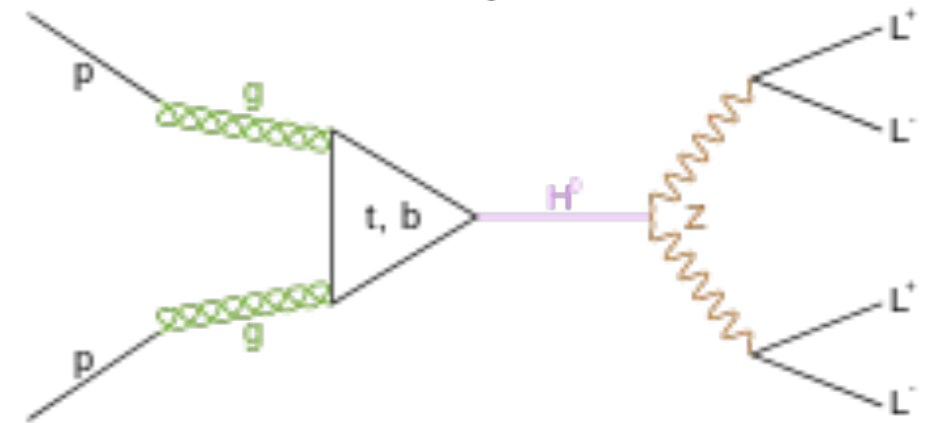
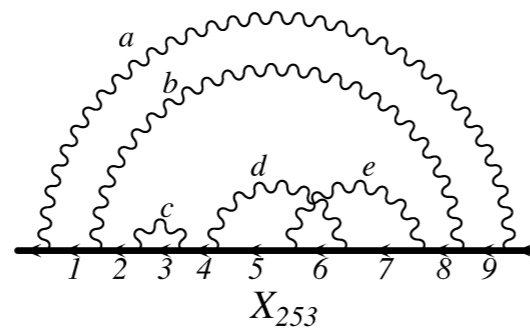
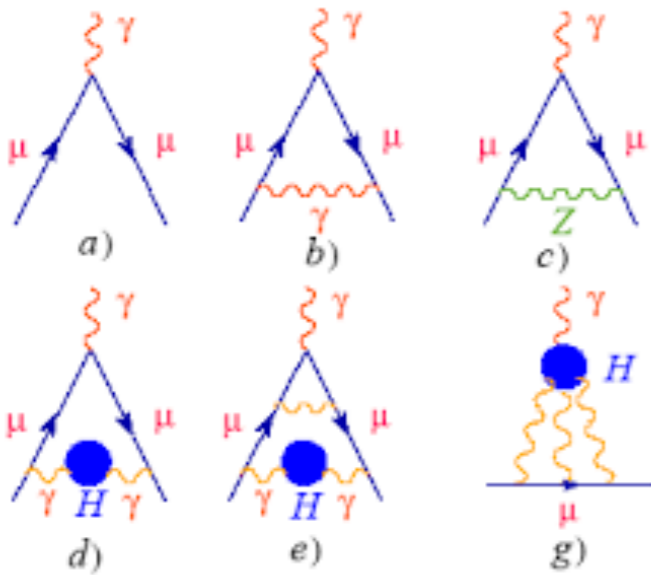
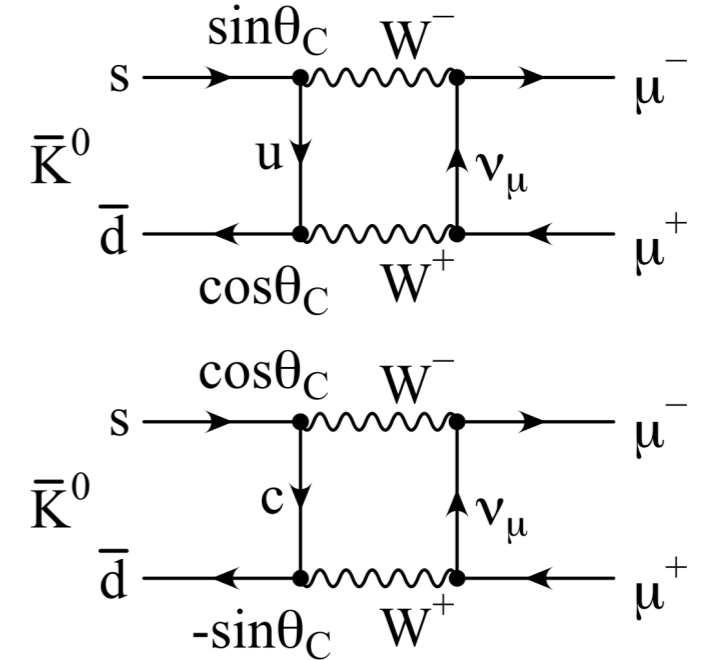
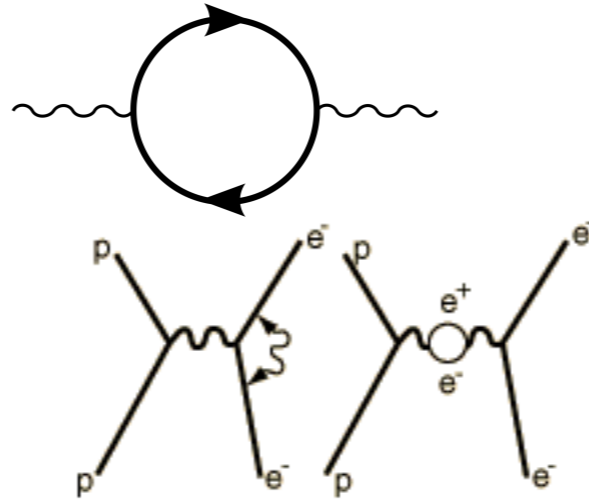
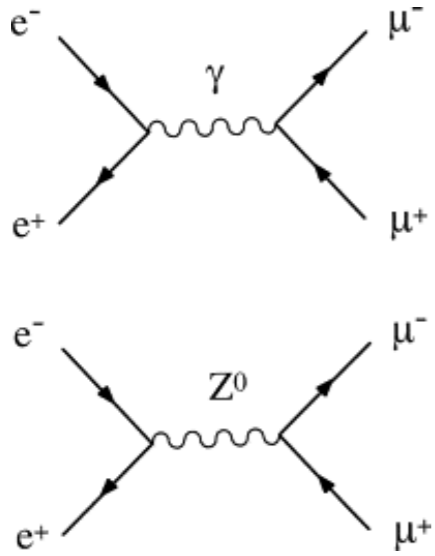
“Clásico”
Cuántico, divergente

- ◆ Perturbativo si $g^2/(4\pi) \ll 1$.
- ◆ Calcular con precision requerida por experimento
- ◆ Finita a cada orden redefiniendo parámetros del SM
- ◆ **Renormalizabilidad:** predictivo en términos de parámetros del MS

	Orden 0	O(1)	O(2)	O(3)	O(4)	O(5)
Vida muón	✓	✓	✓			
a_e	✗	✓	✓	✓	✓	✓
a_{μ}	✗	✓	✓	✓	✓	
d_n	✗	✗	✗	✓		
Mezcla $K^0 - \bar{K}^0$	✗	✗	✓	✓		
$b \rightarrow s\ell^+\ell^-, \nu\bar{\nu}$	✗	✓	✓			
$\mu \rightarrow e\gamma$	✗	✗	✗	✗	✗	✗

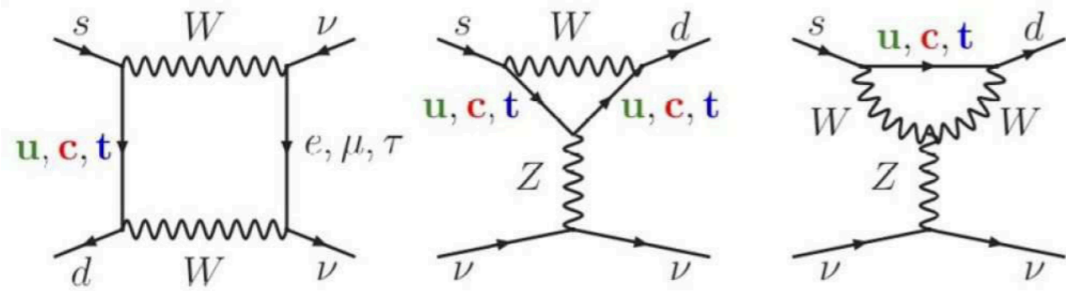
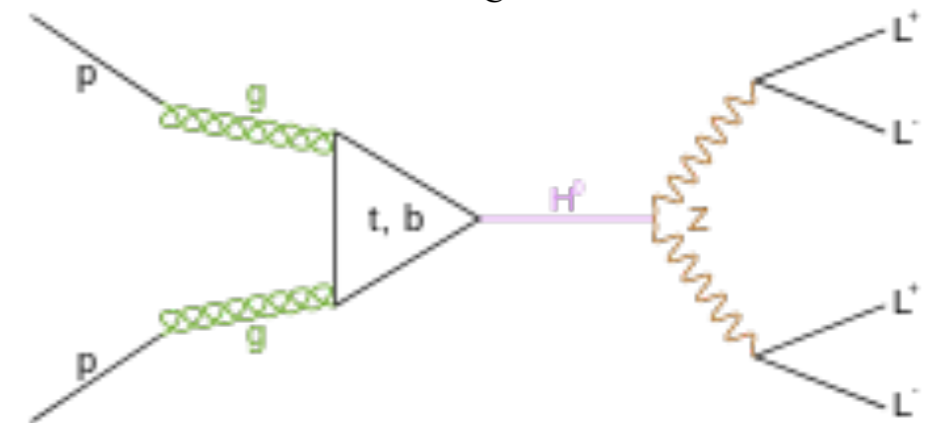
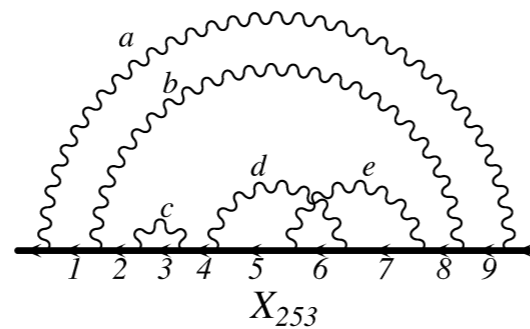
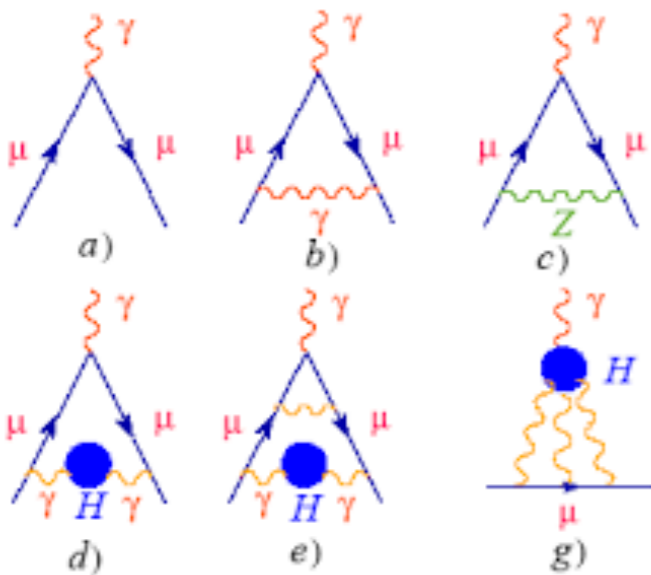
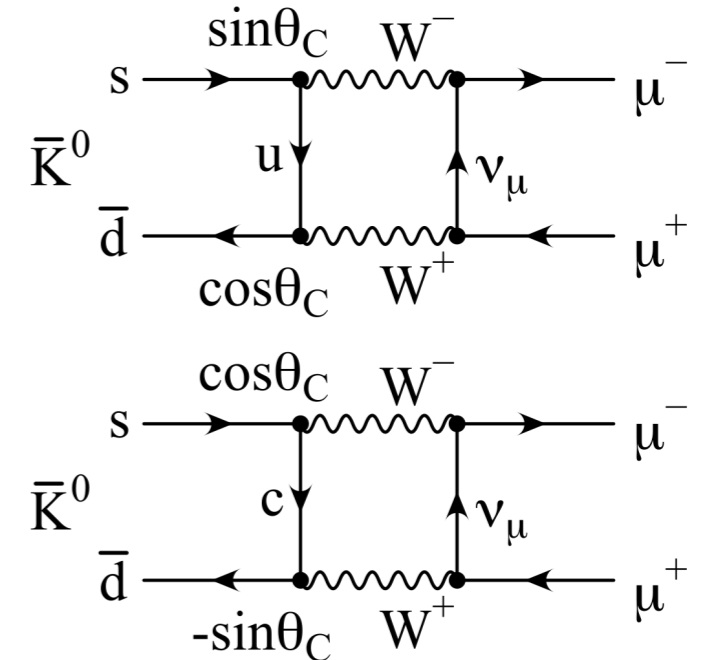
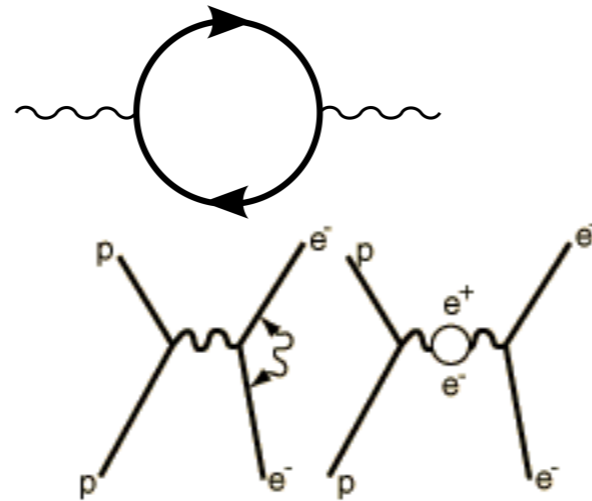
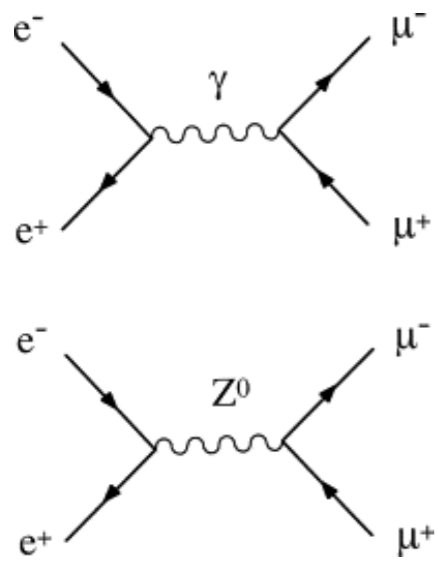
En teoría cuántica de campos, lo probable es posible

Creación, aniquilación, fluctuaciones cuánticas, ...



En teoría cuántica de campos, lo probable es posible

Creación, aniquilación, fluctuaciones cuánticas, ...



¡La renormalización hace el "milagro" de dar resultados **calculables y finitos** a cada orden de la teoría de perturbaciones!

Éxitos del modelo





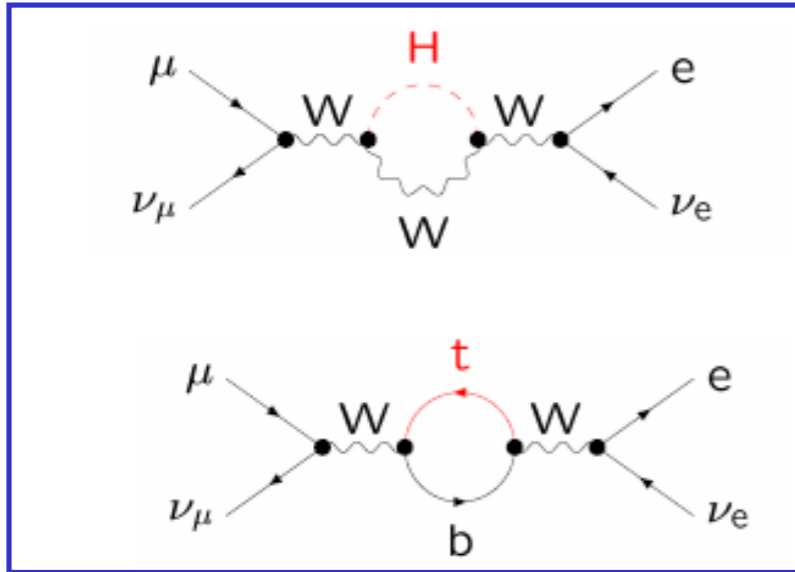
Particle Data Book

- ☑ Miles de datos (Particle Data Book) pueden ser explicados por el modelo con sus 18 parámetros libres.
- ☑ “Predicción” de la masa del quark top y del boson de Higgs
- ☑ Predicción de existencia de corrientes neutras (Weinberg 1967).

...

"Predicción" de la masa del Higgs

$$\frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3} \quad \text{Tiempo de vida del } \mu$$

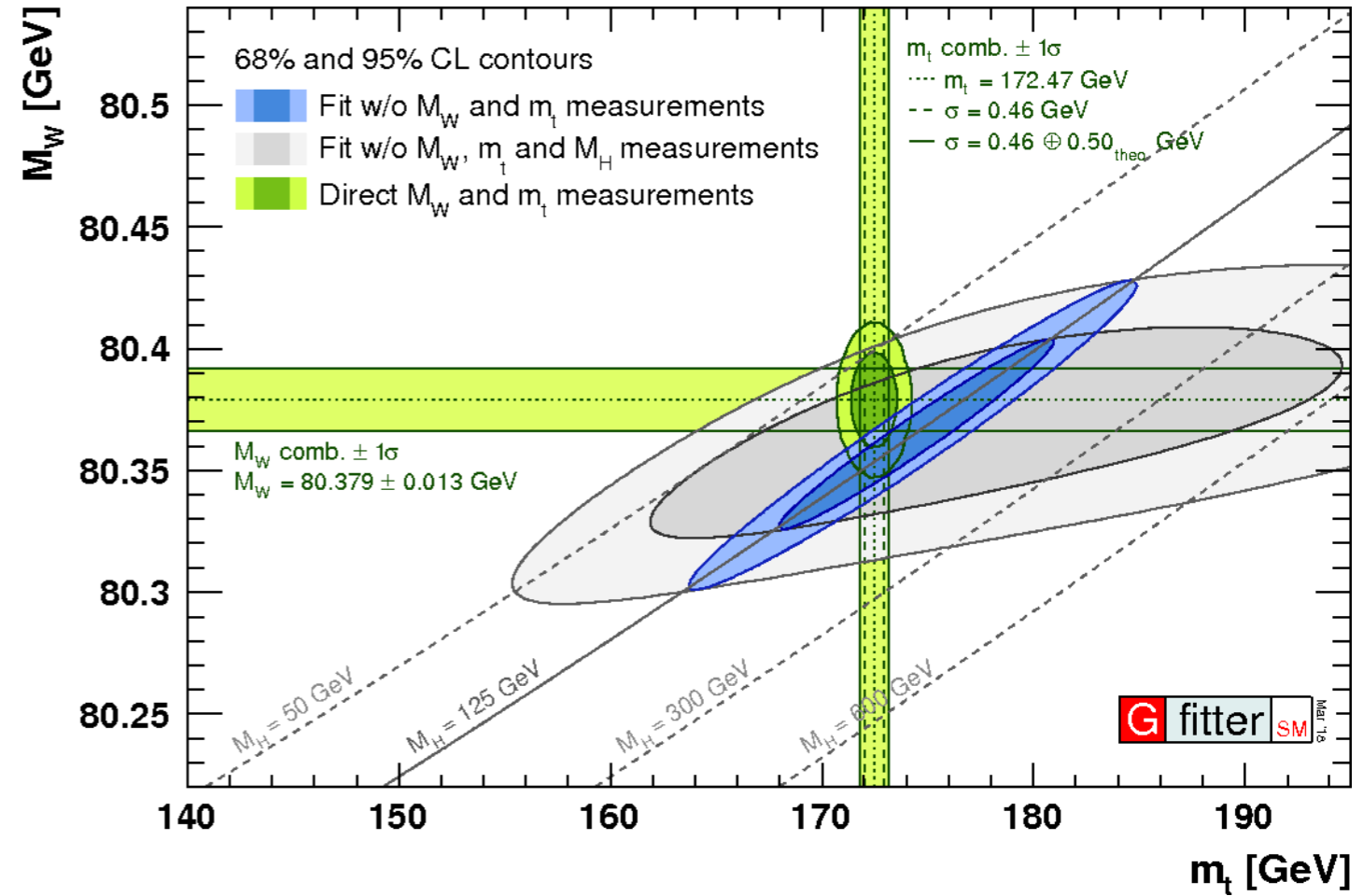
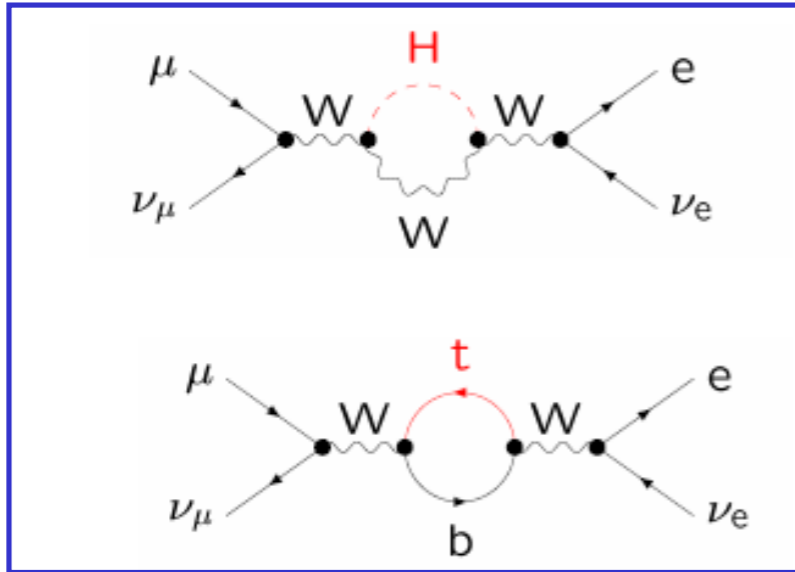


$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{\pi\alpha}{m_W^2 (1 - m_W^2/m_Z^2)} (1 + \Delta r)$$

$\Delta r = \Delta r(m_t, m_H, m_W \dots)$ Logarítmico en m_H , cuadrático en m_t .

"Predicción" de la masa del Higgs

$$\frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3} \quad \text{Tiempo de vida del } \mu$$



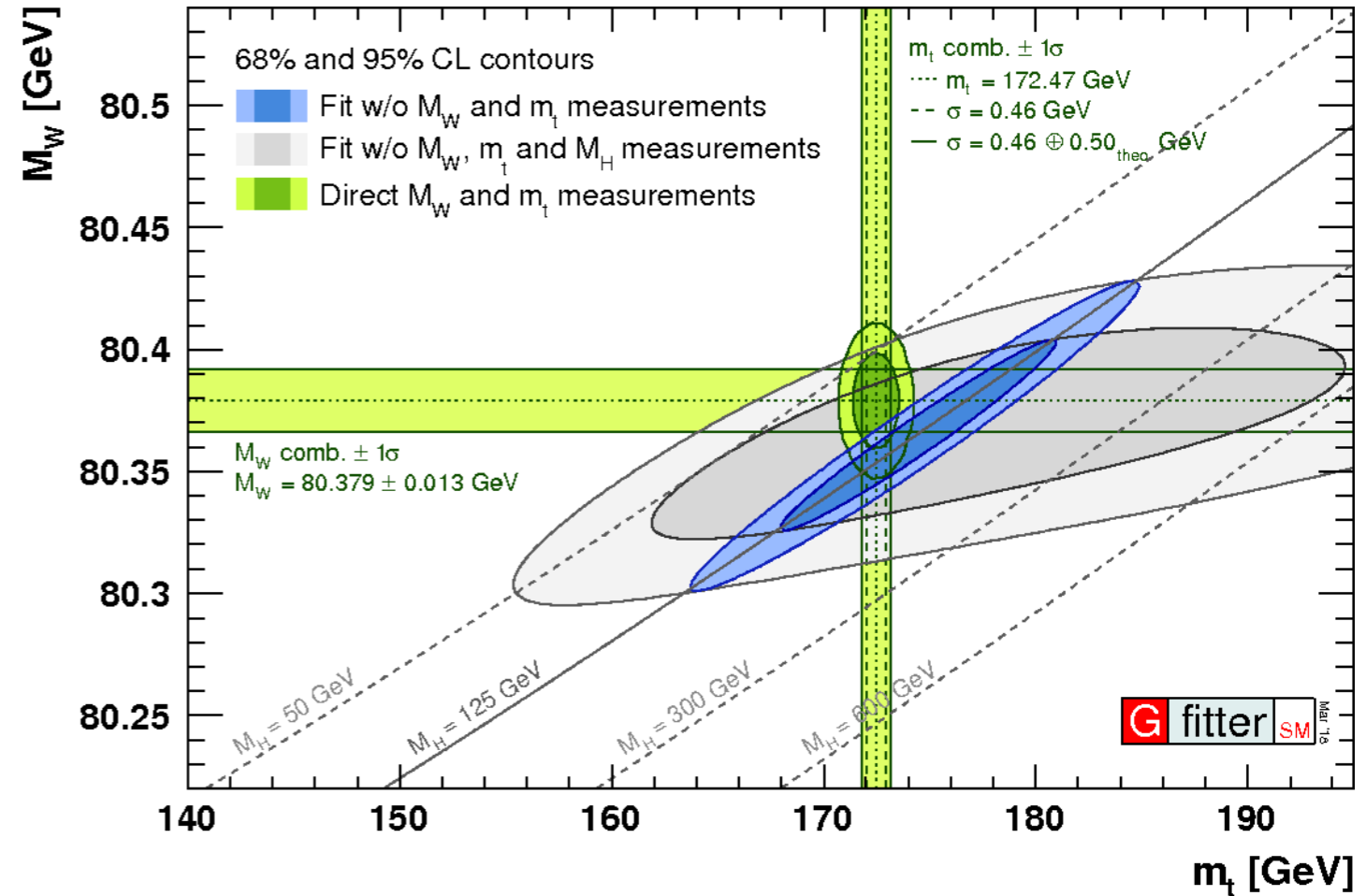
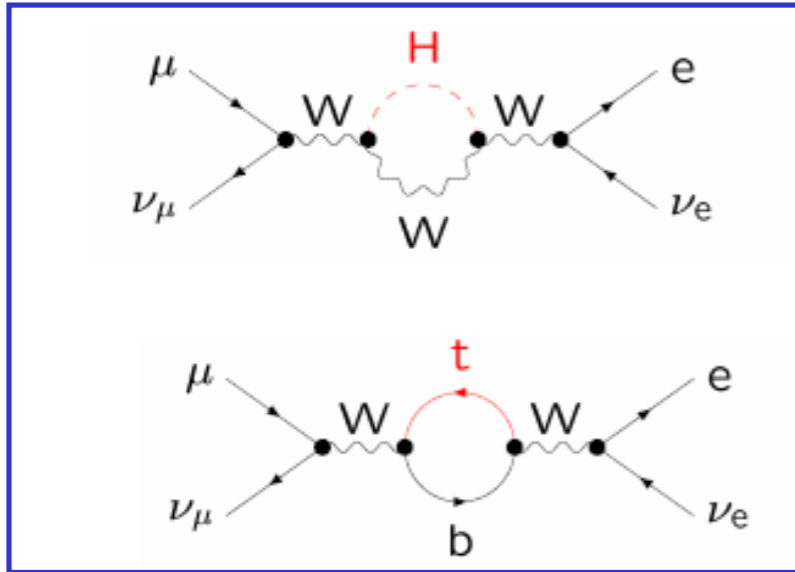
$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{\pi\alpha}{m_W^2 (1 - m_W^2/m_Z^2)} (1 + \Delta r)$$

<http://gfitter.desy.de>

$\Delta r = \Delta r(m_t, m_H, m_W \dots)$ Logarítmico en m_H , cuadrático en m_t .

"Predicción" de la masa del Higgs

$$\frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3} \quad \text{Tiempo de vida del } \mu$$



<http://gfitter.desy.de>

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{\pi\alpha}{m_W^2 (1 - m_W^2/m_Z^2)} (1 + \Delta r)$$

$\Delta r = \Delta r(m_t, m_H, m_W \dots)$ Logarítmico en m_H , cuadrático en m_t .

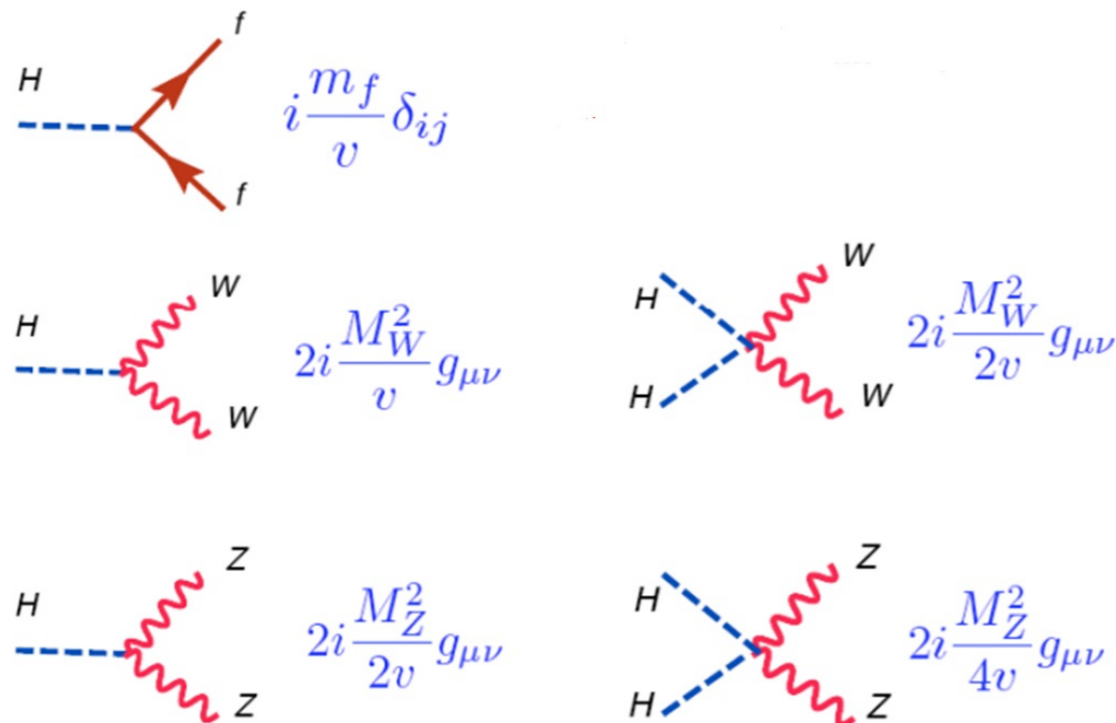
Mejor ajuste ICHEP 2008,

$$m_H = 116.4^{+18.3}_{-1.3} \text{ GeV}$$

PDG 2023

$$m_H = 125.25 \pm 0.17$$

¿La interacción del Higgs genera las masas?

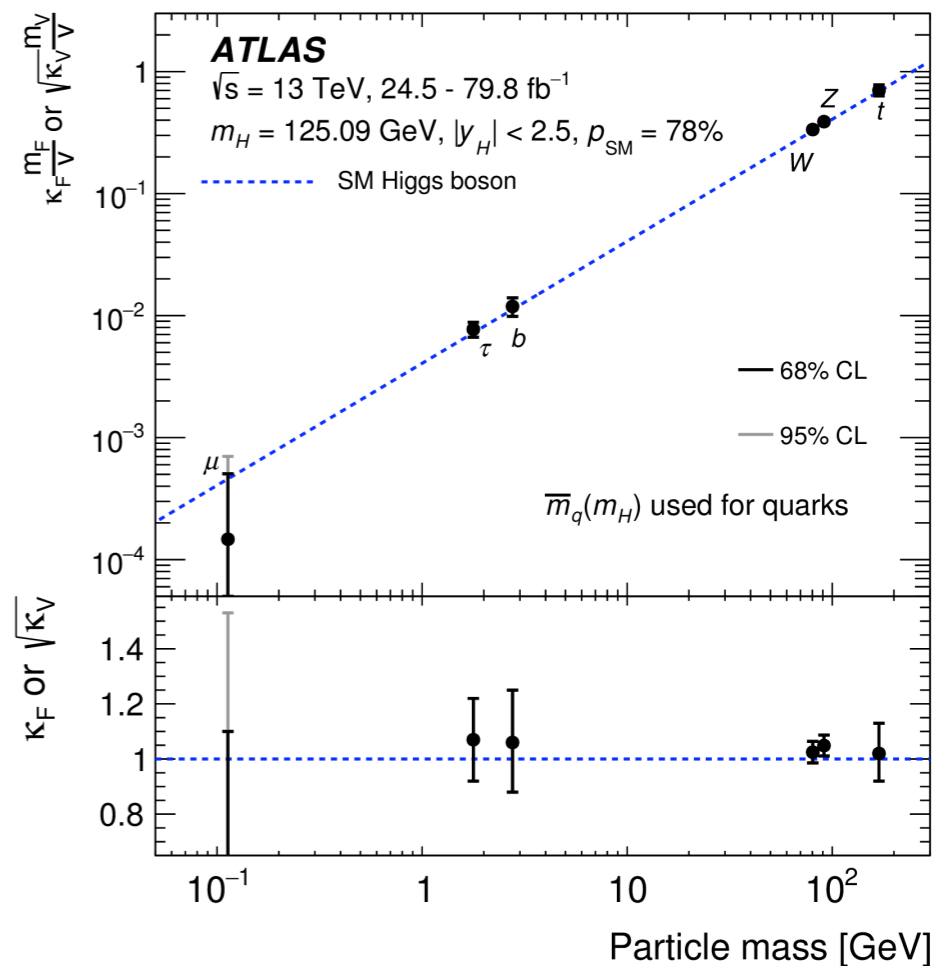
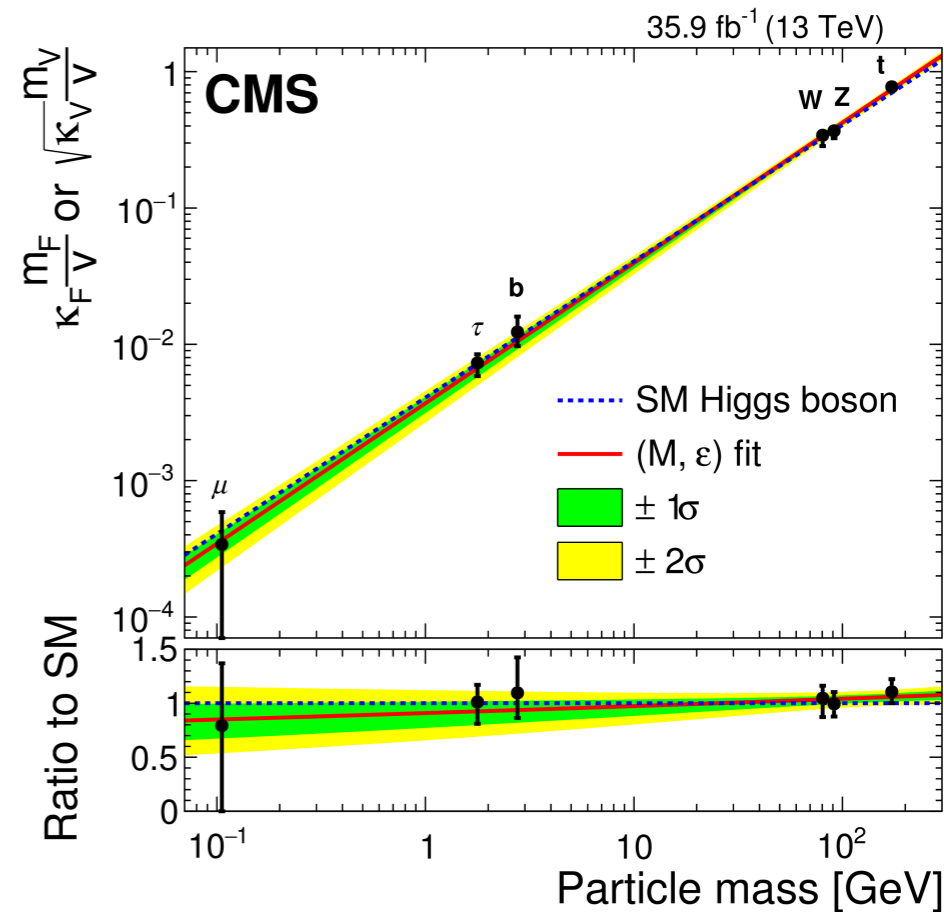


Higgs coupling proportional to m_f, M_W^2, M_Z^2

C. Anastasiou, CTEQ-MCnet summer school 2008

$$J^P = 0^+$$

Otras razones para preferir un solo doblete de Higgs, “Reflections on the Higgs system”, M. Veltman 1997



Ajuste electrodébil a datos de precisión. Consistencia del ME

Input

$$m_W = 80.369(16) \text{ GeV}$$

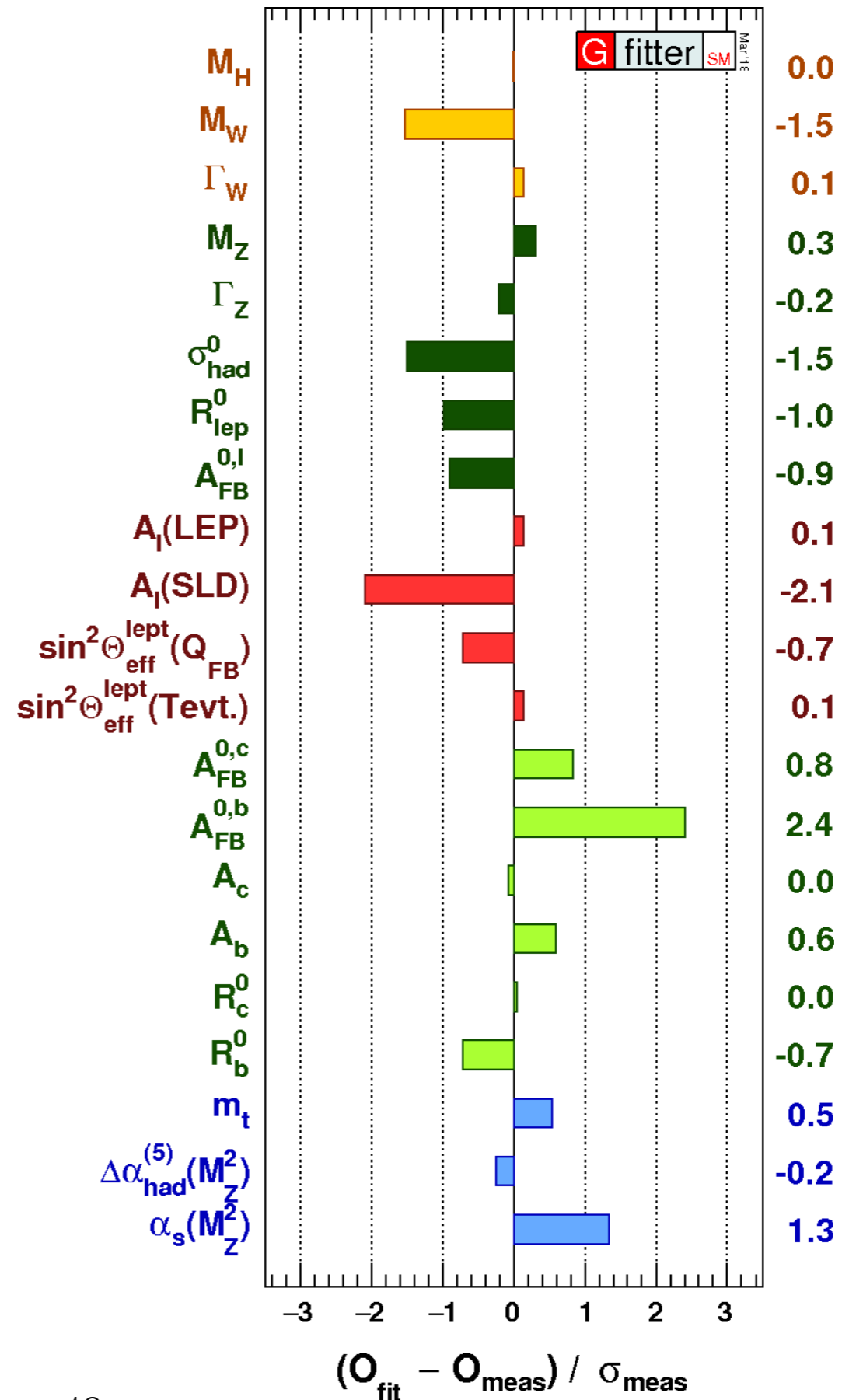
$$m_t = 172.47(46) \text{ GeV}$$

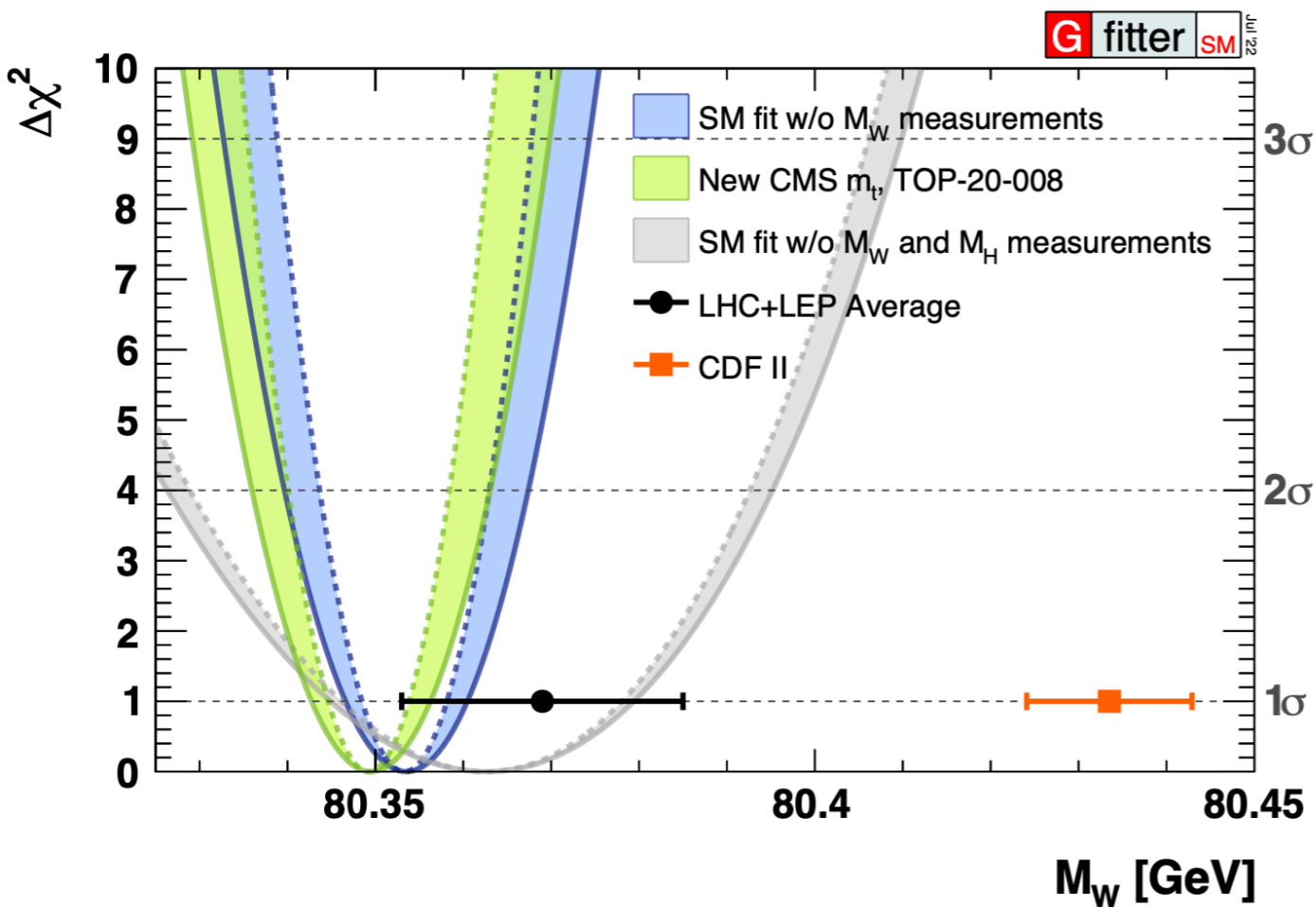
$$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\ell} = 0.23141(26)$$

$$m_c, m_b, m_H$$

$$\Delta\alpha^{\text{had}}(m_Z)$$

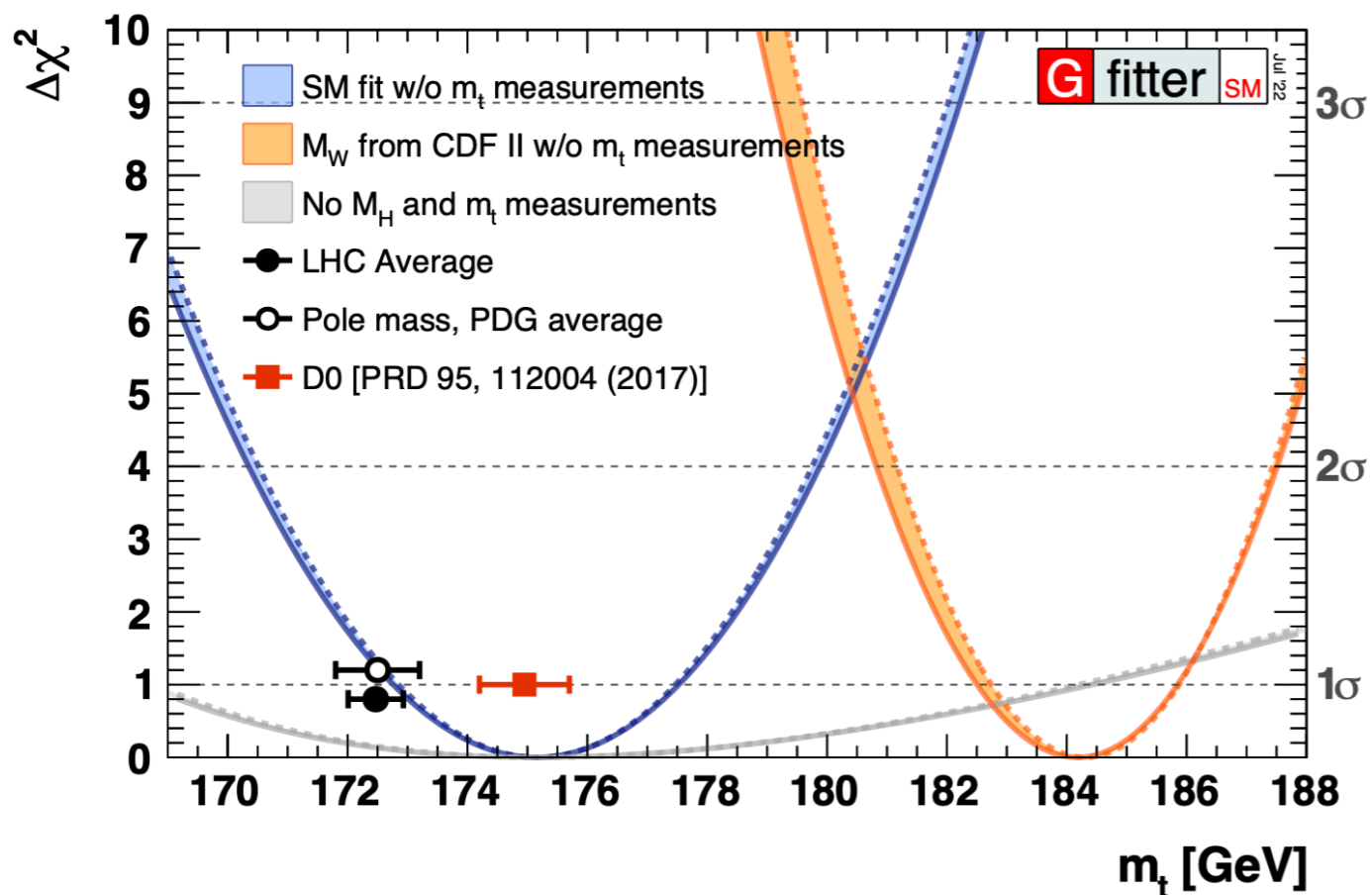
H.O.O.





“Predicciones” del Ajuste electrodébil *

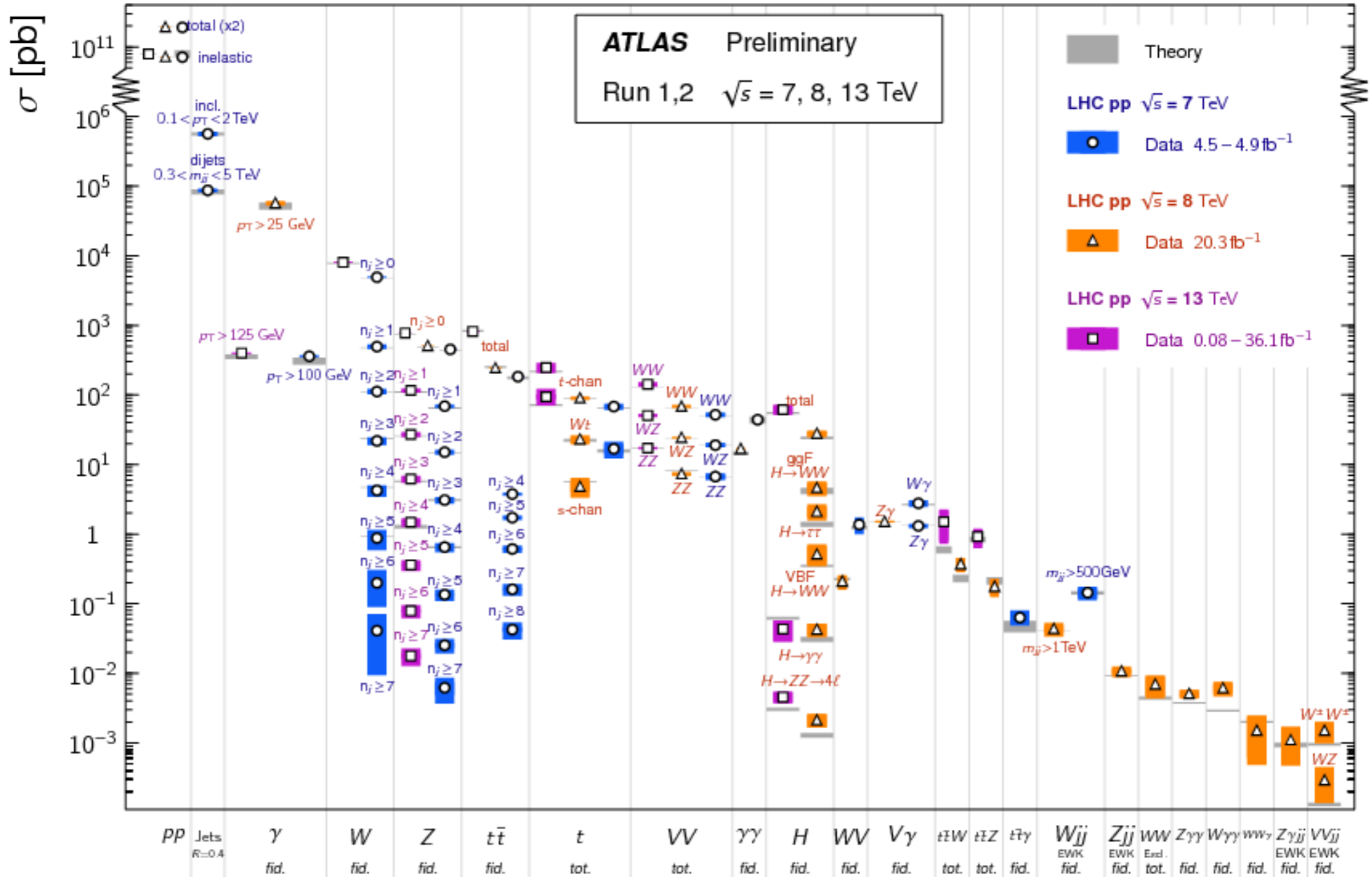
$$m_W = 80.354 \pm 0.007 \text{ GeV}$$



$$m_t = 175.15 \pm 2.39 \text{ GeV}$$

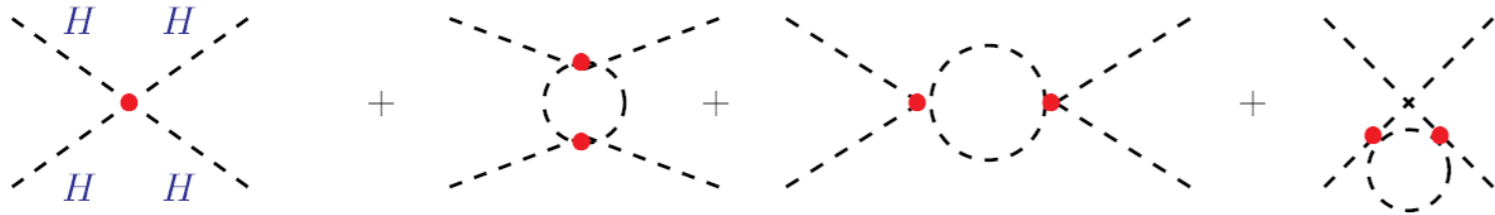
Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: May 2017

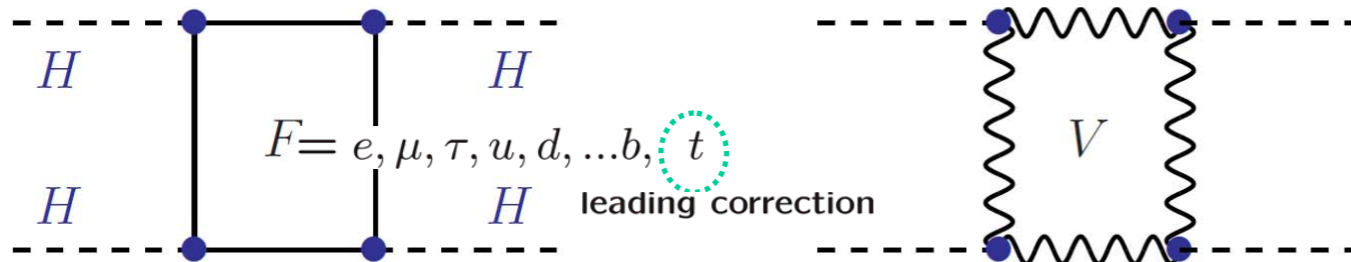


Límites de trivialidad y estabilidad

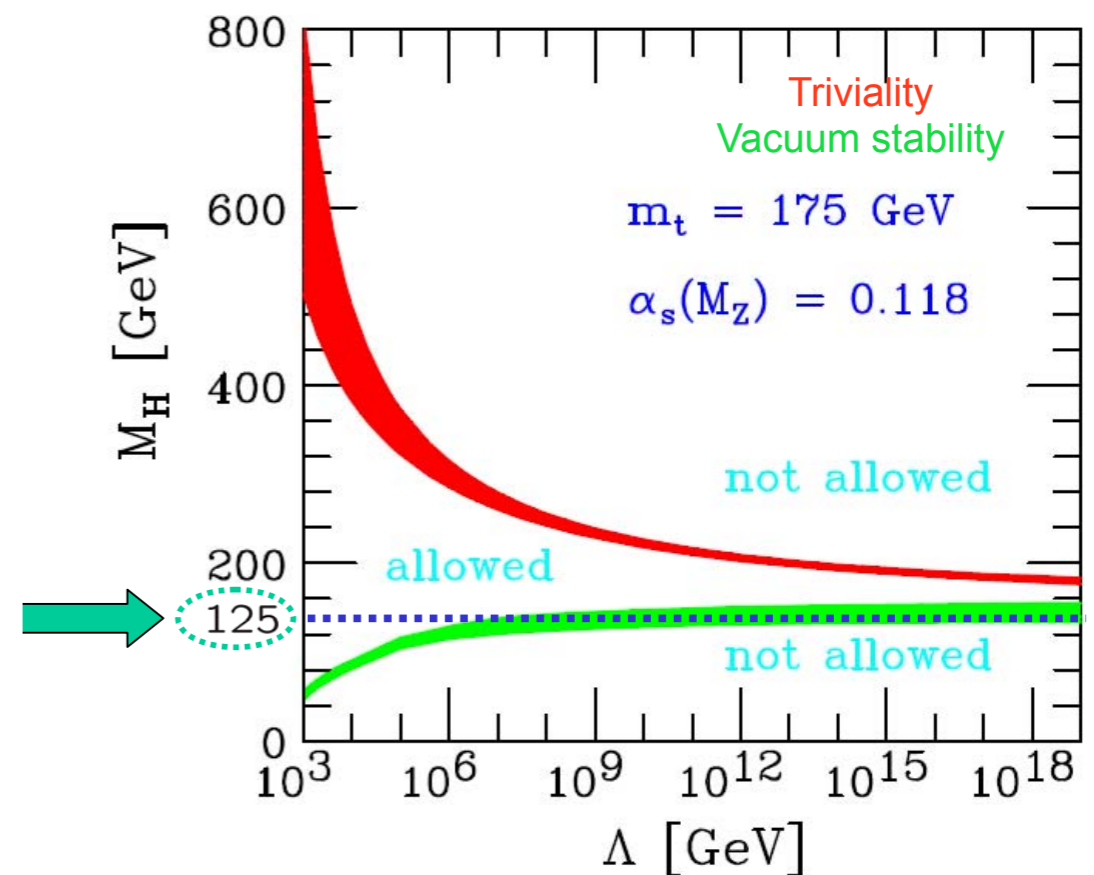
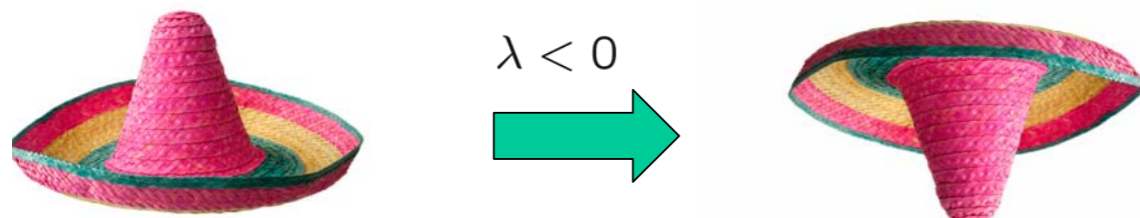
$$\lambda(v) = \frac{m_H^2}{2v^2} \approx 0.13$$



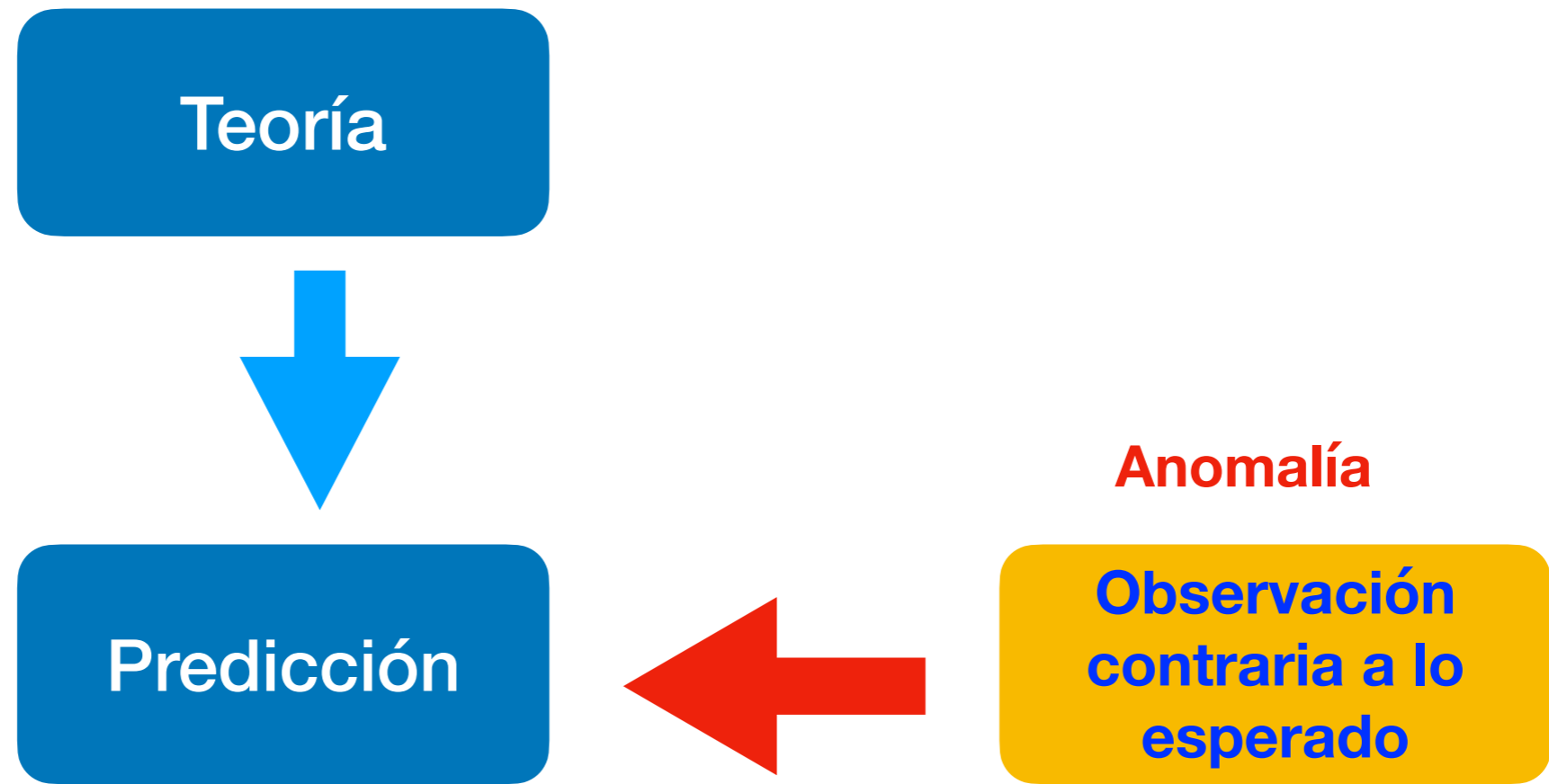
$$\lambda(Q) = \frac{\lambda(v)}{1 - \frac{3}{4\pi^2} \lambda(v) \ln \frac{Q^2}{v^2}}$$



$$\lambda(Q) = \lambda(v) - \frac{3m_t^4}{2\pi^2 v^4} \ln \frac{Q}{v}$$



Anomalías



Todo cuadra muy bien....excepto algunas anomalías

Anomalía: resultado que no coincide con lo esperado en la Teoría

T. S. Kuhn (1962), “Estructura de las revoluciones científicas” ,
Cap 7: Anomalías y el surgimiento de los descubrimientos científicos

Muchas anomalías recientes que
causan un gran entusiasmo:

$g - 2$ del muon,
anomalía de Cabibbo,
 $R(D), R(D^*)$,
 $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$,
 $K^+ \rightarrow \pi^+\nu\bar{\nu}, B \rightarrow K\nu\bar{\nu}$
 $H \rightarrow Z\gamma$
⋮

Todo cuadra muy bien....excepto algunas anomalías

Anomalía: resultado que no coincide con lo esperado en la Teoría

T. S. Kuhn (1962), “Estructura de las revoluciones científicas” ,
Cap 7: Anomalías y el surgimiento de los descubrimientos científicos

Muchas anomalías recientes que
causan un gran entusiasmo:

$g - 2$ del muon,
anomalía de Cabibbo,
 $R(D), R(D^*)$,
 $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$,
 $K^+ \rightarrow \pi^+\nu\bar{\nu}, B \rightarrow K\nu\bar{\nu}$
 $H \rightarrow Z\gamma$
⋮

Criterio p/descubrimiento: **anomalía $> 5\sigma$ (p=0.00003 %)**

Todo cuadra muy bien....excepto algunas anomalías

Anomalía: resultado que no coincide con lo esperado en la Teoría

T. S. Kuhn (1962), “Estructura de las revoluciones científicas” ,
Cap 7: Anomalías y el surgimiento de los descubrimientos científicos

Muchas anomalías recientes que
causan un gran entusiasmo:

$g - 2$ del muon,
anomalía de Cabibbo,
 $R(D), R(D^*)$,
 $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$,
 $K^+ \rightarrow \pi^+\nu\bar{\nu}, B \rightarrow K\nu\bar{\nu}$
 $H \rightarrow Z\gamma$
⋮

Criterio p/descubrimiento: **anomalía $> 5\sigma$ (p=0.00003 %)**

“A result that has a statistical significance of five sigma means the almost certain likelihood that a bump in the data is caused by a new phenomenon, rather than a statistical fluctuation.”

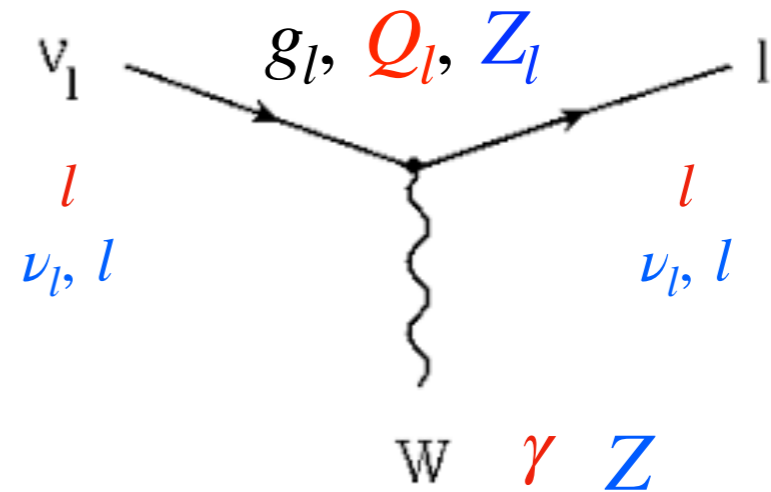
L. Lyons, “*Discovering the significance of 5σ* ”, arXiv: 1310.1284

Search	Degree of surprise	Impact	LEE	Systematics	Number of σ
Higgs search	Medium	Very high	Mass	Medium	5
Single top	No	Low	No	No	3
SUSY	Yes	Very high	Very large	Yes	7
B_s oscillations	Medium/low	Medium	Δm	No	4
Neutrino oscillations	Medium	High	$\sin^2(2\theta), \Delta m^2$	No	4
$B_s \rightarrow \mu\mu$	No	Low/Medium	No	Medium	3
Pentaquark	Yes	High/very high	M, decay mode	Medium	7
$(g - 2)_\mu$ anomaly	Yes	High	No	Yes	4
H spin $\neq 0$	Yes	High	No	Medium	5
4 th generation q, l, ν	Yes	High	M, mode	No	6
$v_\nu > c$	Enormous	Enormous	No	Yes	>8
Dark matter (direct)	Medium	High	Medium	Yes	5
Dark energy	Yes	Very high	Strength	Yes	5
Grav waves	No	High	Enormous	Yes	7

Requerido para proclamar descubrimiento de algo nuevo

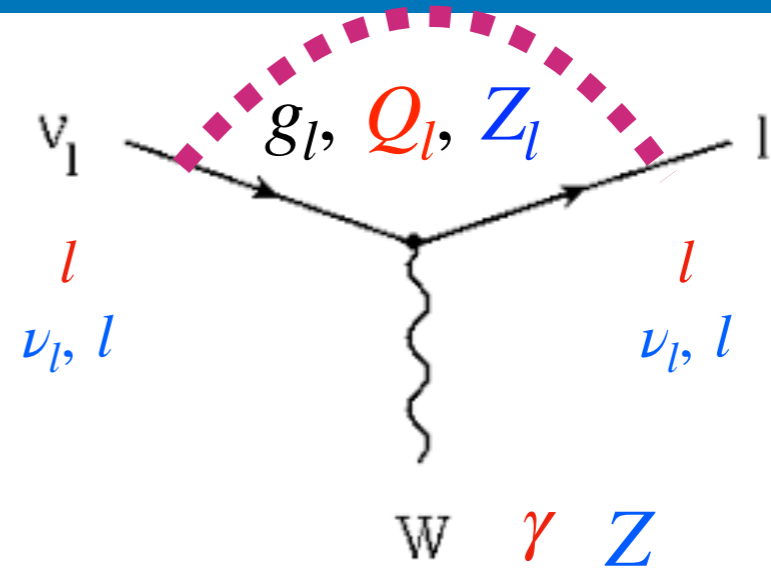
¿Anomalía en la universalidad leptónica?

SM: las interacciones de gauge no distinguen generaciones de leptones (y quarks!)



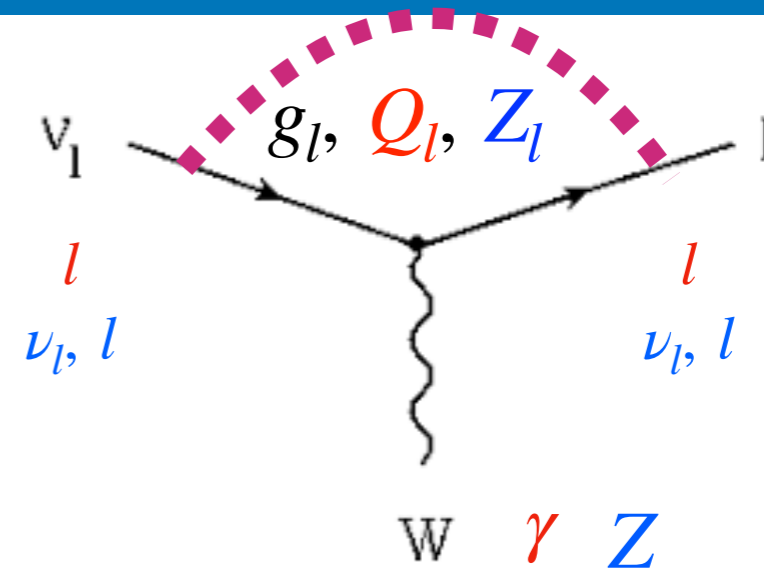
¿Anomalía en la universalidad leptónica?

SM: las interacciones de gauge no distinguen generaciones de leptones (y quarks!)



¿Anomalía en la universalidad leptónica?

SM: las interacciones de gauge no distinguen generaciones de leptones (y quarks!)



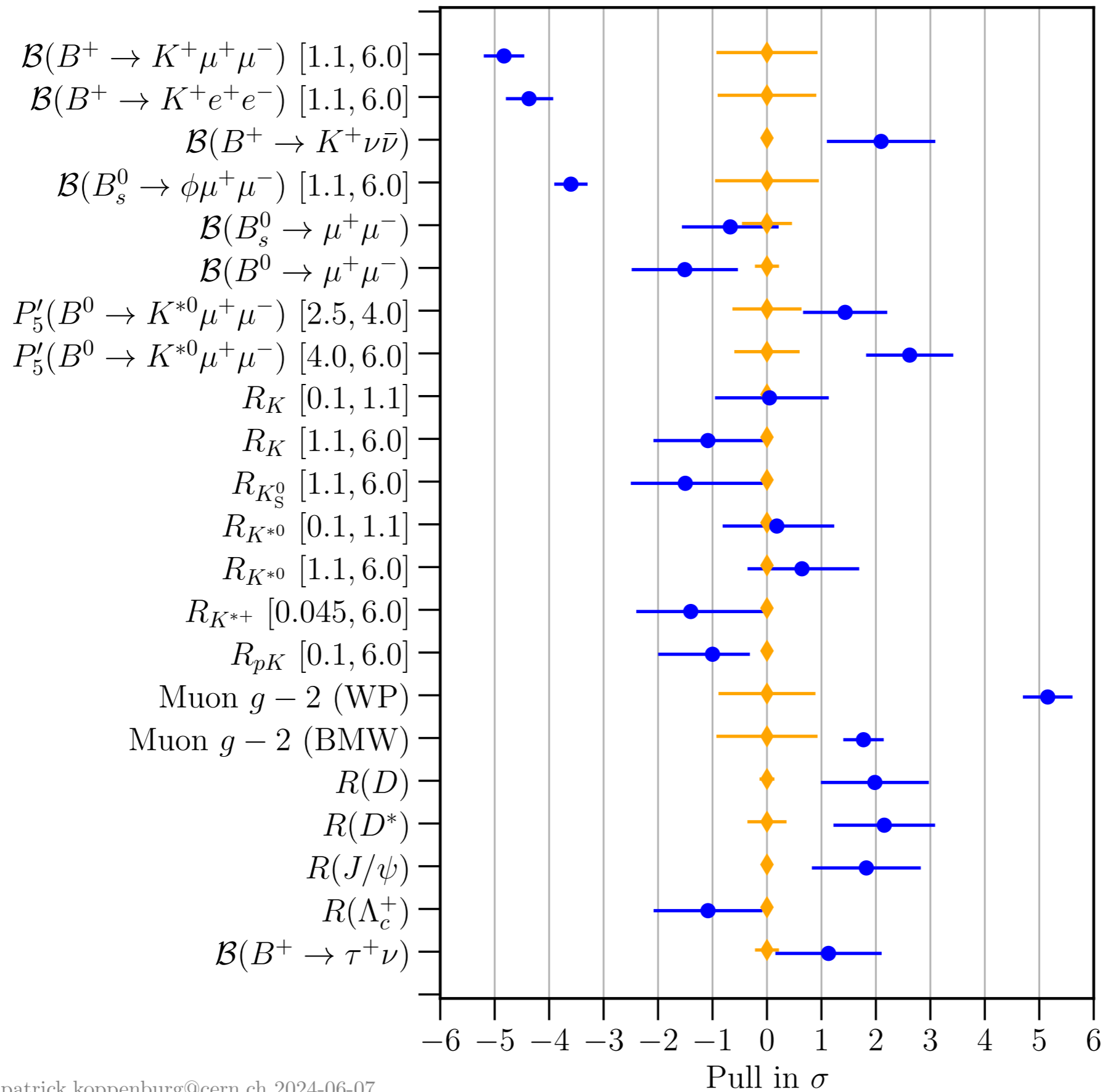
Pich 2020

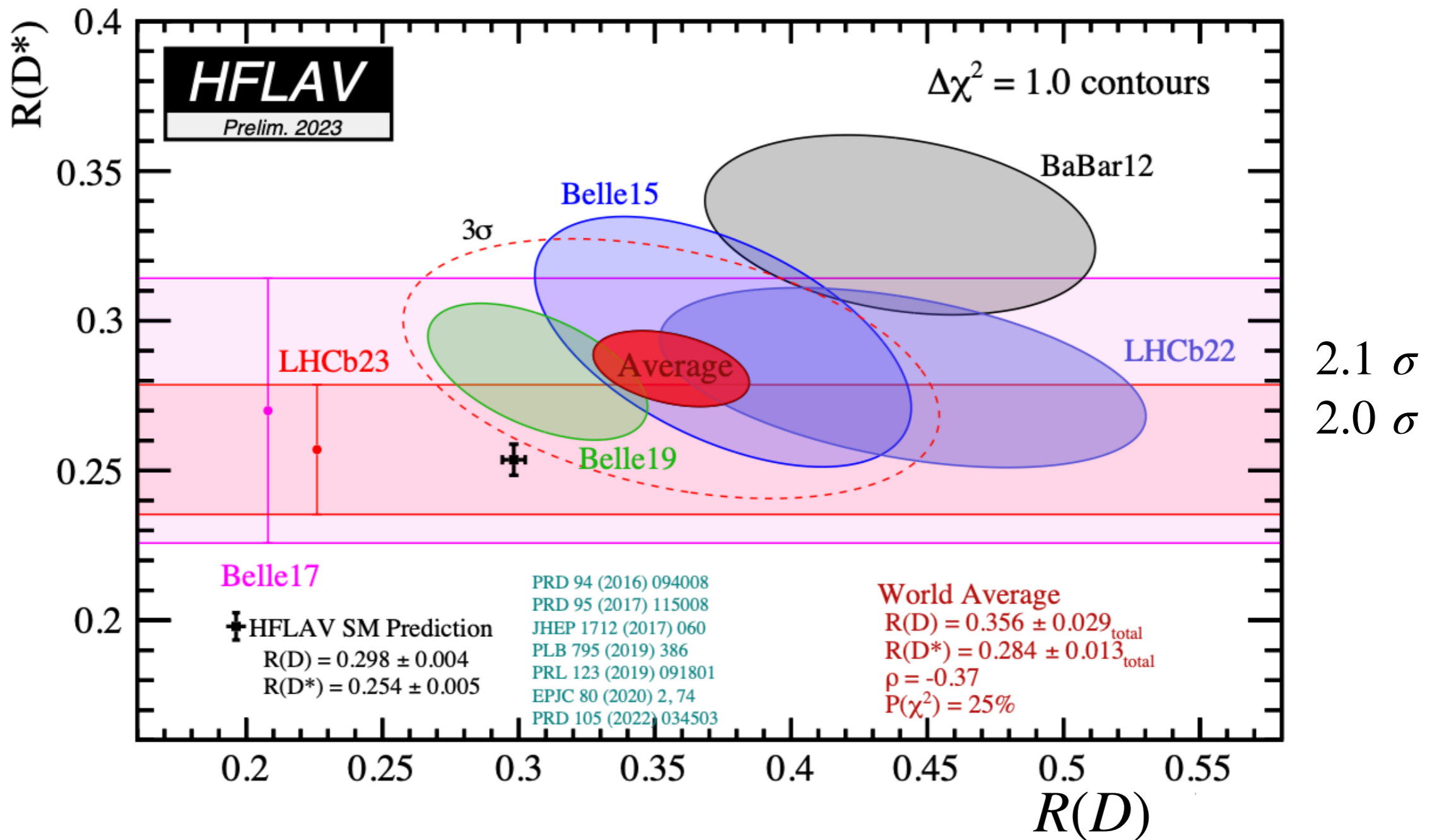
	$\Gamma_{\tau \rightarrow \mu} / \Gamma_{\tau \rightarrow e}$	$\Gamma_{\pi \rightarrow \mu} / \Gamma_{\pi \rightarrow e}$	$\Gamma_{K \rightarrow \mu} / \Gamma_{K \rightarrow e}$	$\Gamma_{K \rightarrow \pi \mu} / \Gamma_{K \rightarrow \pi e}$	$\Gamma_{W \rightarrow \mu} / \Gamma_{W \rightarrow e}$
$ g_{\mu} / g_e $	1.0018 (16)	1.0021 (16)	0.9978 (20)	1.0010 (25)	0.996 (10)
	$\Gamma_{\tau \rightarrow e} / \Gamma_{\mu \rightarrow e}$	$\Gamma_{\tau \rightarrow \pi} / \Gamma_{\pi \rightarrow \mu}$	$\Gamma_{\tau \rightarrow K} / \Gamma_{K \rightarrow \mu}$	$\Gamma_{W \rightarrow \tau} / \Gamma_{W \rightarrow \mu}$	
$ g_{\tau} / g_{\mu} $	1.0011 (15)	0.9962 (27)	0.9858 (70)	1.034 (13)	
	$\Gamma_{\tau \rightarrow \mu} / \Gamma_{\mu \rightarrow e}$	$\Gamma_{W \rightarrow \tau} / \Gamma_{W \rightarrow e}$			
$ g_{\tau} / g_e $	1.0030 (15)	1.031 (13)			

¡Compatibles con 1, desviaciones del valor central <1.5%!

$$R(D^{(*)}) = \frac{B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu_{\tau}}{B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu_{\ell}}$$

$$R(K^{(*)}) = \frac{B \rightarrow K^{(*)} \mu^{+} \mu^{-}}{B \rightarrow K^{(*)} e^{+} e^{-}}$$





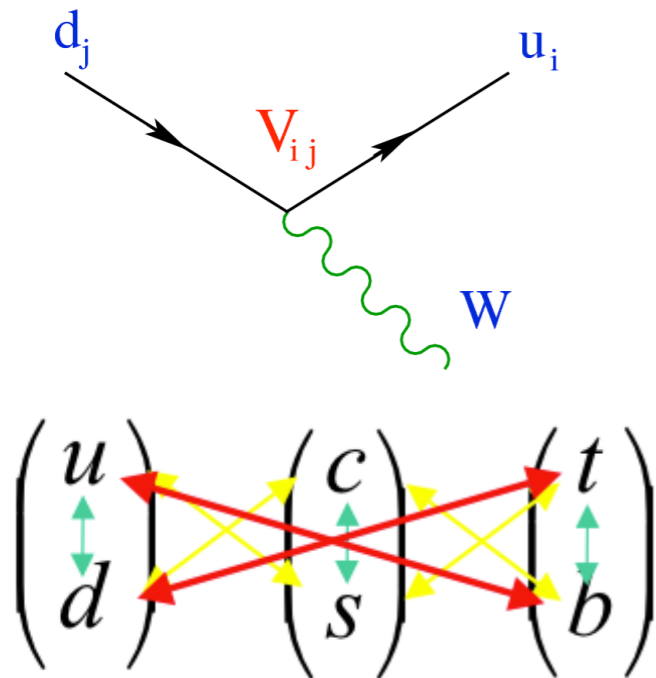
¿ $g_\tau/g_{e,\mu} = 1.06$ (1.09) ó nuevas interacciones?

Tendencia resultados recientes a disolver la anomalía

COMPLETEZ DE LA TEORÍA



$$i\bar{\psi} \not{D}\psi \rightarrow \frac{ig}{\sqrt{2}} (\bar{u}, \bar{c}, \bar{t})_L \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \gamma^\mu \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix}_L W_\mu + \text{h.c.}$$



COMPLETEZ DE LA TEORÍA



$$i\bar{\psi} \not{D}\psi \rightarrow \frac{ig}{\sqrt{2}} (\bar{u}, \bar{c}, \bar{t})_L \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \gamma^\mu \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix}_L W_\mu + \text{h.c.}$$

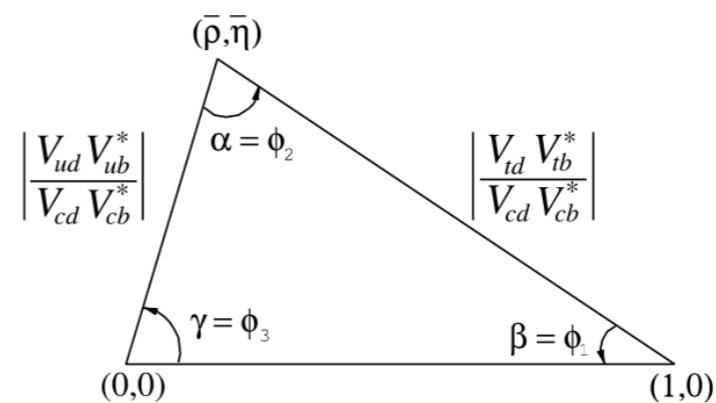
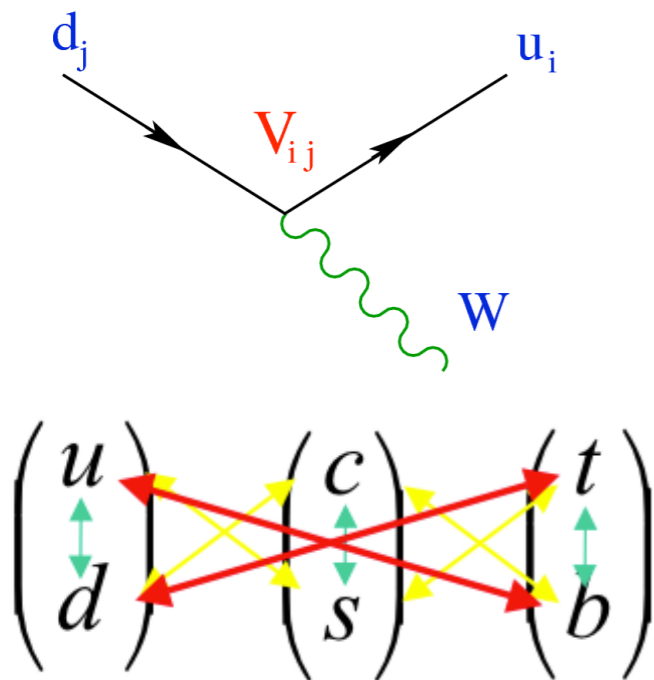
Matriz unitaria $VV^\dagger = 1$: 3 ángulos, 1 fase (CP)

- Bajo CP $V \rightarrow V^*$

- Unitaridad/completez: $\Delta_U \equiv |V_{Ud}|^2 + |V_{Us}|^2 + |V_{Ub}|^2 = 1$

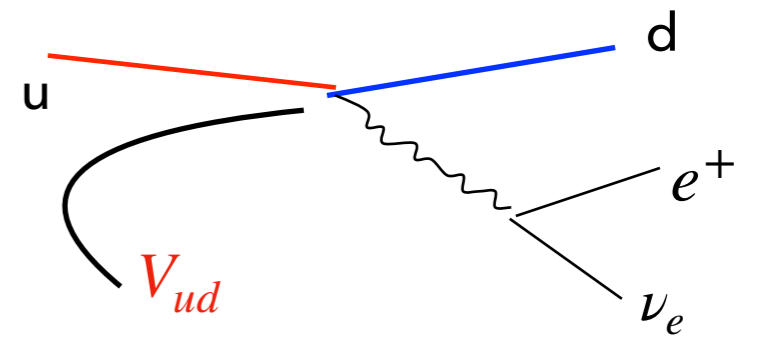
$$\left. \begin{aligned} \Delta_u &= 0.9985 \pm 0.0005 \\ \Delta_c &= 1.025 \pm 0.022 \\ \Delta_t &= 1.028 \pm 0.061 \end{aligned} \right\} \text{experimento}$$

- Ortogonalidad: $V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$



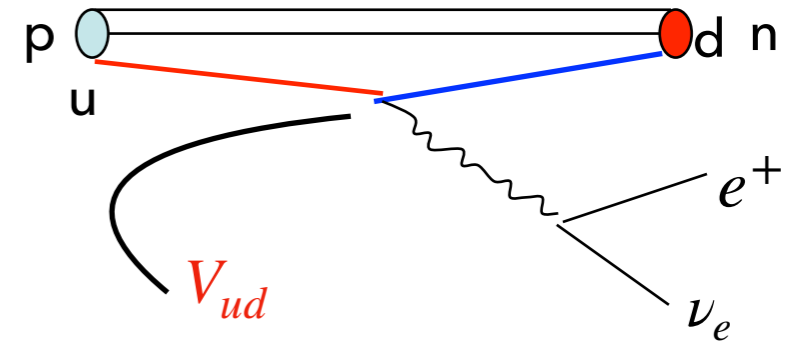
¿"Anomalía de Cabibbo" o triunfo del SM a nivel cuántico?

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0007$$



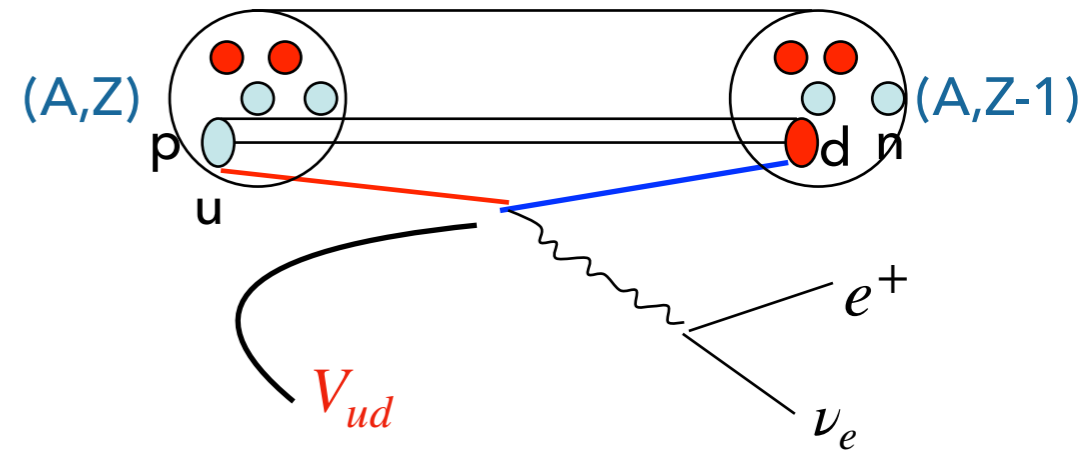
¿"Anomalía de Cabibbo" o triunfo del SM a nivel cuántico?

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0007$$



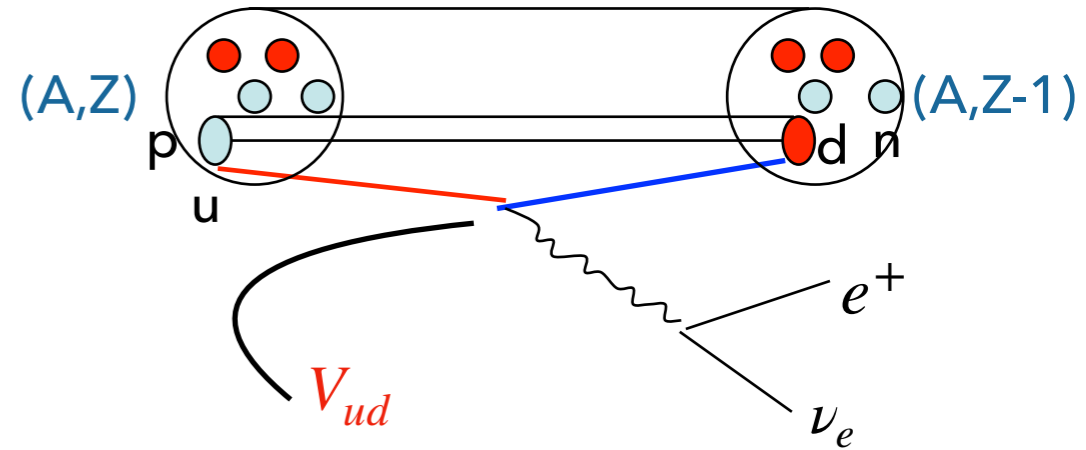
¿"Anomalía de Cabibbo" o triunfo del SM a nivel cuántico?

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0007$$



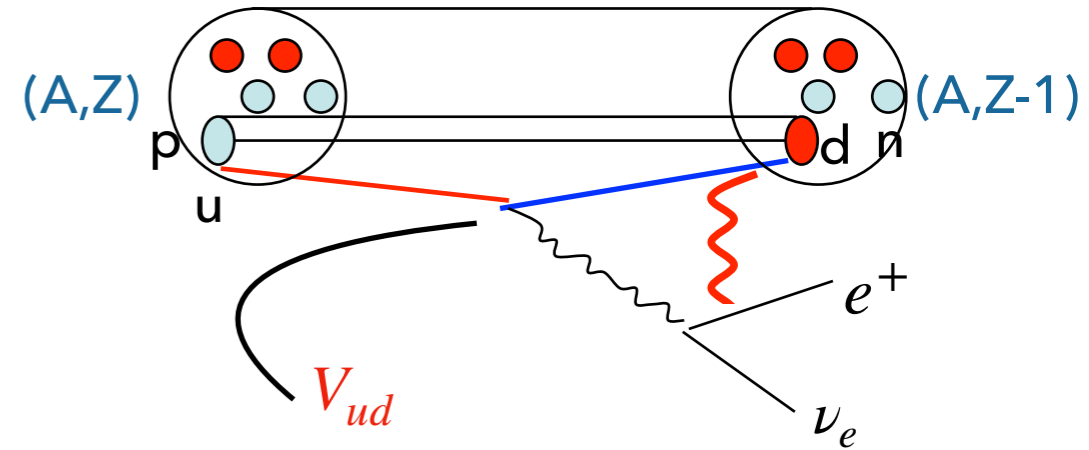
¿"Anomalía de Cabibbo" o triunfo del SM a nivel cuántico?

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0007$$



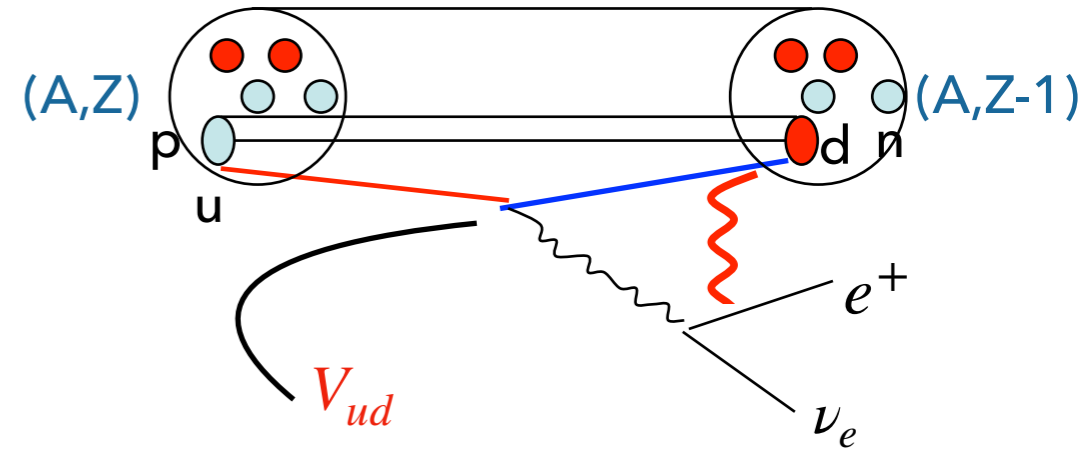
¿"Anomalía de Cabibbo" o triunfo del SM a nivel cuántico?

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0007$$



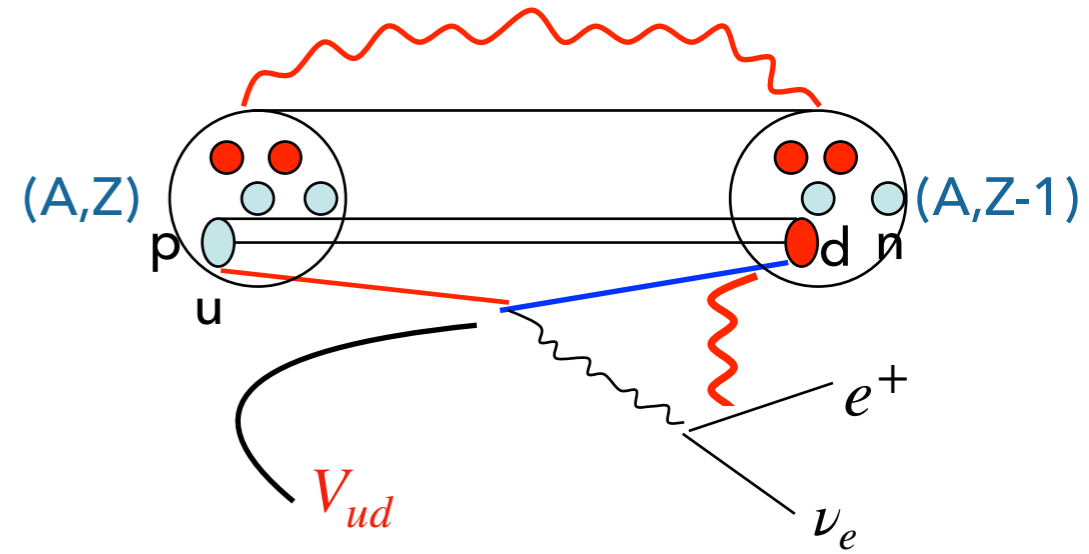
¿"Anomalía de Cabibbo" o triunfo del SM a nivel cuántico?

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0007$$



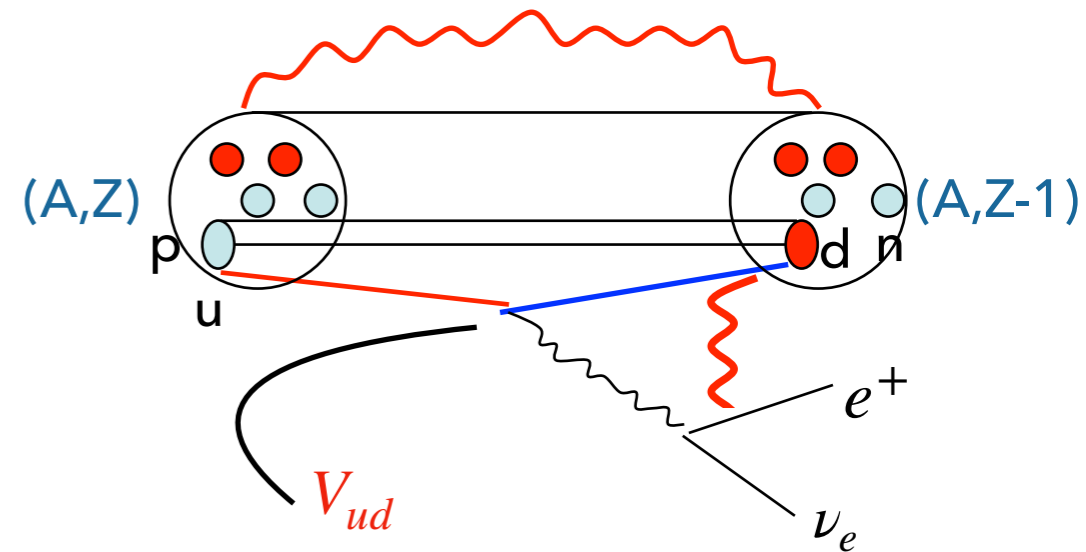
¿"Anomalía de Cabibbo" o triunfo del SM a nivel cuántico?

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0007$$



¿"Anomalía de Cabibbo" o triunfo del SM a nivel cuántico?

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0007$$



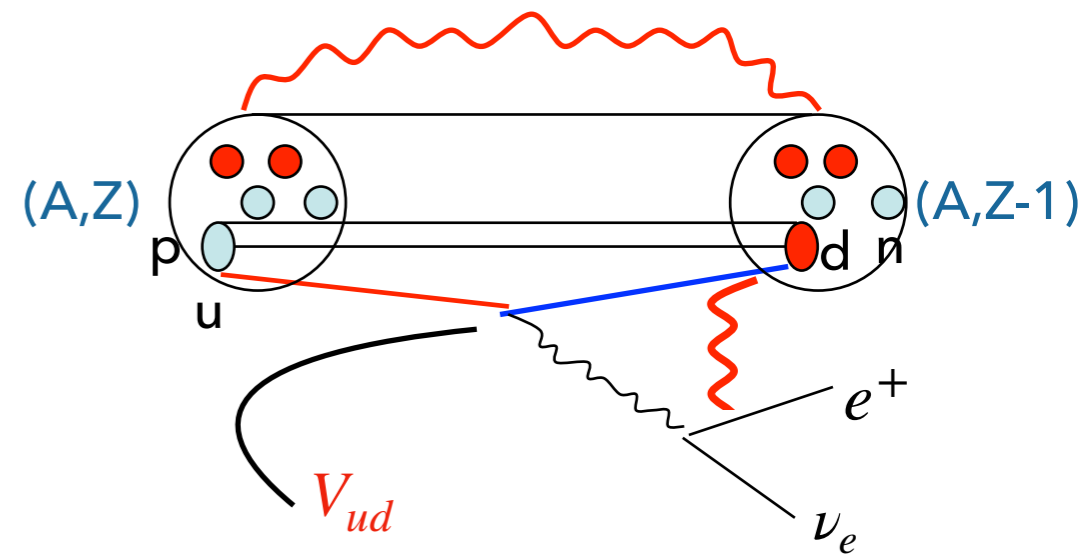
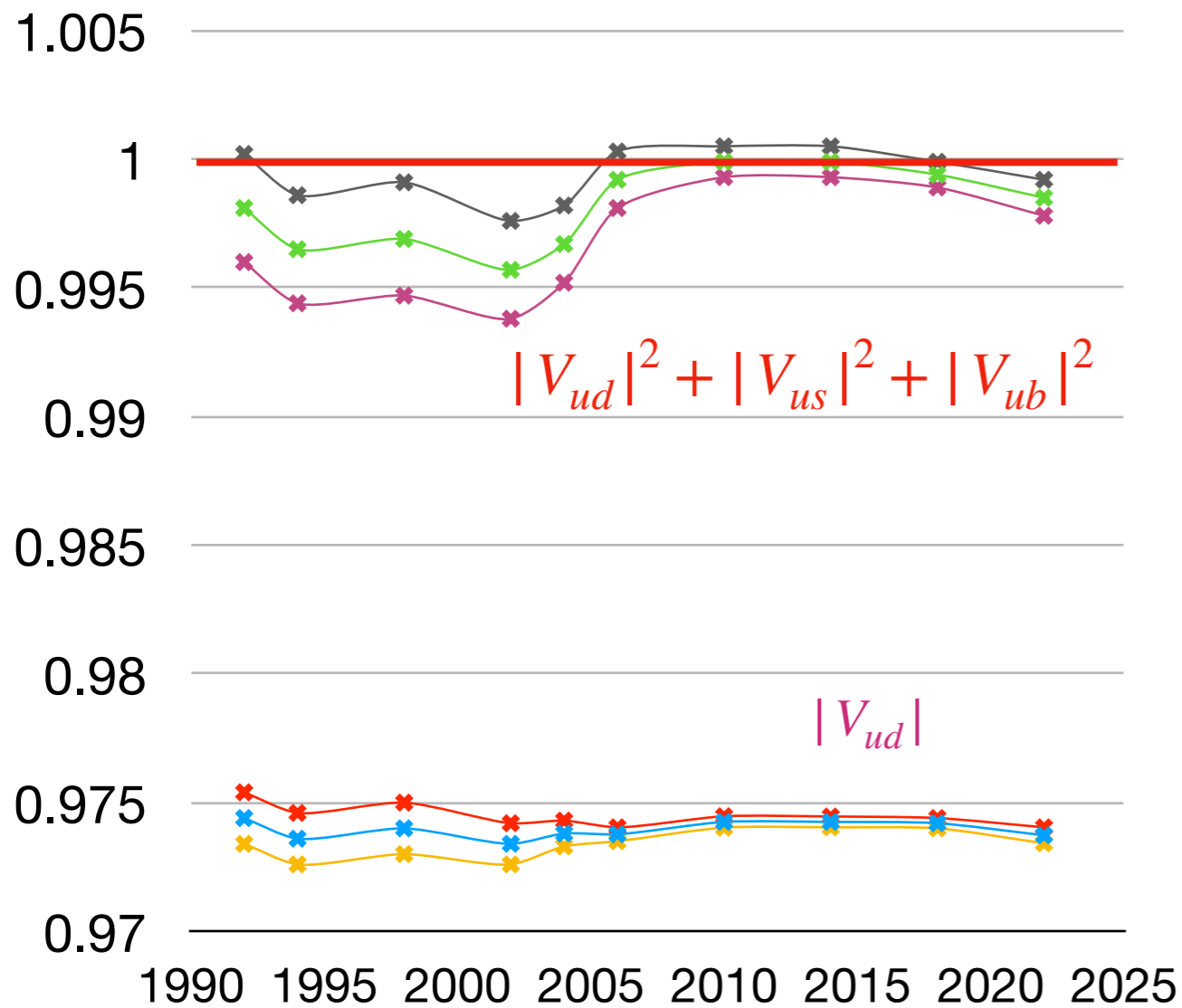
$$|V_{ud}|^2 = \frac{2912.95(54) \text{ seg}}{ft(1 + \text{corr})}$$

- ✱ Corr. radiativas: α^3
- ✱ Estructura nuclear

$$|V_{ud}| = 0.97373 \pm 0.00031$$

¿"Anomalía de Cabibbo" o triunfo del SM a nivel cuántico?

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0007$$



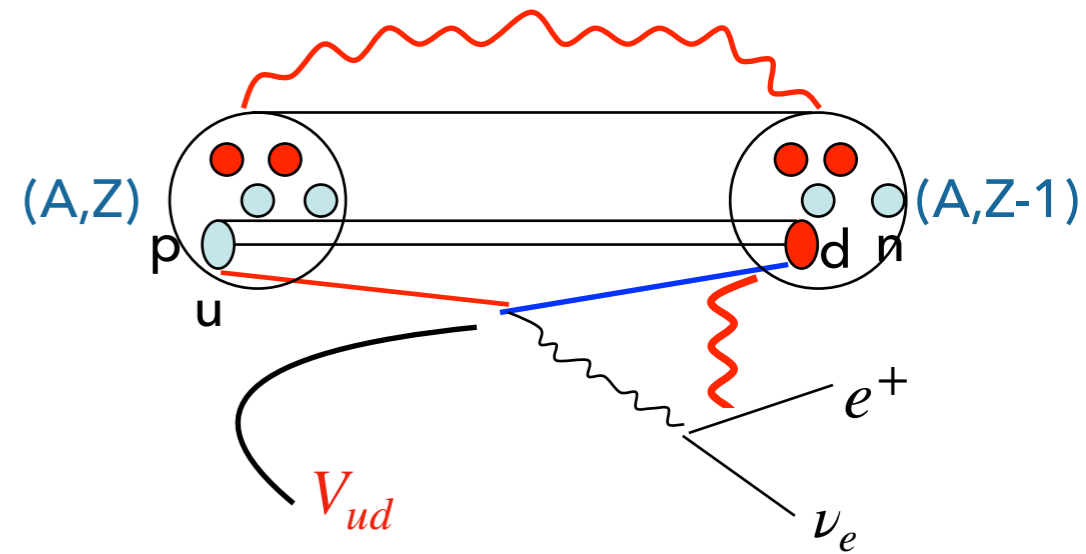
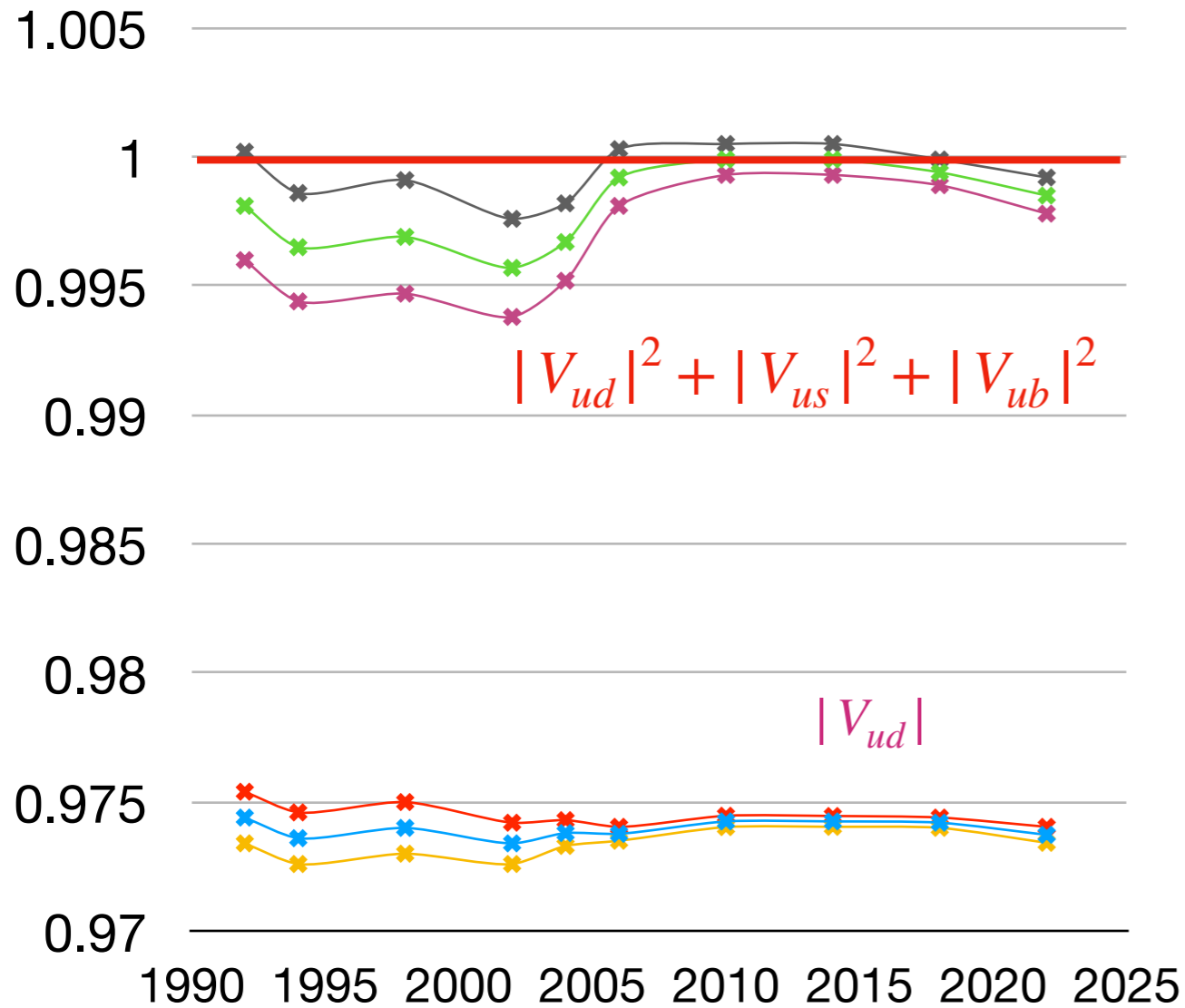
$$|V_{ud}|^2 = \frac{2912.95(54) \text{ seg}}{ft(1 + \text{corr})}$$

- ✱ Corr. radiativas: α^3
- ✱ Estructura nuclear

$$|V_{ud}| = 0.97373 \pm 0.00031$$

¿"Anomalía de Cabibbo" o triunfo del SM a nivel cuántico?

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0007$$



$$|V_{ud}|^2 = \frac{2912.95(54) \text{ seg}}{ft(1 + \text{corr})}$$

- ✱ Corr. radiativas: α^3
- ✱ Estructura nuclear

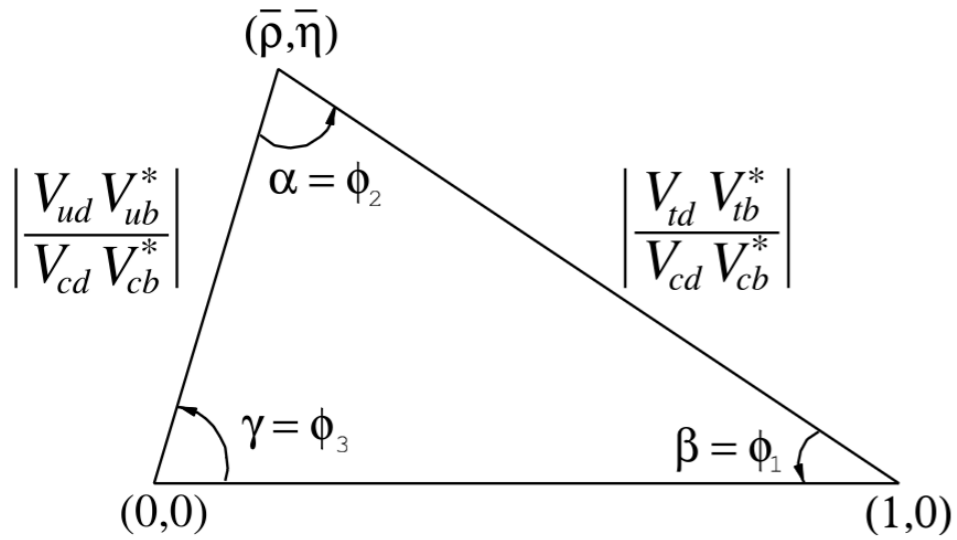
En el futuro : $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$, $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$

$$|V_{ud}| = 0.97373 \pm 0.00031$$

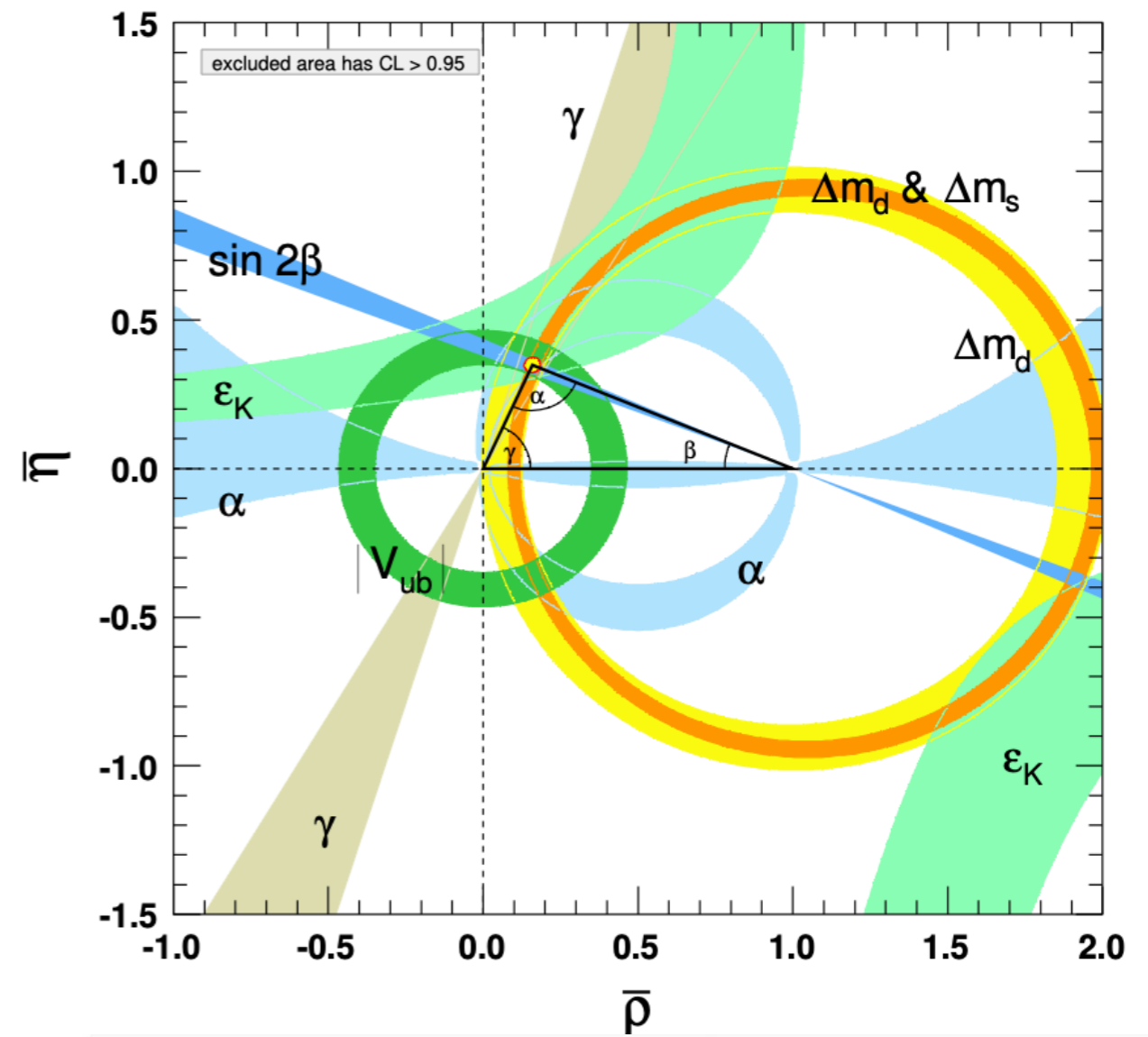
Unitaridad matriz CKM



$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$



$$(A, \lambda, \bar{\rho}, \bar{\eta})$$

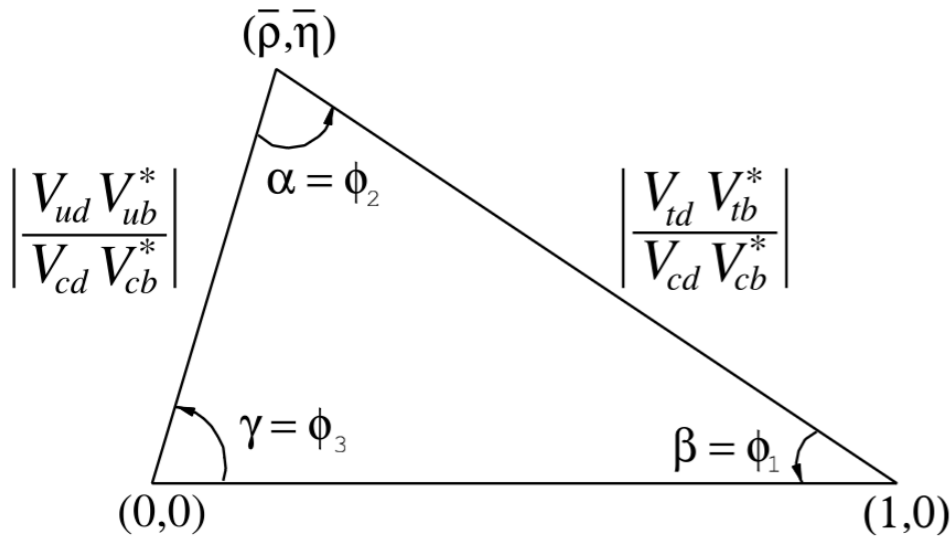


$$\bar{\eta} = 0.358 \pm 0.010, \quad A = (3.05 \pm 0.14)$$

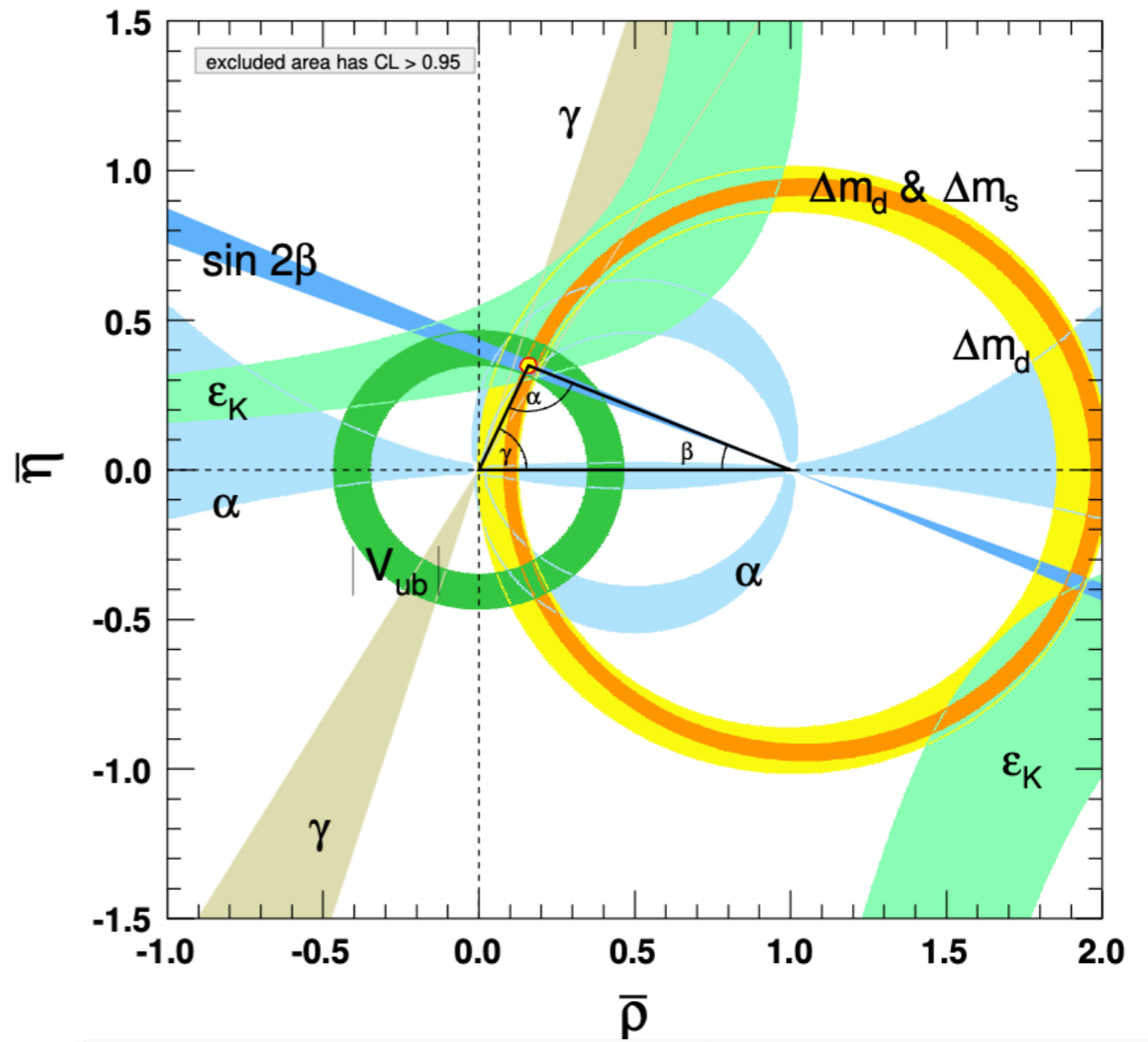
Unitaridad matriz CKM



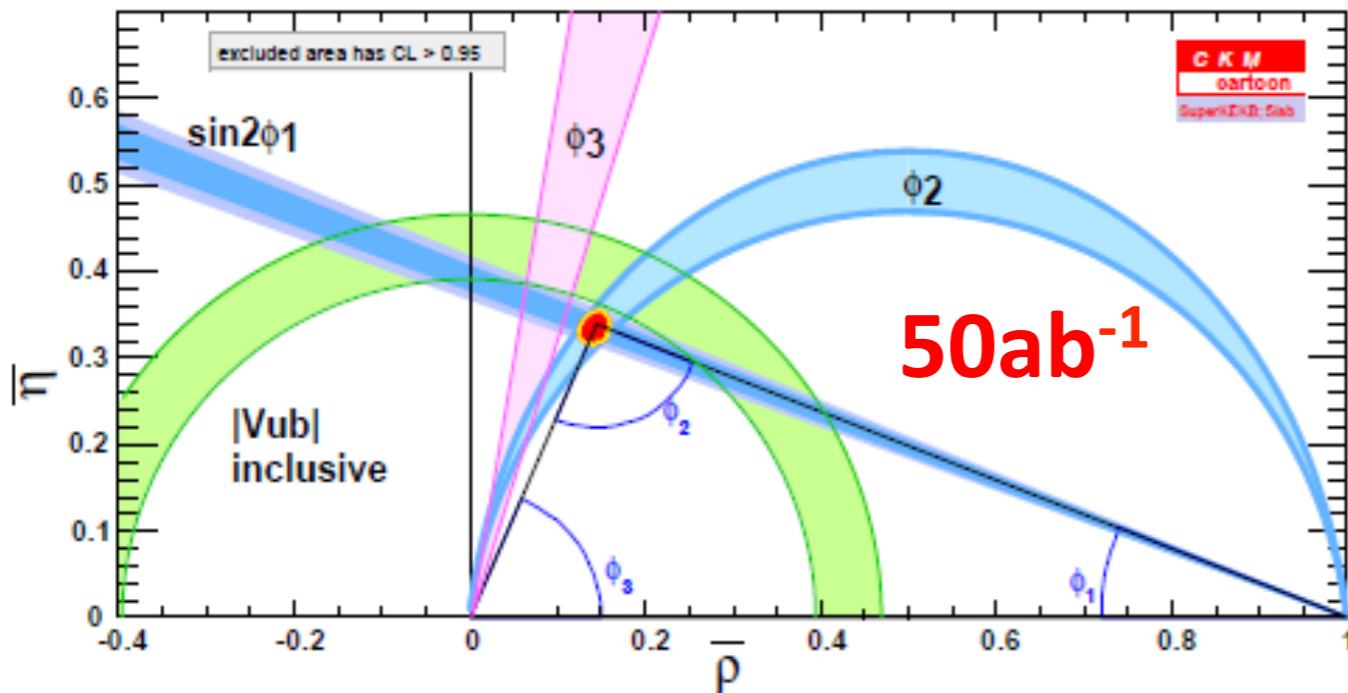
$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$



$$(A, \lambda, \bar{\rho}, \bar{\eta})$$



$$\bar{\eta} = 0.358 \pm 0.010, \quad A = (3.05 \pm 0.14)$$



Belle II, LHCb, ...futuro

Asimetría Bariónica del Universo (BAU)

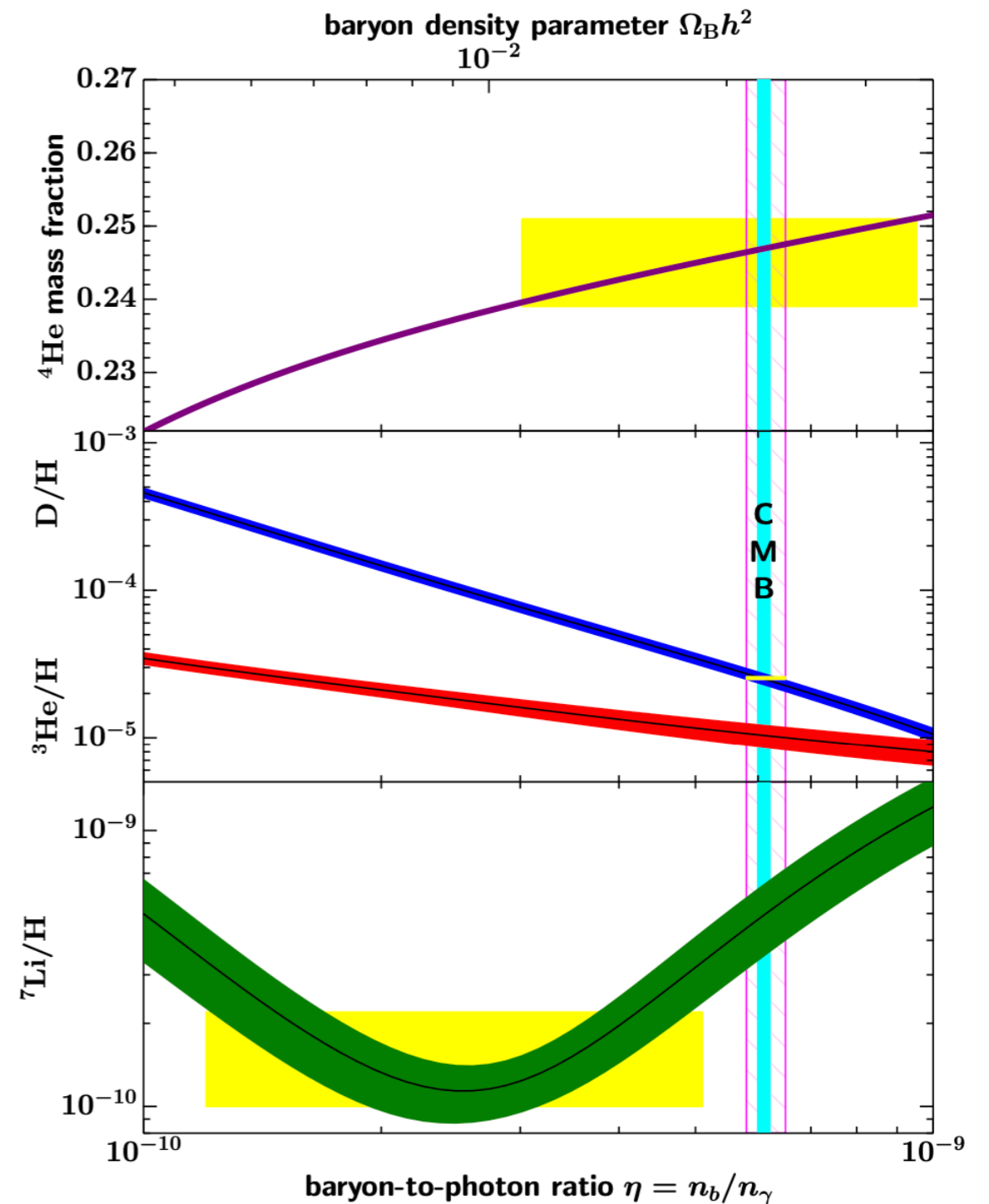
$$\eta = \frac{n(B) - n(\bar{B})}{n(\gamma)}$$

Observado nucleosíntesis+CMB:

$$\eta = (6.040 \pm 0.118) \times 10^{-10}$$

Estimado:

$$\eta_{SM} \sim \frac{J}{T^{12}} \sim 10^{-20}$$



$$J = (m_t^2 - m_c^2)(m_t^2 - m_u^2)(m_c^2 - m_u^2)(m_b^2 - m_s^2)(m_b^2 - m_d^2)(m_s^2 - m_d^2)\mathcal{A}$$

$$= 3.7 \times 10^4 \text{ GeV}^{12}$$

\mathcal{A} = área del triángulo unitario CKM, $T = 100 \text{ GeV}$ **G. W. Hou, 2013**

Asimetría Bariónica del Universo (BAU)

$$\eta = \frac{n(B) - n(\bar{B})}{n(\gamma)}$$

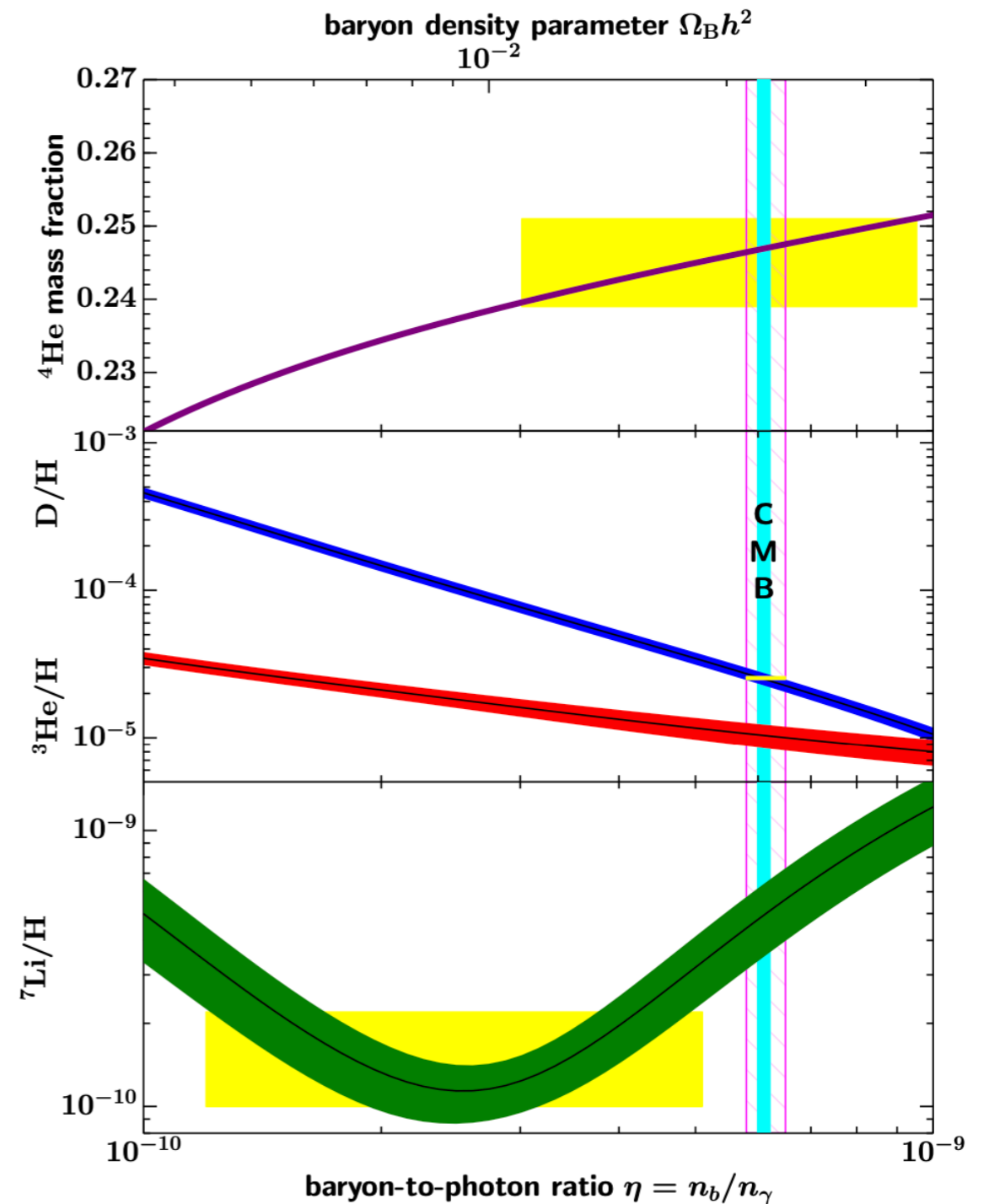
Observado nucleosíntesis+CMB:

$$\eta = (6.040 \pm 0.118) \times 10^{-10}$$

Estimado:

$$\eta_{SM} \sim \frac{J}{T^{12}} \sim 10^{-20}$$

¿?

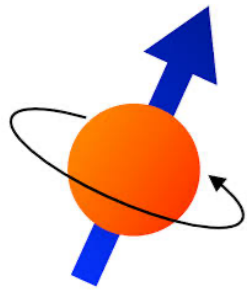


$$J = (m_t^2 - m_c^2)(m_t^2 - m_u^2)(m_c^2 - m_u^2)(m_b^2 - m_s^2)(m_b^2 - m_d^2)(m_s^2 - m_d^2)\mathcal{A}$$

$$= 3.7 \times 10^4 \text{ GeV}^{12}$$

\mathcal{A} = área del triángulo unitario CKM, $T = 100 \text{ GeV}$ **G. W. Hou, 2013**

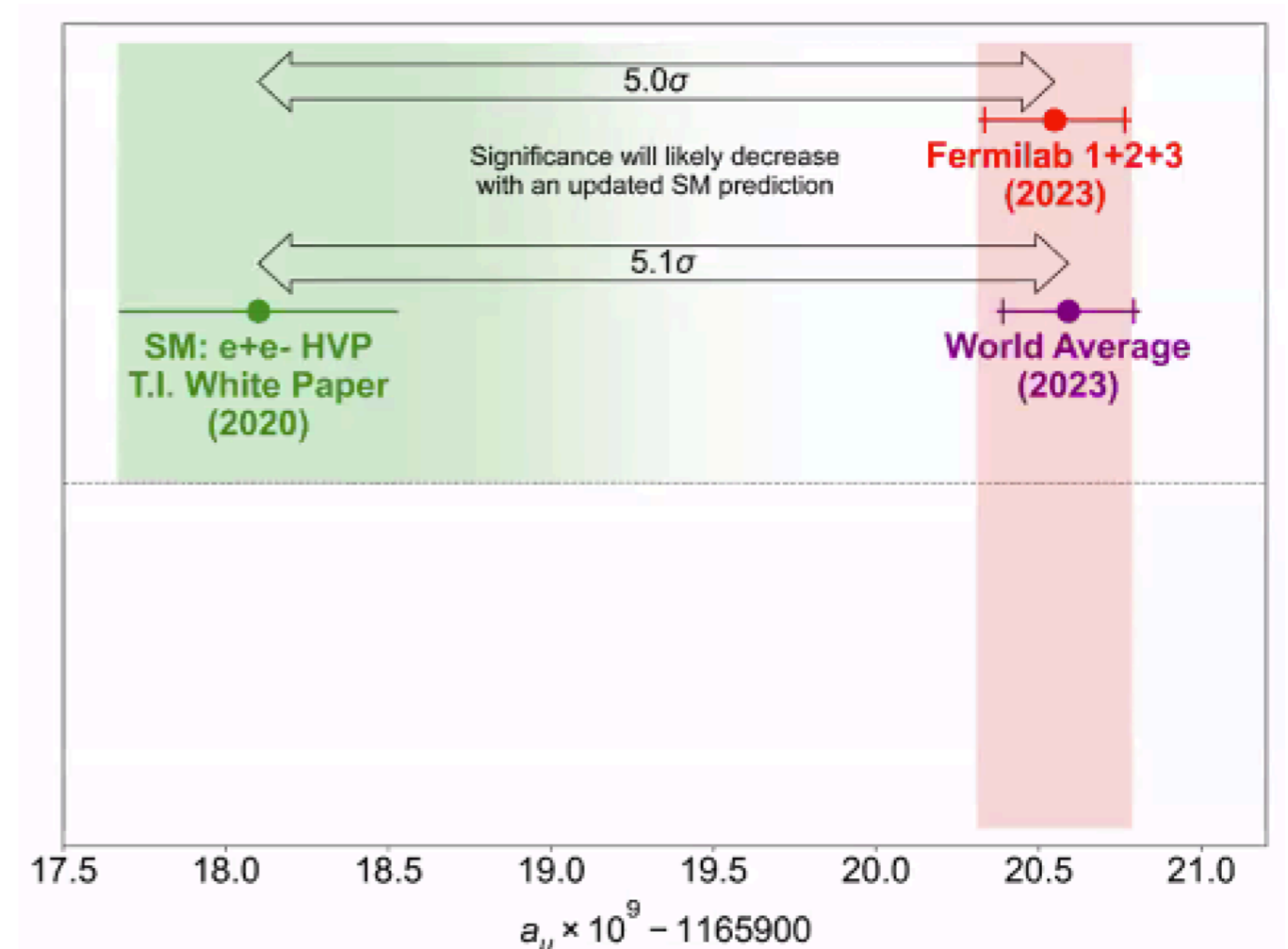
Momento magnético anómalo del muón a_μ



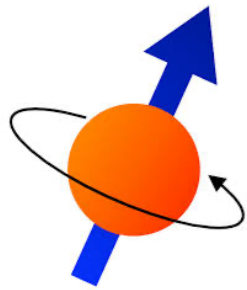
Dirac: $g_\mu = 2, a_\mu = 0$

$$\vec{\mu} = \frac{eg_\mu}{2m} \vec{S} = \frac{e(1+a_\mu)}{m} \vec{S}$$

$$a_\mu^{\text{SM}} = a_\mu^{\text{em}} + a_\mu^{\text{EW}} + a_\mu^{\text{HVP}} + a_\mu^{\text{HLbL}}$$



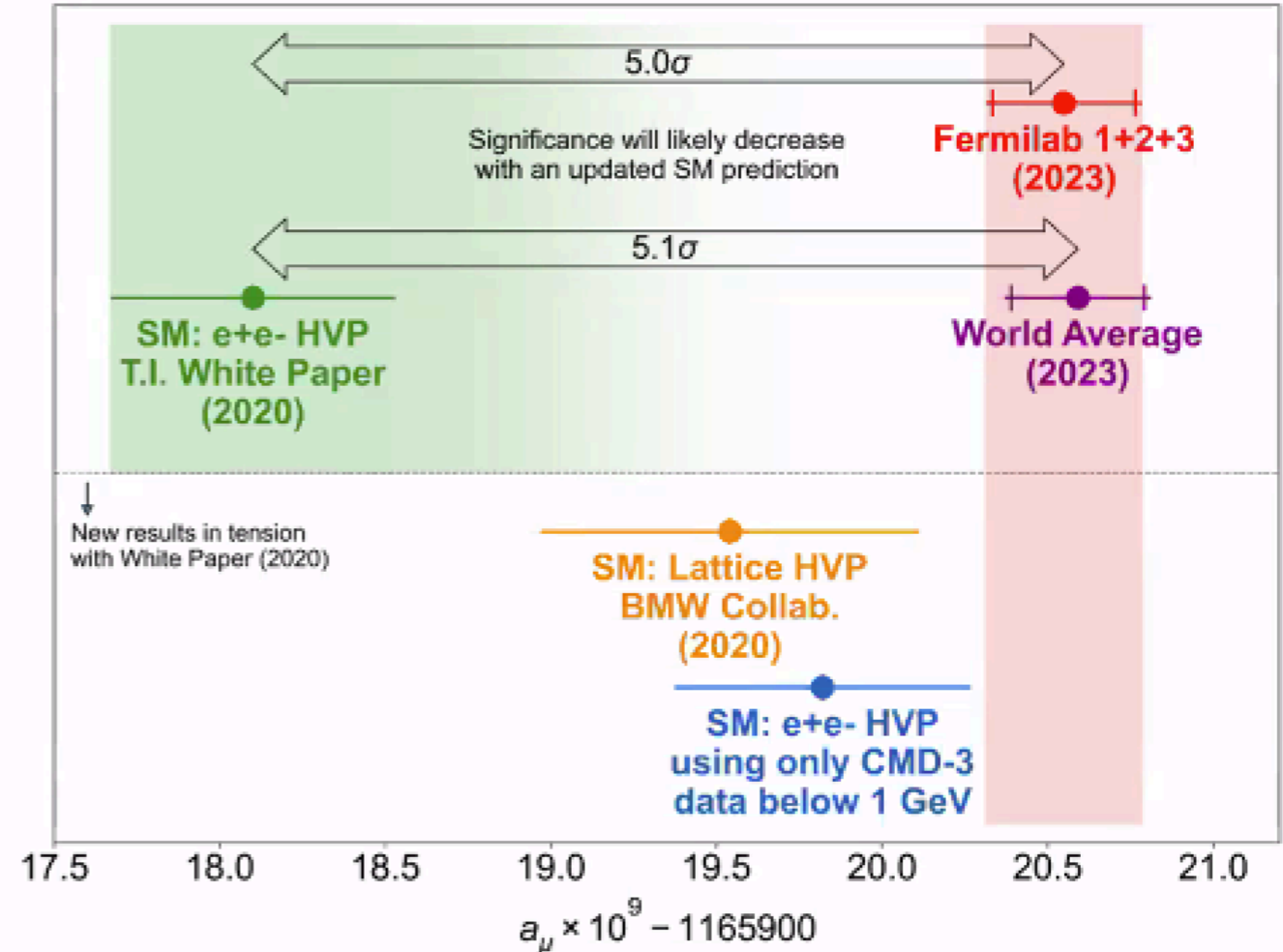
Momento magnético anómalo del muón a_μ



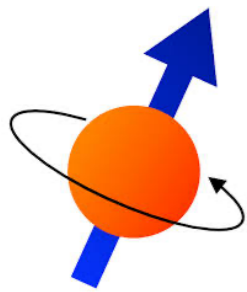
Dirac: $g_\mu = 2, a_\mu = 0$

$$\vec{\mu} = \frac{eg_\mu}{2m} \vec{S} = \frac{e(1+a_\mu)}{m} \vec{S}$$

$$a_\mu^{\text{SM}} = a_\mu^{\text{em}} + a_\mu^{\text{EW}} + a_\mu^{\text{HVP}} + a_\mu^{\text{HLbL}}$$



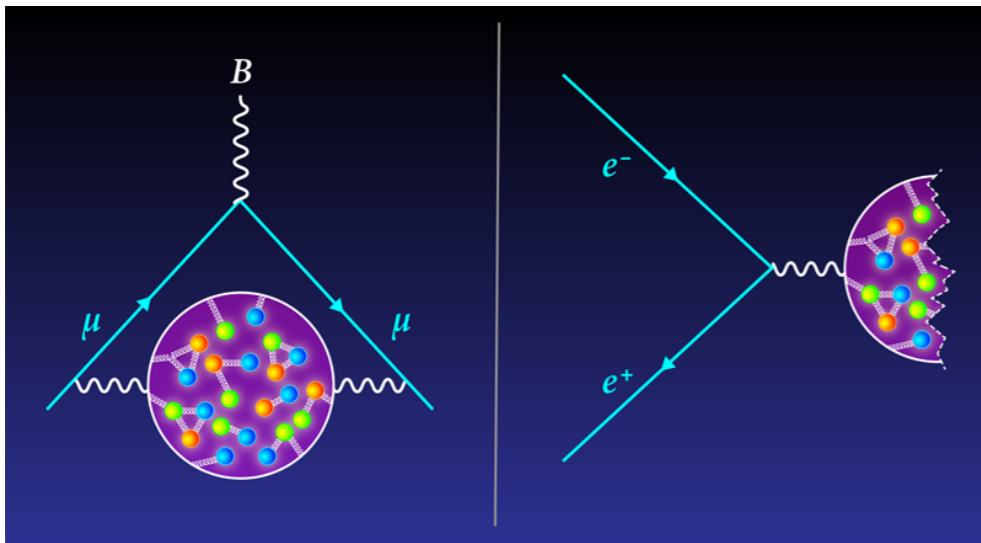
Momento magnético anómalo del muón a_μ



Dirac: $g_\mu = 2, a_\mu = 0$

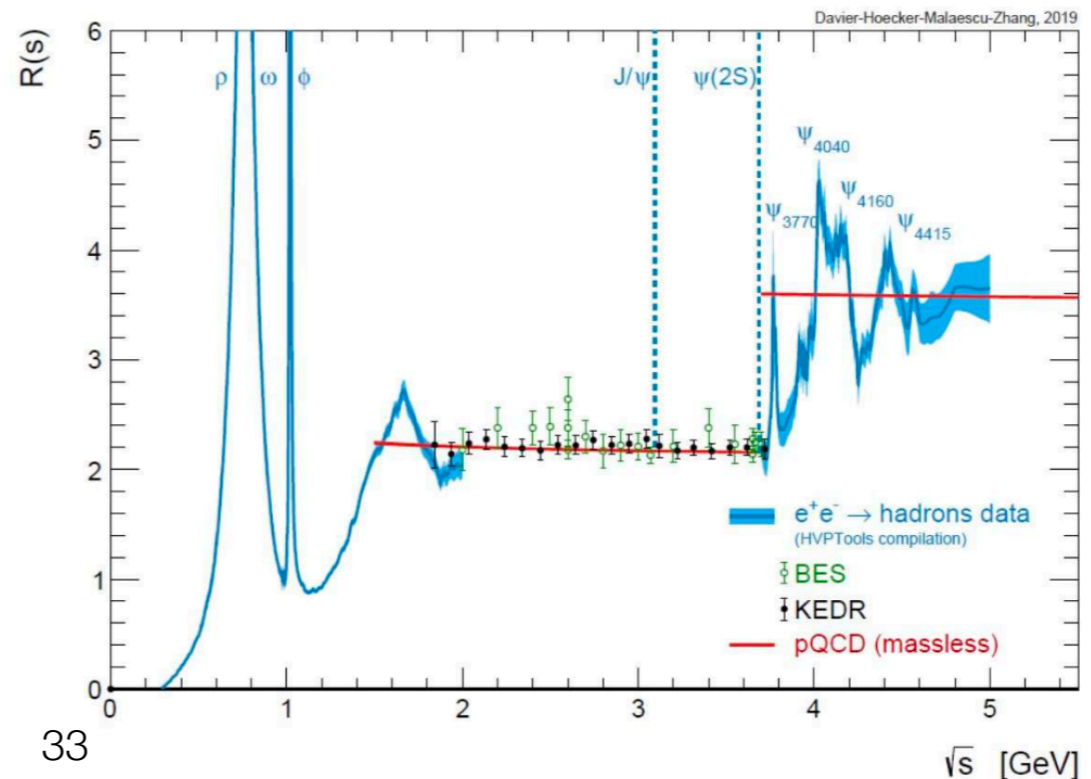
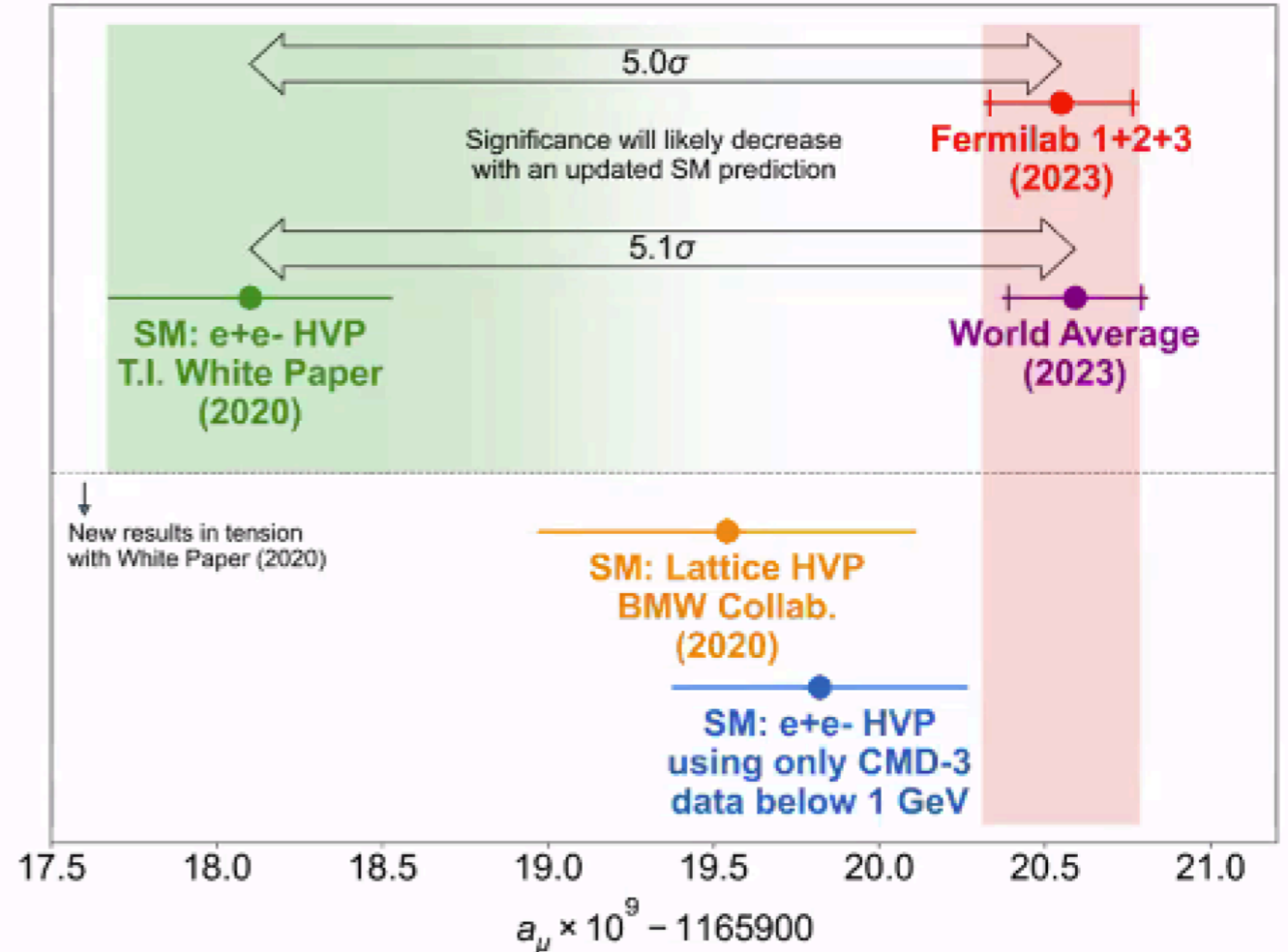
$$\vec{\mu} = \frac{e g_\mu}{2m} \vec{S} = \frac{e(1+a_\mu)}{m} \vec{S}$$

$$a_\mu^{\text{SM}} = a_\mu^{\text{em}} + a_\mu^{\text{EW}} + a_\mu^{\text{HVP}} + a_\mu^{\text{HLbL}}$$



$$a_\mu^{\text{HVP}} = \left(\frac{\alpha m_\mu}{3\pi} \right)^2 \int_{s_{\text{thr}}}^{\infty} ds \frac{\hat{K}(s)}{s^2} R_{\text{had}}(s),$$

$$R_{\text{had}}(s) = \frac{3s}{4\pi\alpha^2} \sigma[e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}(+\gamma)]$$



Measurement of the Pion Form Factor with CMD-3 Detector and Its Implication to the Hadronic Contribution to Muon ($g - 2$)

F. V. Ignatov^{1,2,*} R. R. Akhmetshin,^{1,2} A. N. Amirkhanov,^{1,2} A. V. Anisenkov,^{1,2} V. M. Aulchenko,^{1,2} N. S. Bashtovoy,¹ D. E. Berkaev,^{1,2} A. E. Bondar,^{1,2} A. V. Bragin,¹ S. I. Eidelman,^{1,2} D. A. Epifanov,^{1,2} L. B. Epshteyn,^{1,2,3} A. L. Erofeev,^{1,2} G. V. Fedotov,^{1,2} A. O. Gorkovenko,^{1,3} F. J. Grancagnolo,⁴ A. A. Grebenuk,^{1,2} S. S. Griбанov,^{1,2} D. N. Grigoriev,^{1,2,3} V. L. Ivanov,^{1,2} S. V. Karpov,¹ A. S. Kasaev,¹ V. F. Kazanin,^{1,2} B. I. Khazin,¹ A. N. Kirpotin,¹ I. A. Koop,^{1,2} A. A. Korobov,^{1,2} A. N. Kozyrev,^{1,2,3} E. A. Kozyrev,^{1,2} P. P. Krovovny,^{1,2} A. E. Kuzmenko,¹ A. S. Kuzmin,^{1,2} I. B. Logashenko,^{1,2} P. A. Lukin,^{1,2} A. P. Lysenko,¹ K. Yu. Mikhailov,^{1,2} I. V. Obraztsov,^{1,2} V. S. Okhapkin,¹ A. V. Otboev,¹ E. A. Perevedentsev,^{1,2} Yu. N. Pestov,¹ A. S. Popov,^{1,2} G. P. Razuvaev,^{1,2} Yu. A. Rogovsky,^{1,2} A. A. Ruban,¹ N. M. Ryskulov,¹ A. E. Ryzhenenkov,^{1,2} A. V. Semenov,^{1,2} A. I. Senchenko,¹ P. Yu. Shatunov,¹ Yu. M. Shatunov,¹ V. E. Shebalin,^{1,2} D. N. Shemyakin,^{1,2} B. A. Shwartz,^{1,2} D. B. Shwartz,^{1,2} A. L. Sibidanov,⁵ E. P. Solodov,^{1,2} A. A. Talyshev,^{1,2} M. V. Timoshenko,¹ V. M. Titov,¹ S. S. Tolmachev,^{1,2} A. I. Vorobiov,¹ Yu. V. Yudin,^{1,2} I. M. Zemlyansky,¹ D. S. Zhadan,¹ Yu. M. Zharinov,¹ and A. S. Zubakin¹

(CMD-3 Collaboration)

¹*Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS, Novosibirsk 630090, Russia*

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk 630090, Russia*

³*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk 630092, Russia*

⁴*Instituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Lecce, Lecce, Italy*

⁵*University of Victoria, Victoria, BC V8W 3P6, Canada*

 (Received 26 September 2023; revised 6 March 2024; accepted 2 May 2024; published 4 June 2024)

$$a_{\mu}(\text{exp}) - a_{\mu}^{\text{SM}}(\text{CMD-3 } 2\pi) = 49(55) \times 10^{-11}.$$

Desafíos y problemas del SM



¿Qué le falta al Modelo Estándar?

- **!Los neutrinos son masivos!**
- **!Existe la materia oscura!**
- **¿Cual es el origen de la asimetría de materia-antimateria?**

!Los neutrinos tienen masa! \implies

- ★ ¿Son su propia antipartícula? (Dirac ó Majorana)
- ★ ¿Violación de *CP* en el sector leptónico? \rightarrow BAU
- ★ ¿Siguen el mismo patrón de masas generaciones?
- ★ ¿Como obtienen su masa (Higgs u otro?)

¿Qué le falta al Modelo Estándar?

- **!Los neutrinos son masivos!**
- **!Existe la materia oscura!**
- **¿Cual es el origen de la asimetría de materia-antimateria?**

!Los neutrinos tienen masa! \implies

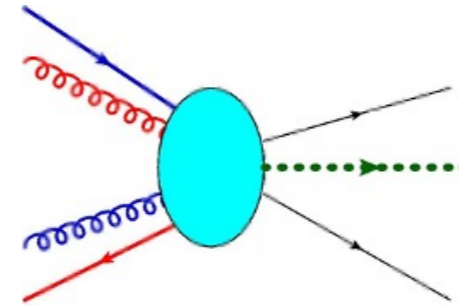
- ★ ¿Son su propia antipartícula? (Dirac ó Majorana)
- ★ ¿Violación de CP en el sector leptónico? \rightarrow BAU
- ★ ¿Siguen el mismo patrón de masas generaciones?
- ★ ¿Como obtienen su masa (Higgs u otro?)

Preguntas:

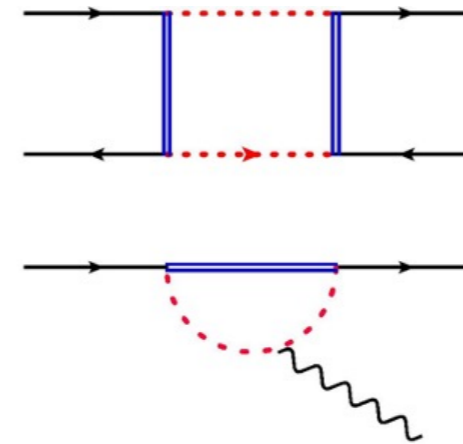
- * ¿Por qué el quark top es un billón de veces mas pesado que el neutrino?
- * ¿Qué explica la diversidad de sabores de las partículas?
- * ¿Que estabiliza a la masa del Higgs?
- * ¿Qué explica la diferencia entre las constantes de acoplamiento?
- * ¿Qué relación existe entre las masas, mezclas y acoplamientos de las partículas?

¿Como descubrir nuevas partículas o interacciones?

Frontera de la Alta Energía,
producción directa (LHC, Tevatron,...)



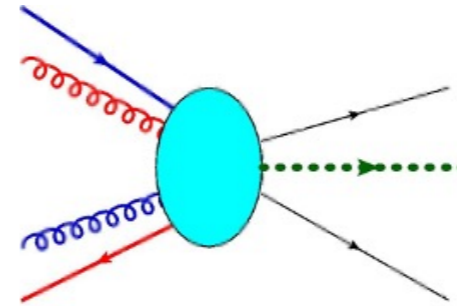
Frontera de la Alta Precisión, **producción indirecta** (Belle II, g-2, LHCb...)



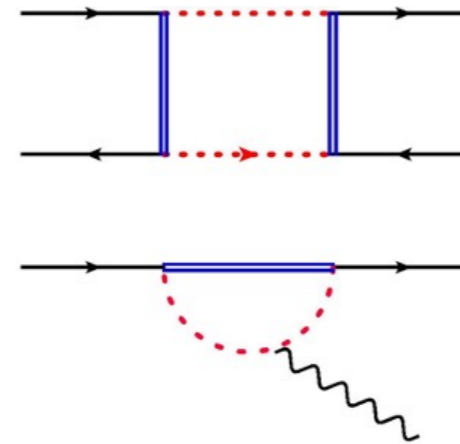
¿Como descubrir nuevas partículas o interacciones?

*

Frontera de la Alta Energía,
producción directa (LHC, Tevatron,...)



Frontera de la Alta Precisión, **producción indirecta** (Belle II, g-2, LHCb...)



-There is nothing new to be discovered in physics. All that remains is more and more precise measurements... (William Thompson, 1900) 😞

-The whole history of physics proves that a new discovery is quite likely lurking in the next decimal place...(F. K. Richtmeyer, 1931). 😊

Tomado de **S. L. Glashow, arXiv:1305.5422**

Teoría y experimentos de los próximos 20 años



- ◆ Esclarecer el problema de las anomalías: NF ó fluctuaciones
- ◆ Esclarecer la naturaleza de ν 's, determinar su espectro, si $\delta_{CP} \neq 0$
- ◆ ¿Existen relaciones entre masas, mezclas, acoplos y cual es el origen?
- ◆ ¿Es estable el vacío del campo de Higgs, cuanto vale λ , EWPhT?
- ◆ ¿Existen nuevas partículas que expliquen el problema DM?
- ◆ ¿Qué hace que el Higgs tenga una masa tan "pequeña"?

- * Una fábrica de Higgses (e^+e^- entre 90 y 350 GeV)
- * Colisionadores de muones
- * DUNE
- * Experimentos en la Frontera de Alta Precisión (BelleII, LHCb,...)
- * Colisionador con 10 TeV pCM
- * Experimentos bajo costo para LFV, LNV, EDM....

Planeación a 10-20 años, identificación prioridades, recomendaciones



Draft Pathways to Innovation and Discovery in Particle Physics

Report of the 2023 Particle Physics Project Prioritization Panel

<https://www.usparticlephysics.org/2023-p5-report/>

[https://home.cern/sites/default/files/2020-06/
2020 Update European Strategy.pdf](https://home.cern/sites/default/files/2020-06/2020%20Update%20European%20Strategy.pdf)



European Strategy

EUROPEAN STRATEGY FOR PARTICLE PHYSICS

Planeación a 10-20 años, identificación prioridades, recomendaciones



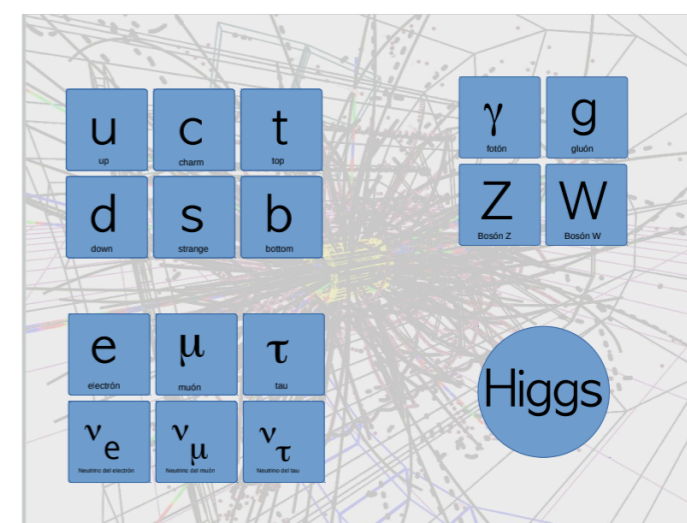
Draft
Pathways to Innovation
and Discovery
in Particle Physics

Report of the 2023 Particle Physics Project Prioritization Panel

Plan Nacional de Investigación en
Física de Altas Energías

RED FAE 2014

<https://www.usparticlephysics.org/2023-p5-report/>



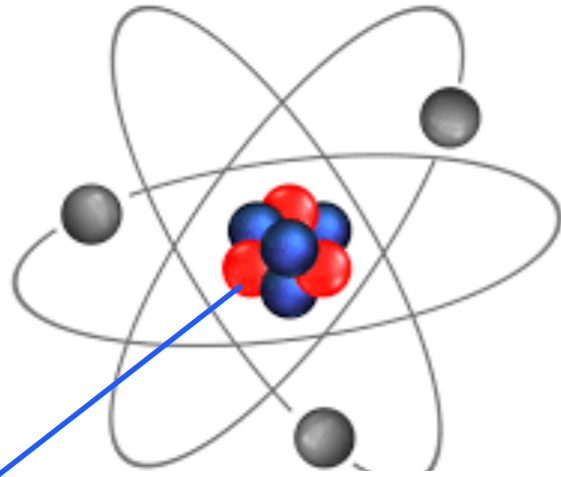
[https://home.cern/sites/default/files/2020-06/2020 Update European Strategy.pdf](https://home.cern/sites/default/files/2020-06/2020%20Update%20European%20Strategy.pdf)



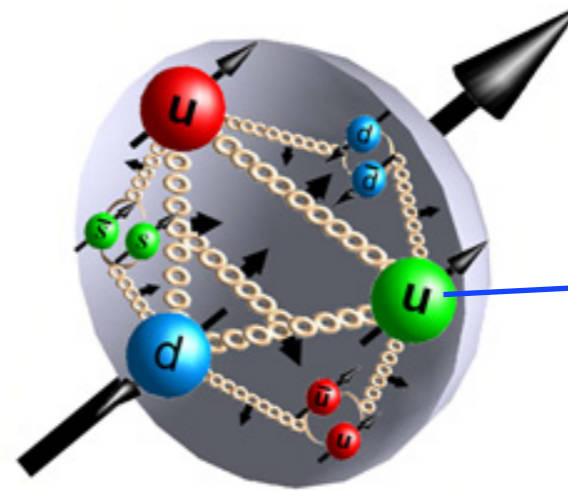
European Strategy

EUROPEAN STRATEGY FOR PARTICLE PHYSICS

¿Por qué el universo es como es y no de otra forma?

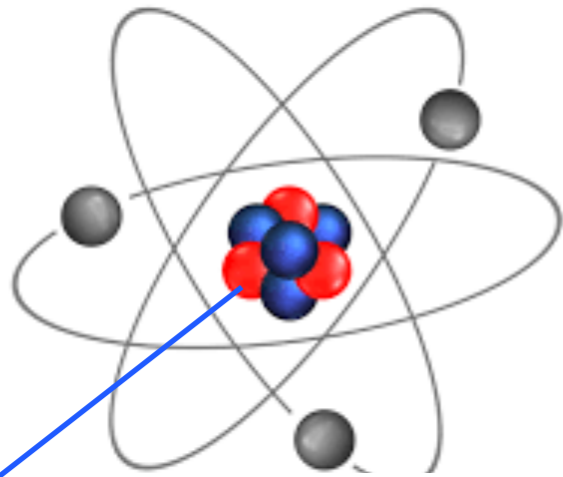


99.9% de la masa
del átomo

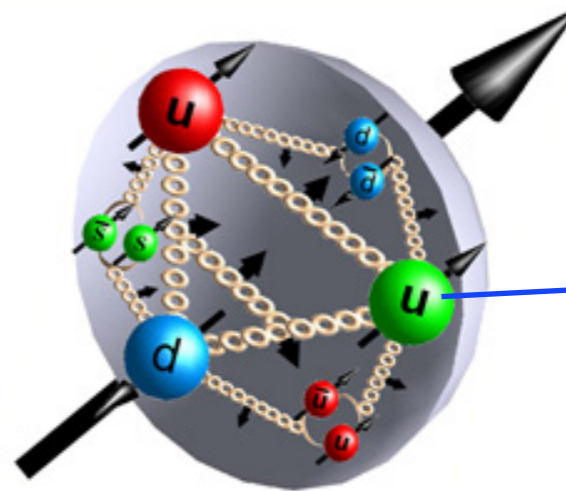


Sólo 1% viene del
mecanismo de Higgs
...¡pero muy importante!

¿Por qué el universo es como es y no de otra forma?



99.9% de la masa del átomo



Sólo 1% viene del mecanismo de Higgs
...¡pero muy importante!

$$\begin{aligned}
 m_n &= 2m_d + m_u + E_g \\
 m_p &= 2m_u + m_d + E_g + \delta M_{em}
 \end{aligned}
 \implies
 m_n - m_p = \underbrace{m_d - m_u}_{2.6 \text{ MeV}} - 1.3 \text{ MeV}$$

“The eighteen arbitrary parameters of the standard model in your everyday life”, Robert N. Cahn, Rev. Mod. Phys. (1996)

Stability of matter: $m_d > m_u \implies$ proton es estable
¿Como el Higgs le da más masa al **d** que al **u**?

Los 18 parámetros del Modelo Estándar

m_e, m_μ, m_τ
 m_u, m_c, m_t
 m_d, m_s, m_b
 $\alpha_{em}, G_F, \alpha_s$
 $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta_{CP}$
 ν, m_H or λ

13 provienen del sector de Yukawa con el RES

$$\mathcal{L}_Y = g_{ij} \bar{\psi}_i \psi_j \phi$$

$\frac{g_{ij}^V}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_i \psi_j$ $-\frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{ij} \bar{\psi}_{ui} \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \psi_{dj} W^\mu + h.c.$

Yukawa: El origen de buena parte del problema del sabor.

- ¿Cual es su origen?.
- ¿Porqué tienen esos valores observados?
- ¿Relación entre origen común de las masas y lo que distingue materia de antimateria?

¿Curiosidades o guías?

1. **Y. Koide, PhysLett B (1983)**: a preon model for quarks and leptons

$$m_e + m_\mu + m_\tau = \frac{2}{3} (\sqrt{m_e} + \sqrt{m_\mu} + \sqrt{m_\tau})^2$$

$$\implies m_\tau = 1776.97 \text{ MeV} \quad (1776.93 \pm 0.09) \text{ MeV PDG 2024}$$



¿Curiosidades o guías?

1. **Y. Koide, PhysLett B (1983)**: a preon model for quarks and leptons

$$m_e + m_\mu + m_\tau = \frac{2}{3} (\sqrt{m_e} + \sqrt{m_\mu} + \sqrt{m_\tau})^2$$

$$\implies m_\tau = 1776.97 \text{ MeV} \quad (1776.93 \pm 0.09) \text{ MeV PDG 2024}$$



2. **arXiv:1305.4208**

$$m_H^2 + m_W^2 + m_Z^2 + \sum_{f=q,l} m_f^2 = v^2 = 1/(\sqrt{2}G_F)$$

$$2\lambda + \frac{g^2}{4} + \frac{g^2 + g'^2}{4} + \sum_f \frac{y_f^2}{2} = 1$$



Mientras tanto...

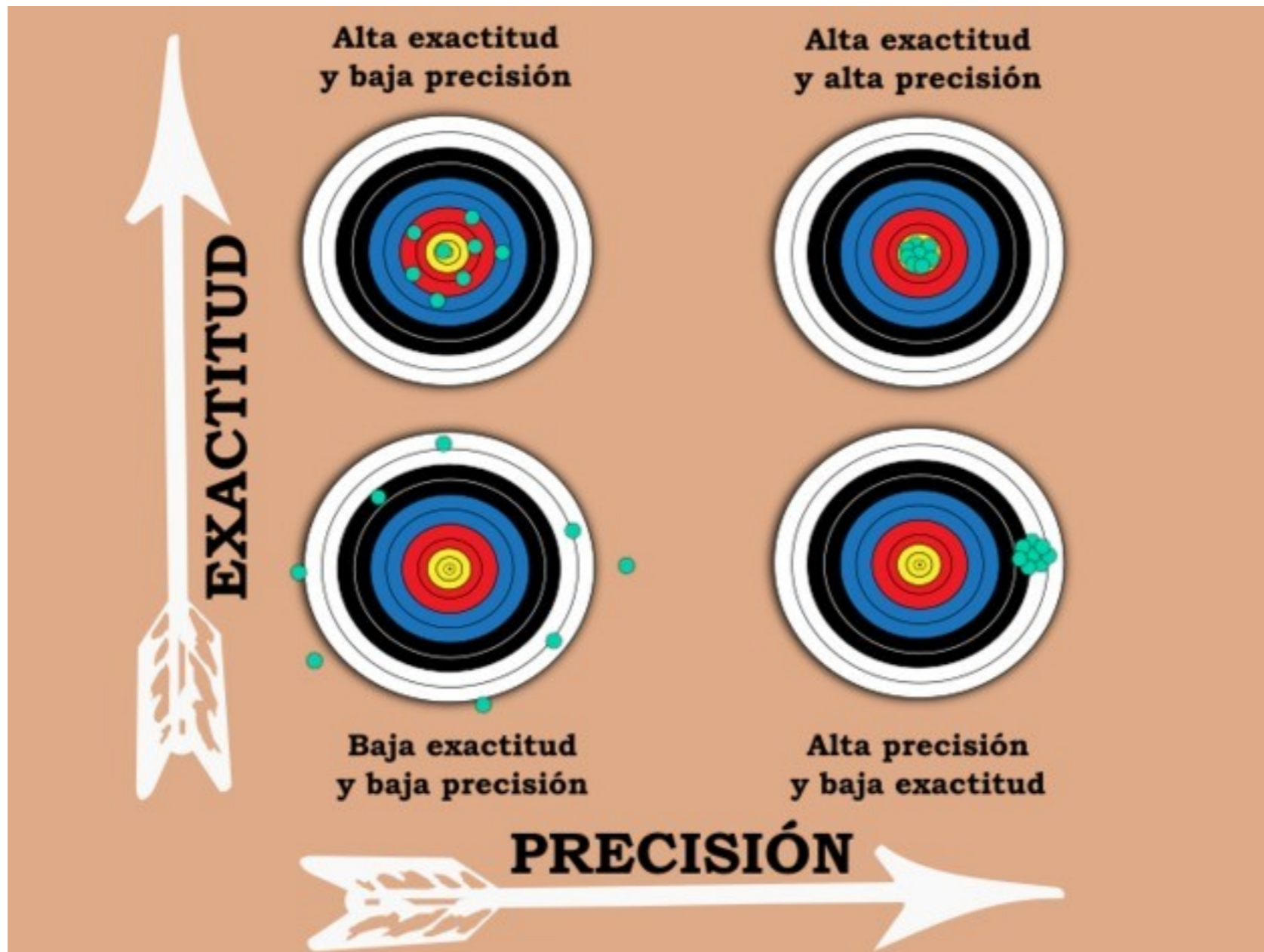
- ☑ Disfrutemos de entender la naturaleza por medio de una teoría altamente predictiva,
- ☑ Buscar poner a prueba sus predicciones alternativas,
- ☑ Estar atentos a los nuevos resultados experimentales,
- ☑ Buscar soluciones (no)convencionales a las anomalías,
- ☑ No dejar de pensar en sus preguntas fundamentales.

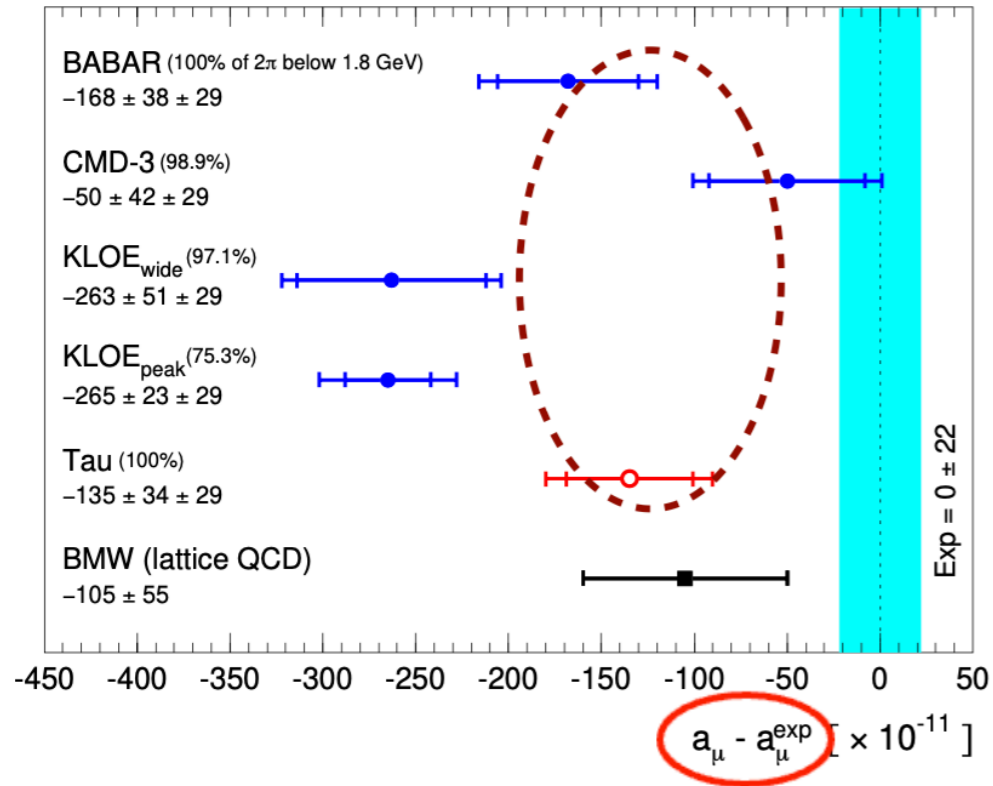


“Para hacer buena investigación, no basta con ser inteligente o estar bien preparado. Es necesario conocer sus límites y elegir temas difíciles pero que sabes que puedes resolver”

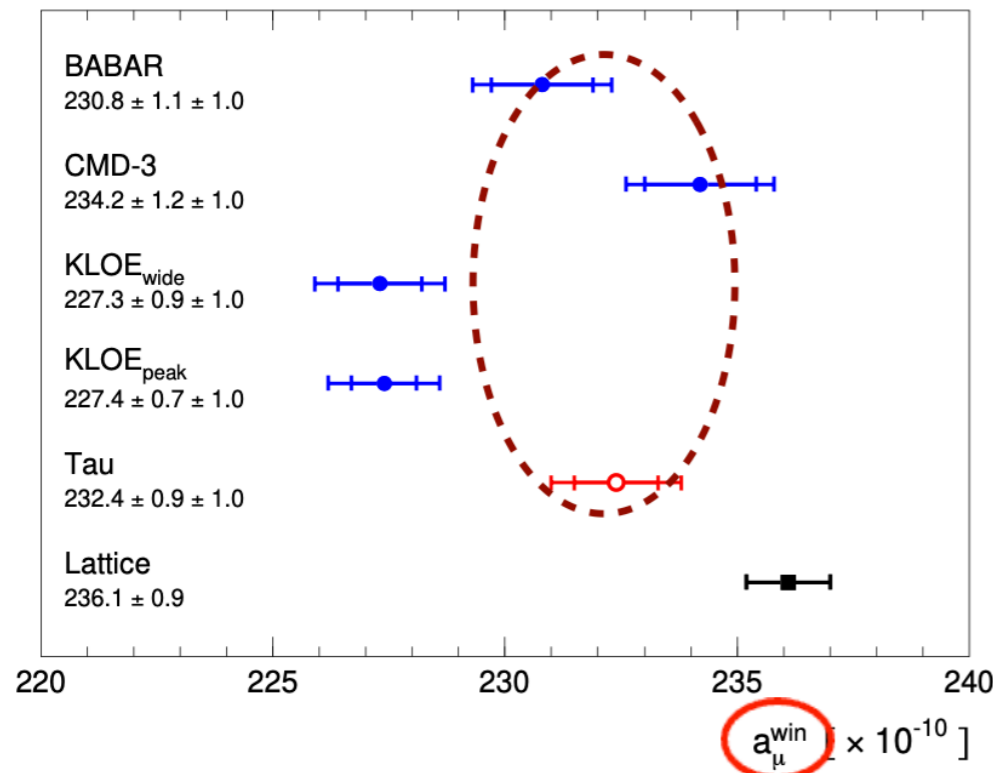
¡Un placer compartir sus observaciones!

Extras.....





- The τ -based HVP contribution close to BABAR and CMD-3
- BABAR+CMD-3+ τ compatible with BMW; 2.5σ below the measurement $\leftrightarrow 5.1\sigma$ (with KLOE but w/o CMD-3, τ)
- BABAR+CMD-3+ τ +BMW 2.8σ below
- KLOE is 4.2σ (wide) or 6.2σ (peak) below



- For a_μ^{win}
- BABAR+CMD-3+ τ are 2.9σ below lattice $\leftrightarrow 4.2\sigma$ (with KLOE but w/o CMD-3, τ , see page 18)
 - KLOE is 5.4σ (wide) or 5.8σ (peak) below lattice

Z. Zhang, TI April 2024

Una larga historia hecha corta

< **1928**: protones (p), electrones (e^-) y fotones (γ) + isótopos

1928: Dirac propone su ec. para electrones $\rightarrow \exists e^+$, $\mu_e = eg/2m_e$, $g = 2$ y QED

1930: Pauli, propone la existencia del neutrino

1932: Anderson, descubrimiento del positrón (e^+)

1932: Chadwick, descubrimiento del neutrón (n) \rightarrow isótopos

1933: Fermi, propone la teoría de interacciones beta

1935: Yukawa propone mesones mantienen unido al núcleo, fuerza nuclear

1947: Descubrimiento del pion ($m_\pi \sim 140$ MeV) + otras partículas

1940's: Schwinger..QED divergencias son renormalizables $\rightarrow g_e - 2 \neq 0, \dots$

1961: Glashow propone el modelo electrodébil SU(2)xU(1), no masas

1964: Gell-Mann modelo de quarks, Greenberg (color)

1964: Higgs, Brout, Englert... \rightarrow int débiles corta distancia

1967: Weinberg+Salam, SSB \rightarrow modelo de leptones y masas de W^\pm, Z

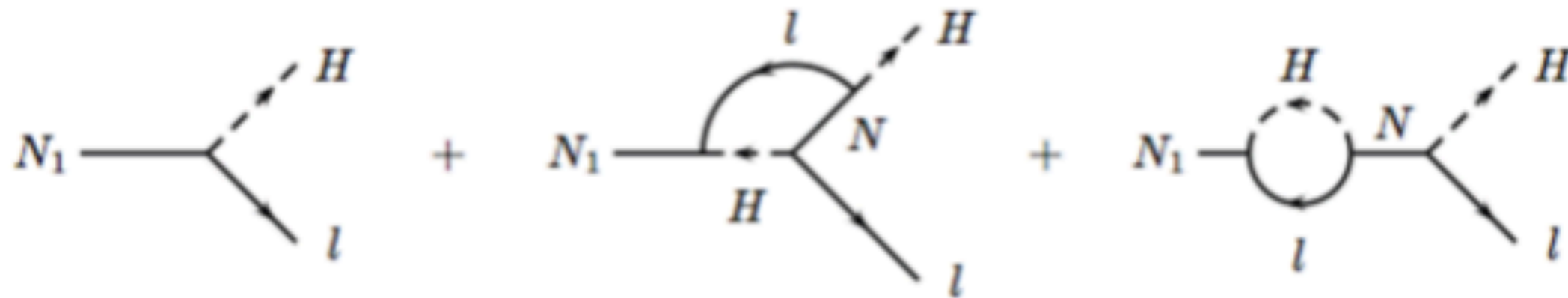
1971: t'Hooft, el modelo de GSW+SSB es renormalizable

1973: Kobayasi-Maskawa modelo de violación de CP

1973: Gell-Mann, Leutwyler, Fritzsche... QCD, Politzer, Wilczek, Gross...

Fukugita, Yanagida (1986)

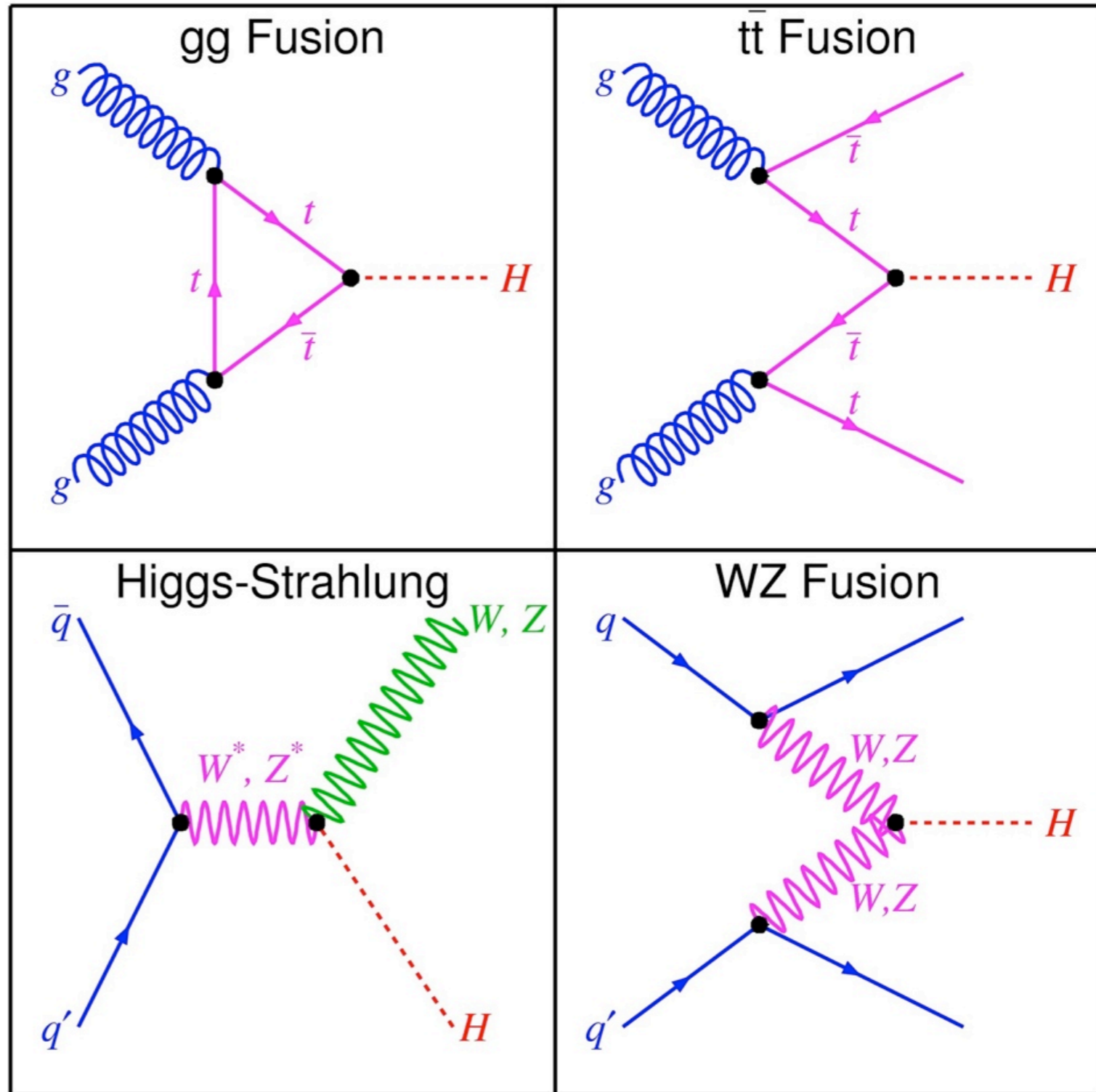
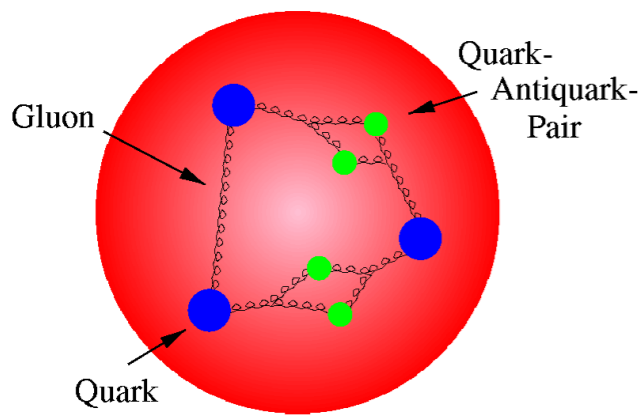
$$\mathcal{L} = \bar{\ell}_i \not{\partial} \ell_{Li} + \bar{e}_{Ri} \not{\partial} e_{Ri} + \bar{\nu}_{Ri} \not{\partial} \nu_{Ri} + f_{ij} \bar{e}_{Ri} \ell_{Lj} H^\dagger + h_{ij} \bar{\nu}_{Ri} \ell_{Lj} H - \frac{1}{2} M_i \nu_{iR} \nu_{Ri}$$

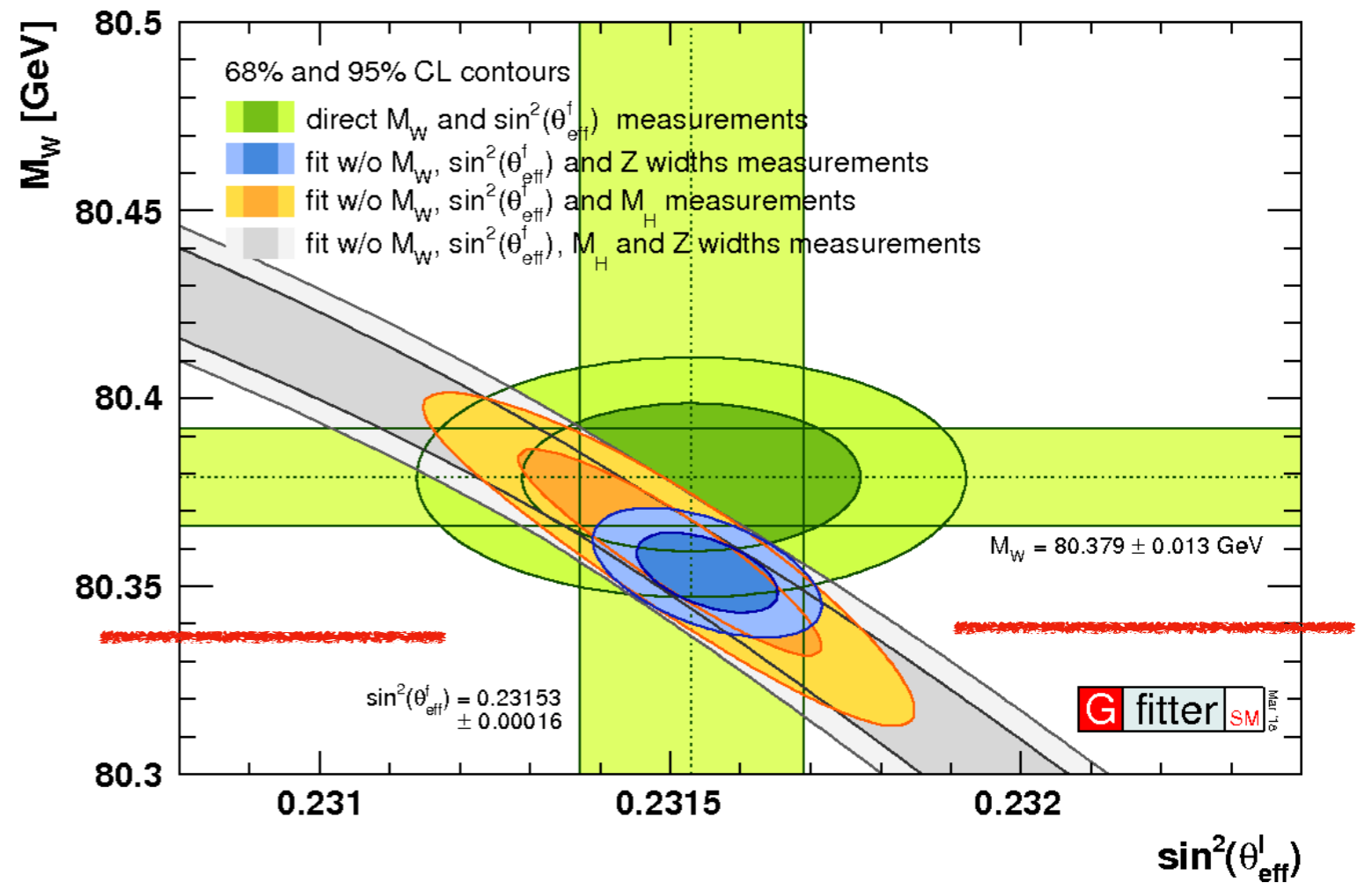
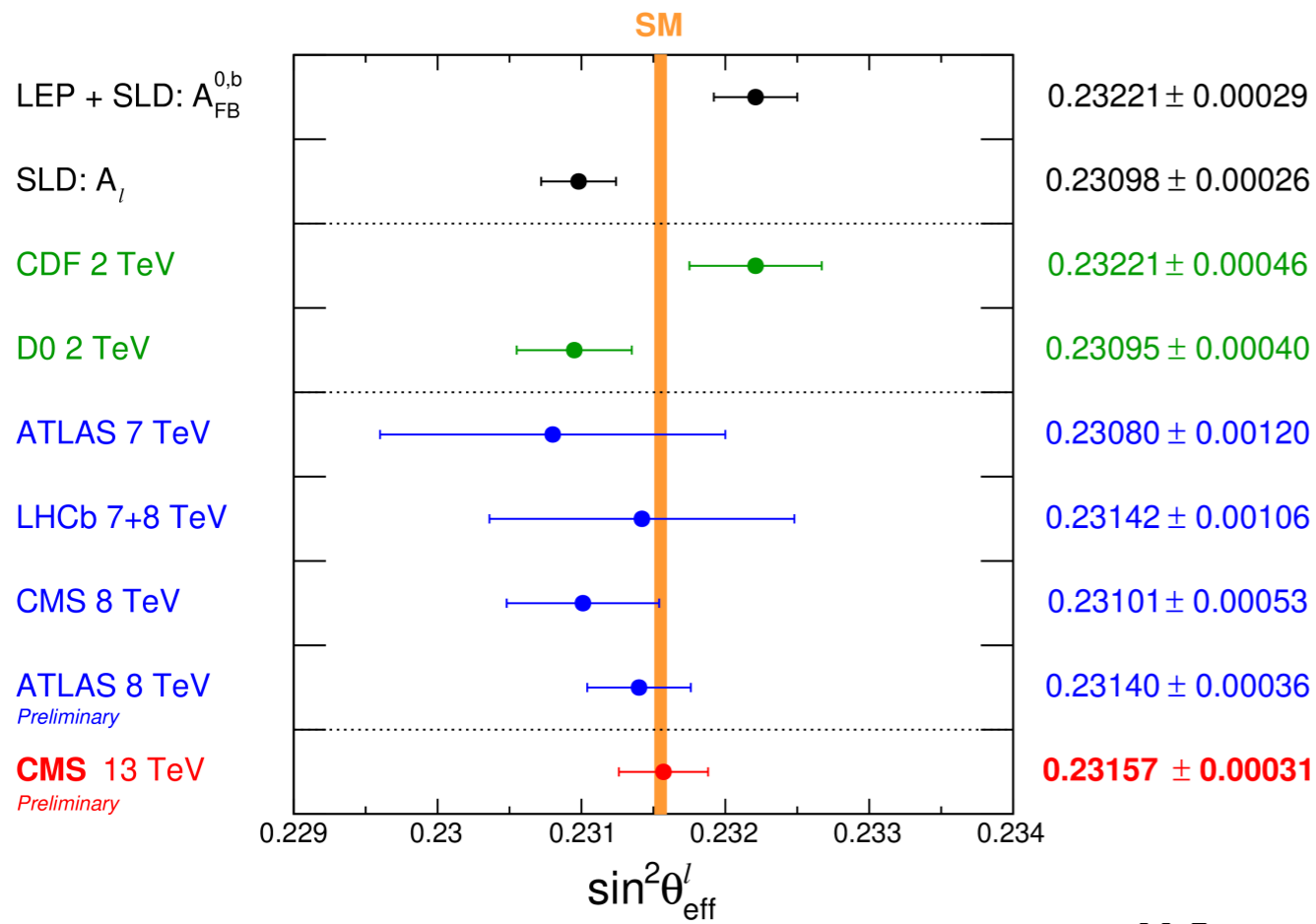


$$\epsilon_1 = \frac{\Gamma(N_1 \rightarrow H + \ell_L) - \Gamma(N_1 \rightarrow H^\dagger + \ell_L^\dagger)}{\Gamma(N_1 \rightarrow H + \ell_L) + \Gamma(N_1 \rightarrow H^\dagger + \ell_L^\dagger)} \approx -\frac{3}{16\pi} \frac{M_1}{(hh^\dagger)_{11} \nu_F^2} \text{Im}(h^* m_\nu h^\dagger) \sim 0.1 \frac{M_1}{M_3}$$

$$\mathcal{O}_{B+L} = \prod_i (q_{Li} q_{Li} q_{Li} \ell_{Li})$$

Production mechanisms of the Higgs boson at the LHC (pp)





Vacuum stability

$$\lambda(\mu) > 0$$

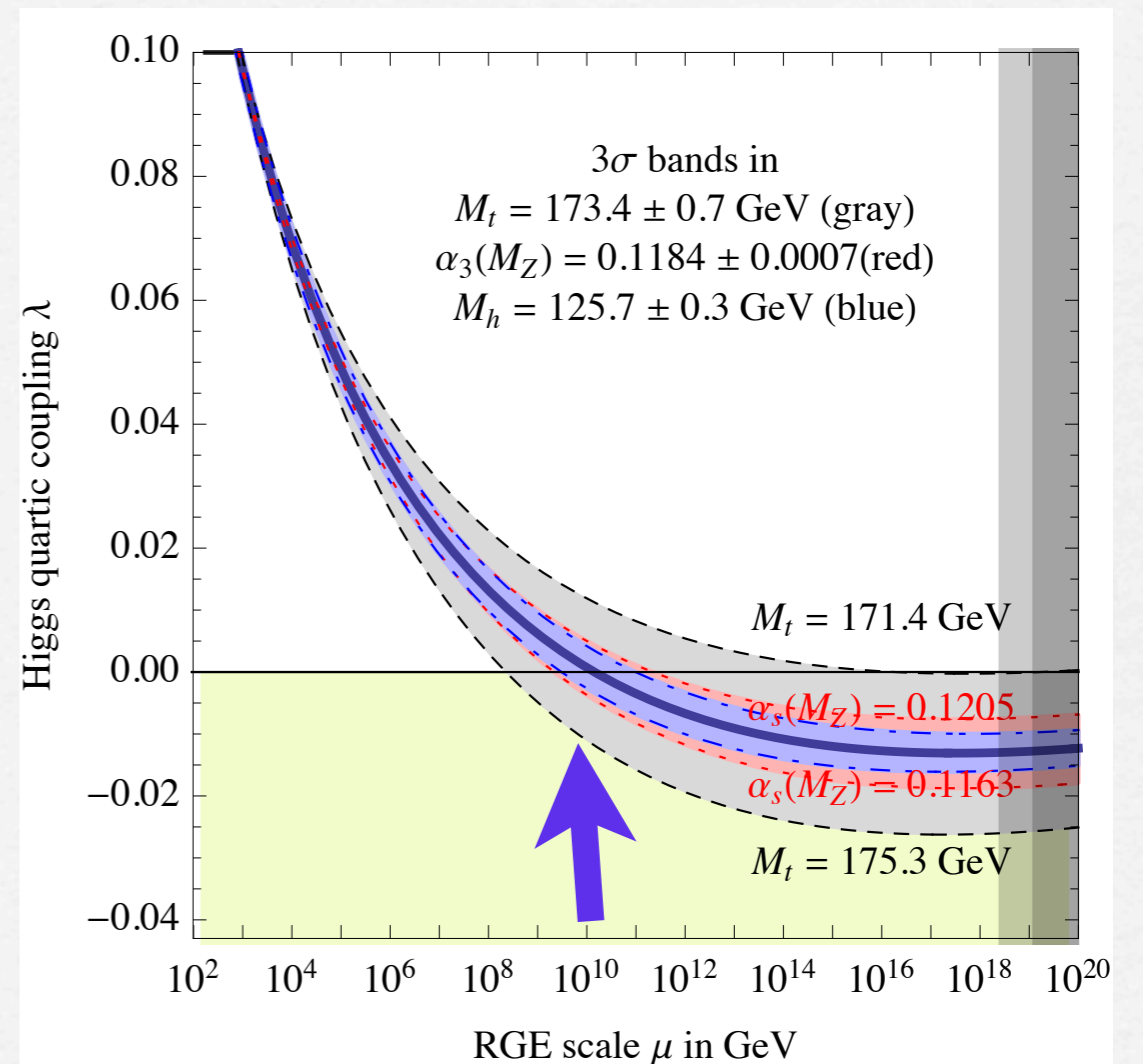
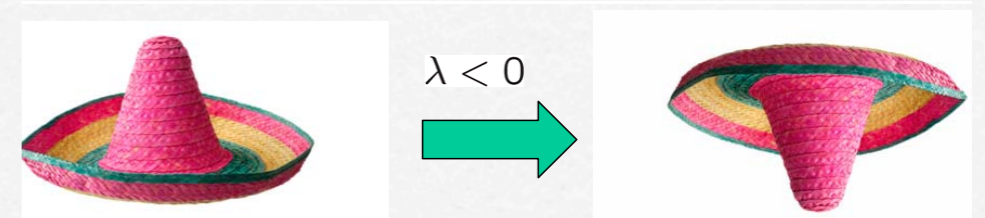
$$M_H^2 > \frac{v^2}{8\pi^2} \left[+12 \frac{m_t^4}{v^4} - \frac{3}{16} (2g_2^4 + (g_2^2 + g_1^2)^2) \right] \log \frac{Q^2}{v^2}$$

solution with the previous approximation

e.g.
$$\begin{cases} \Lambda_C \sim 10^3 \text{ GeV} \Rightarrow M_H \gtrsim 70 \text{ GeV} \\ \Lambda_C \sim 10^{16} \text{ GeV} \Rightarrow M_H \gtrsim 130 \text{ GeV} \end{cases}$$

$$\lambda(Q) = \frac{\lambda(v)}{1 - \frac{3}{4\pi^2} \lambda(v) \ln \frac{Q^2}{v^2}}$$

$$\lambda(Q) = \lambda(v) - \frac{3m_t^4}{2\pi^2 v^4} \ln \frac{Q}{v}$$



Butazzo et al arXiv:1307.3536

Brout, Englert, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble (1964);
Weinberg (1967)

El sector de Higgs

$$\mathcal{L} = (D_\mu \Phi)^\dagger (D^\mu \Phi) - V(\Phi)$$

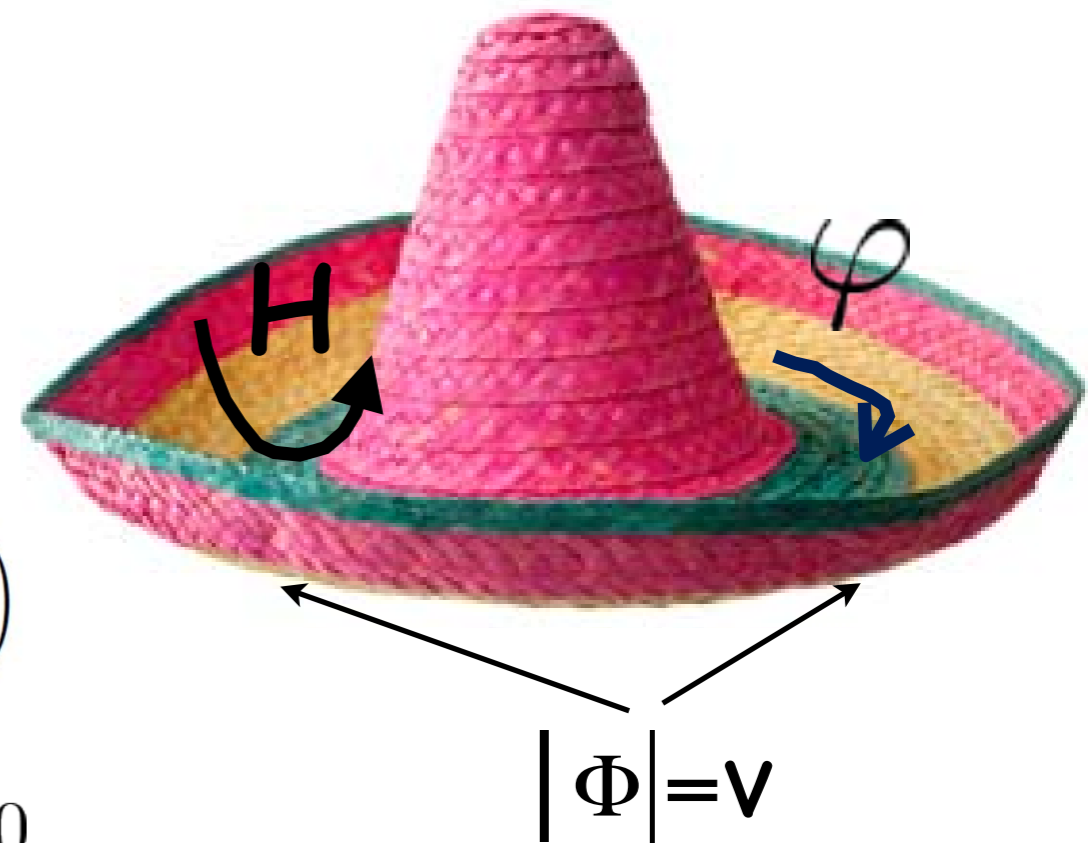
$$V(\Phi) = -\mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \frac{\lambda}{4} (\Phi^\dagger \Phi)^2 \quad \mu^2, \lambda > 0$$

En la norma unitaria: $\Phi_U(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + H(x) \end{pmatrix}$

* $m_W = \frac{1}{2} g v, \quad m_Z = \frac{1}{2} \sqrt{g^2 + g'^2} v, \quad m_\gamma = 0$

*
$$V = \mu^2 H^2 + \lambda v H^3 + \frac{\lambda}{4} H^4$$

$$= \frac{m_H^2}{2} H^2 + \frac{m_H^2}{2v} H^3 + \frac{m_H^2}{8v^2} H^4$$



$$m_H^2 = 2\mu^2 = 2v^2 \lambda$$

$$v = \left(\sqrt{2} G_F \right)^{-1/2} = 246.22057$$