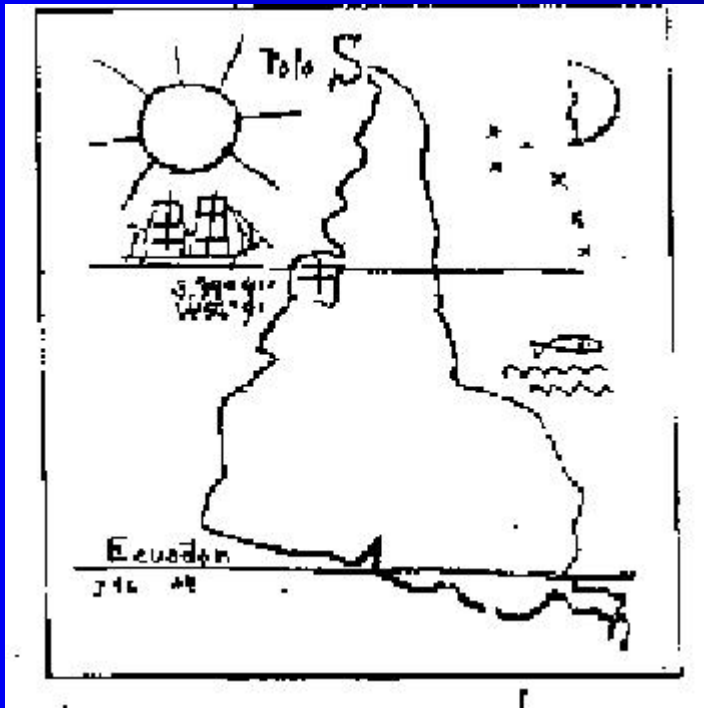


Momentos Dipolares de Fermiones

(con énfasis en el lepton τ)



Gabriel González Sprinberg
Instituto de Física
Facultad de Ciencias
Montevideo Uruguay

gabrielg@fisica.edu.uy

CINVESTAV- IPN
México, abril 2003

Indice

1. Introducción

1. Momentos magnéticos a_f^B

2. Momentos eléctricos d_f^B

$$B = \gamma, Z, g, \dots$$

$$f = e, \mu, \tau, u, d, s, c, b, t, \nu_e, \dots$$

1. Experimentos

2. Lepton τ

3. Conclusiones

Introducción

- ¿Qué importancia tienen?
- ¿Qué preguntas se responden conociéndoles?
- ¿Qué nuevas preguntas provocan?

Son magnitudes que definen la interacción a primer orden de las partículas elementales con campos (eléctricos, magnéticos,...)

Momentos dipolares (MD)

μ momento magnético

d momento dipolar eléctrico

Momentos magnéticos

Física clásica - Mecánica cuántica no relativista

$$\mathcal{H} = -\vec{\mu} \cdot \vec{\mathbf{B}} \quad \vec{\mu} = \mu \vec{\mathbf{s}}$$

Mecánica cuántica relativista: ecuación de Dirac

$$\mathcal{H} = \bar{\Psi} (i(\partial + eA) - m) \Psi + \frac{a}{2} \bar{\Psi} i \sigma^{\mu\nu} \Psi F_{\mu\nu}$$

límite no relativista

$$\mathcal{H} = -2(1+a) \frac{e\hbar}{2mc} \vec{\mathbf{s}} \cdot \vec{\mathbf{B}} \quad \mu = 2(1+a) \frac{e\hbar}{2mc} = g(1+a)\mu_B$$

Predicción: factor giromagnético $g = 2!!$

Electrodinámica cuántica: $g = 2 (1 + a)$

a : momento magnético anómalo; corrección cuántica

$$a_e^\gamma = \frac{\alpha}{2\pi} + \dots \quad \text{Schwinger 1948}$$



Primera corrección cuántica de una teoría de campos

Más en general:

$$a_f = a_f^{\text{Débil}} + a_f^{\text{QED}} + a_f^{\text{Fuerte}} + \dots$$

$$a_e^\gamma = \frac{\alpha}{2\pi} - 0.328\,478\,965\dots \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + 1.181\,241\,456\dots \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 - 1.509\,8(384) \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 + 4.393(27) \times 10^{-12}$$

Medidas actuales de los momentos anómalos



e

$$\mu_e = 1.001\,159\,652\,187 \pm 0.000\,000\,000\,004 \mu_B$$

μ

$$\mu_\mu = 1.001\,165\,916\,0 \pm 0.000\,000\,000\,6 \frac{e\hbar}{2m_\mu}$$

τ

Momento magnético anómalo > -0.052 y < 0.058 , CL = 95%

Momentos eléctricos

Física clásica - Mecánica cuántica

$$\mathcal{H}_{EDM} = -\vec{d} \cdot \vec{E} \quad \vec{d} = d \vec{s}$$

Mecánica cuántica relativista: ecuación de Dirac

$$\mathcal{H} = \bar{\Psi}(i(\not{\partial} + eA) - m)\Psi + \frac{d}{2} \bar{\Psi} \gamma^5 \sigma^{\mu\nu} \Psi F_{\mu\nu}$$

Límite no relativista: $\mathcal{H} = -\vec{d} \cdot \vec{E}$

SIMETRIAS: Inversión temporal T

$$t \rightarrow -t \quad \vec{E} \rightarrow \vec{E} \quad \vec{s} \rightarrow -\vec{s}$$

$$\vec{d} \rightarrow -\vec{d} \quad \mathcal{H}_{EDM} \rightarrow -\mathcal{H}_{EDM}$$

MOMENTO DIPOLAR ELÉCTRICO



LANDAU 1957

ruptura de la simetría de INVERSIÓN TEMPORAL
(también PARIDAD)

Teoría cuántica de campos: invariantes **CPT**
(locales e invariantes Lorentz)

CP~T

$$e \quad d_e = (0.07 \pm 0.07) \times 10^{-26} e \text{ cm}$$

$$\mu \quad d_\mu = (3.7 \pm 3.4) \times 10^{-19} e \text{ cm}$$

$$\tau \quad d_\tau > -3.1 \text{ y } < 3.1 \times 10^{-16} e \text{ cm, CL} = 95\%$$

Partículas con estructura:

$$n \quad d_n < 0.63 \times 10^{-25} e \text{ cm, CL} = 90\%$$

∂

Experimentos

Fermiones livianos:

- estables o con vida media larga
- μ : precesión del espín respecto a \vec{B}
- d : precesión del espín respecto a \vec{E}

Fermiones pesados:

- no tienen vidas medias que permitan medir con los métodos anteriores
- el espín, y la distribución angular de los productos de decaimiento dependen de los MD

Ejemplo: lepton τ

Producción en aceleradores e^+e^-

Donde observar los MD?

- **Sección eficaz total** ($e^+e^- \longrightarrow \gamma ; Z \longrightarrow \tau^+\tau^-$)
- **Anchos parciales** ($Z \longrightarrow \tau^+\tau^- ; Z \longrightarrow \tau^+\tau^- \gamma$)
- **Correlaciones de espín** ($s_i^+ \cdot s_j^-$)
- **Polarizaciones lineales** (s_i^\pm)

- **Sensibles a todas las posibles contribuciones**
(y otros problemas teóricos...)
- **Las simetrías discretas permiten seleccionar las contribuciones de los MD**

Polarizaciones:

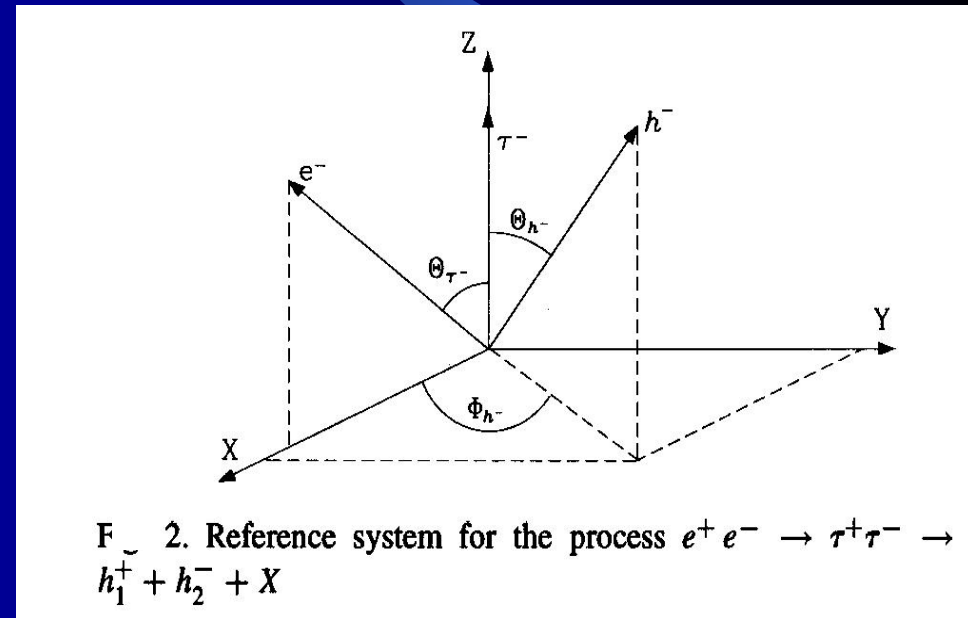
Longitudinal	(z)	P_L
Normal	(y)	P_N
Transversal	(x)	P_T

Simetrías

$P_L : \mathcal{P}$, indep. m_f

$P_N : \mathcal{P}$
interferencia de amplitudes
de helicidades diferentes
(i.e. $\sim m_f$)

$P_T : \mathcal{T}, \mathcal{P}$,
interferencia de amplitudes
de helicidades diferentes (i.e. $\sim m_f$)



(dirección del τ reconstruida)

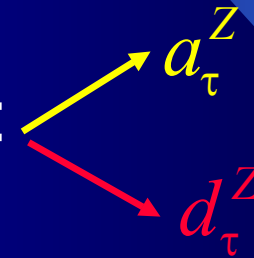
RESULTA:

$P_T \sim$ momento magnético (parte real)

$P_N \sim$ momento dipolar eléctrico (parte real)

¿Que momentos dipolares?

En la energía de producción de Z :



OBSERVABLES

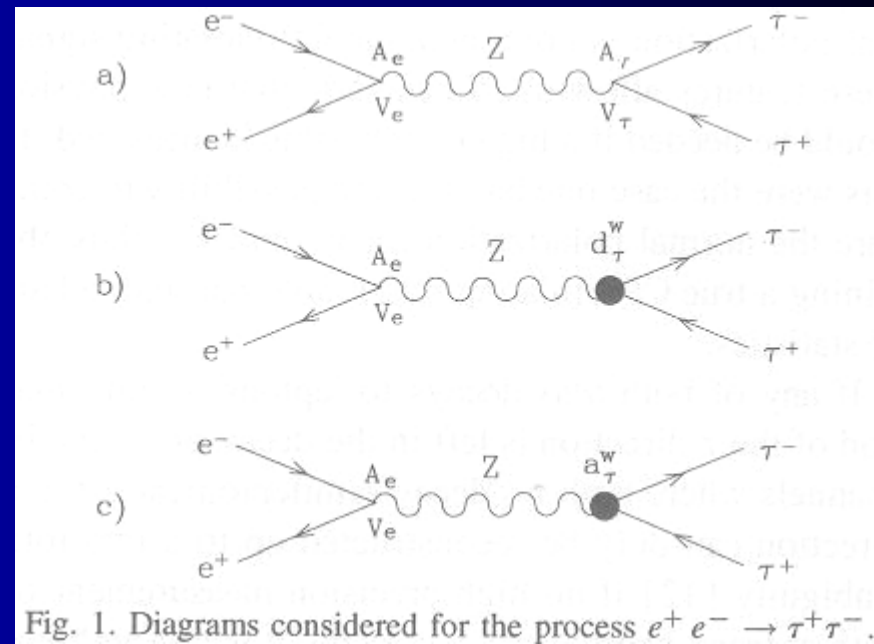
Asimetrías en los ángulos de los hadrones producidos permiten medir o poner cotas a los MD

PROCESOS QUE CONTRIBUYEN:

a) intercambio de Z

b) EDM

c) momento magnético anómalo



$$A_{cc}^{\mp} = \mp \alpha_h \frac{s_W c_W (v^2 + a^2)}{4\beta a^3} \left[-\frac{v}{\gamma s_W c_W} + 2\gamma \operatorname{Re}(a_\tau^Z) \right]$$

$$A_{sc} = \alpha_h s_W c_W \frac{\gamma}{2} \frac{v^2 + a^2}{a^3} \left[2m_\tau \frac{\operatorname{Re}(d_\tau^Z)}{e} \right]$$

MODELO ESTÁNDAR

$$a_{\tau}^Z (M_Z^2) = - (2.10 + 0.61 i) \times 10^{-6}$$

$$a_{\tau}^Z (M_Z^2) = \frac{\alpha}{4\pi} \frac{m_{\tau}^2}{M_Z^2} I$$

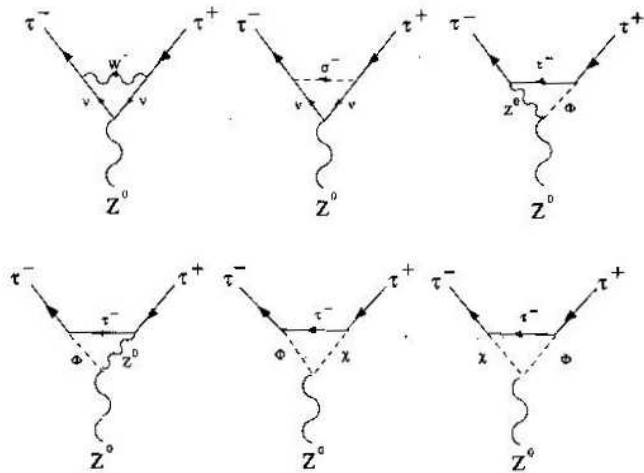


Fig. 1. Contributing Feynman diagrams to a_{τ}^Z in the 't Hooft-Feynman gauge that are also present for the anomalous magnetic moment (photon vertex) in the electroweak theory.

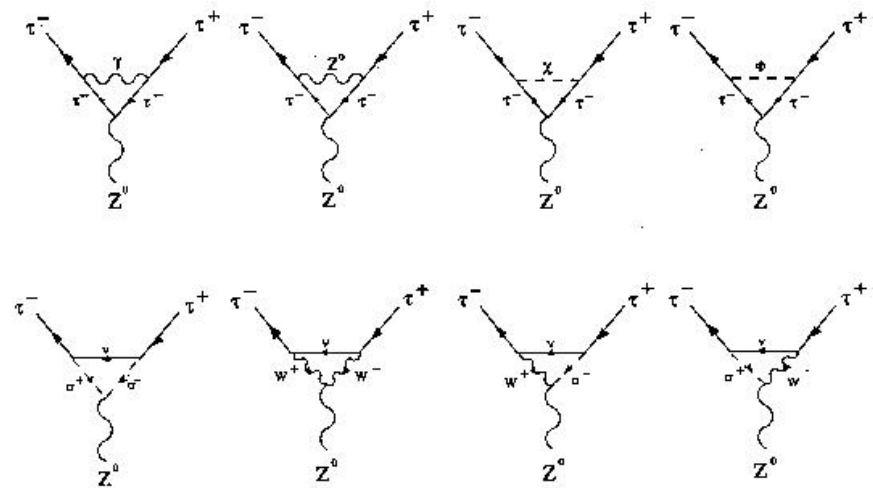


Fig. 2. Contributing Feynman diagrams to a_{τ}^Z in the 't Hooft-Feynman gauge that are not present in the anomalous magnetic moment case.

MEDIDAS

$$\text{Re}(a_\tau^Z) < 4.5 \times 10^{-3}, CL = 90\%$$

$$\text{Im}(a_\tau^Z) < 9.9 \times 10^{-3}, CL = 90\%$$

$$\text{Re}(d_\tau^Z) < 0.56 \times 10^{-17} \text{ e cm}, CL = 95\%$$

$$\text{Im}(d_\tau^Z) < 1.5 \times 10^{-17} \text{ e cm}, CL = 95\%$$

(L3, OPAL, ALEPH)

ANÁLISIS GENERAL DE COTAS A MOMENTOS MAGNÉTICOS

LAGRANGEANO EFECTIVO:

$$L_{ef} = \frac{\alpha_B}{\Lambda^2} \overline{L}_L \phi \sigma^{\mu\nu} \tau_R B_{\mu\nu} + \frac{\alpha_W}{\Lambda^2} \overline{L}_L \vec{\tau} \phi \sigma^{\mu\nu} \tau_R \vec{W}_{\mu\nu} + h.c.$$



ruptura espontánea
de la simetría

$$L_{ef} = \frac{a_\tau^\gamma e}{4m_\tau} \overline{\tau} \sigma^{\mu\nu} \tau F_{\mu\nu} + \frac{a_\tau^Z e}{4m_\tau} \overline{\tau} \sigma^{\mu\nu} \tau Z_{\mu\nu} + \frac{k_\tau^W e}{4\sqrt{2}m_\tau} (\overline{\nu}_{\tau L} \sigma^{\mu\nu} \tau_R W_{+\mu\nu} + h.c.)$$

OBSERVABLES

1. UNIVERSALIDAD EN LEP1 Y SLD
2. PRODUCCIÓN DE PARES DE τ EN LEP2
3. ASIMETRÍAS DE POLARIZACIÓN EN LEP1
4. UNIVERSALIDAD EN $W \longrightarrow \tau \nu$ EN LEP2, CDF Y D0

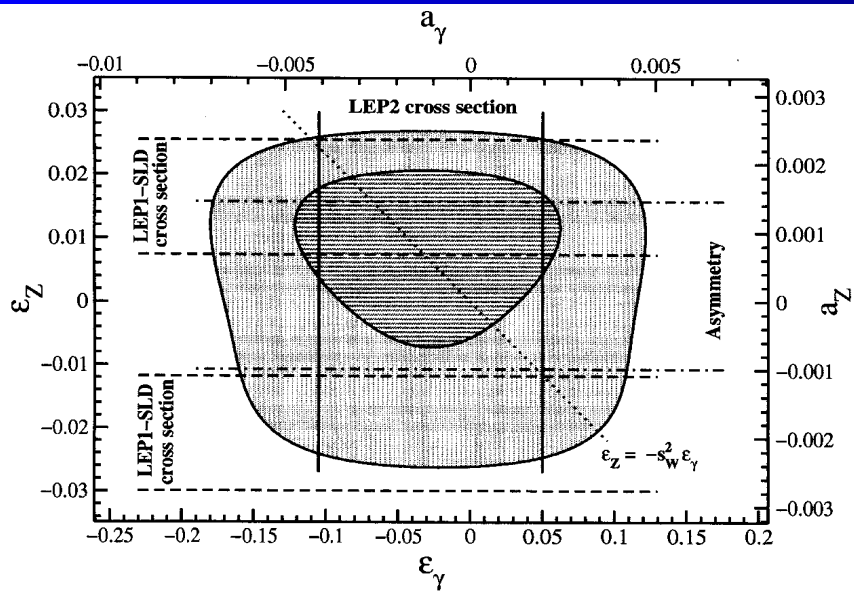


Fig. 1. Global fit including all constraints discussed in the paper. 95% CL and 68% CL contours are shown. The bands between straight lines show the allowed regions (1σ) coming from the different experiments: solid (LEP2-189 GeV), dashed (LEP1-SLD cross section), dot-dashed (asymmetry). We also have plotted the line $\epsilon_Z = -s_W^2 \epsilon_\gamma$ (dotted line). This relationship appears when only the operator \mathcal{O}_B contributes.

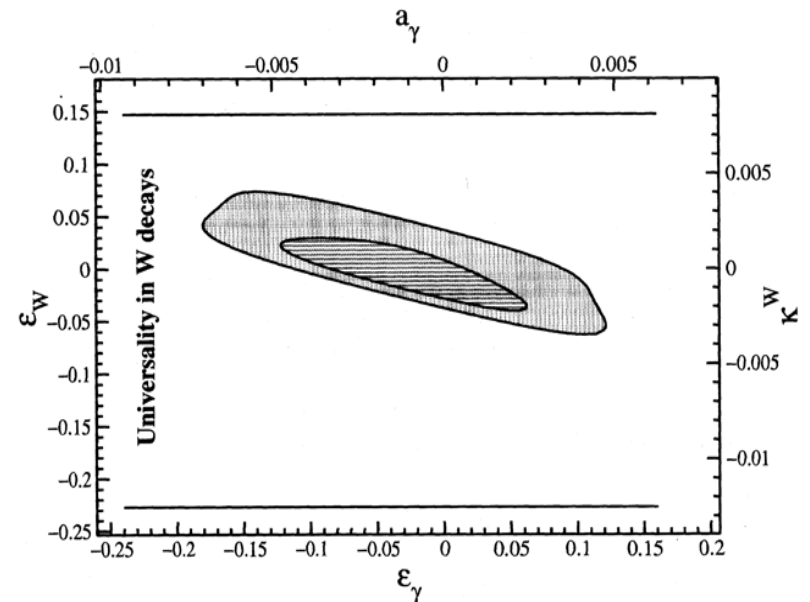


Fig. 2. The global fit of Fig. 1 is now plotted in the plane ϵ_γ and ϵ_W to show the combined bounds on ϵ_W . As in Fig. 1 95% CL and 68% CL contours are shown. For comparison we also draw as straight lines the direct 1σ bounds obtained from universality tests in W decays.

CL 95%

$$-0.004 < a_{\tau}^{\gamma} < 0.003$$

$$-0.0019 < a_{\tau}^Z < 0.0024$$

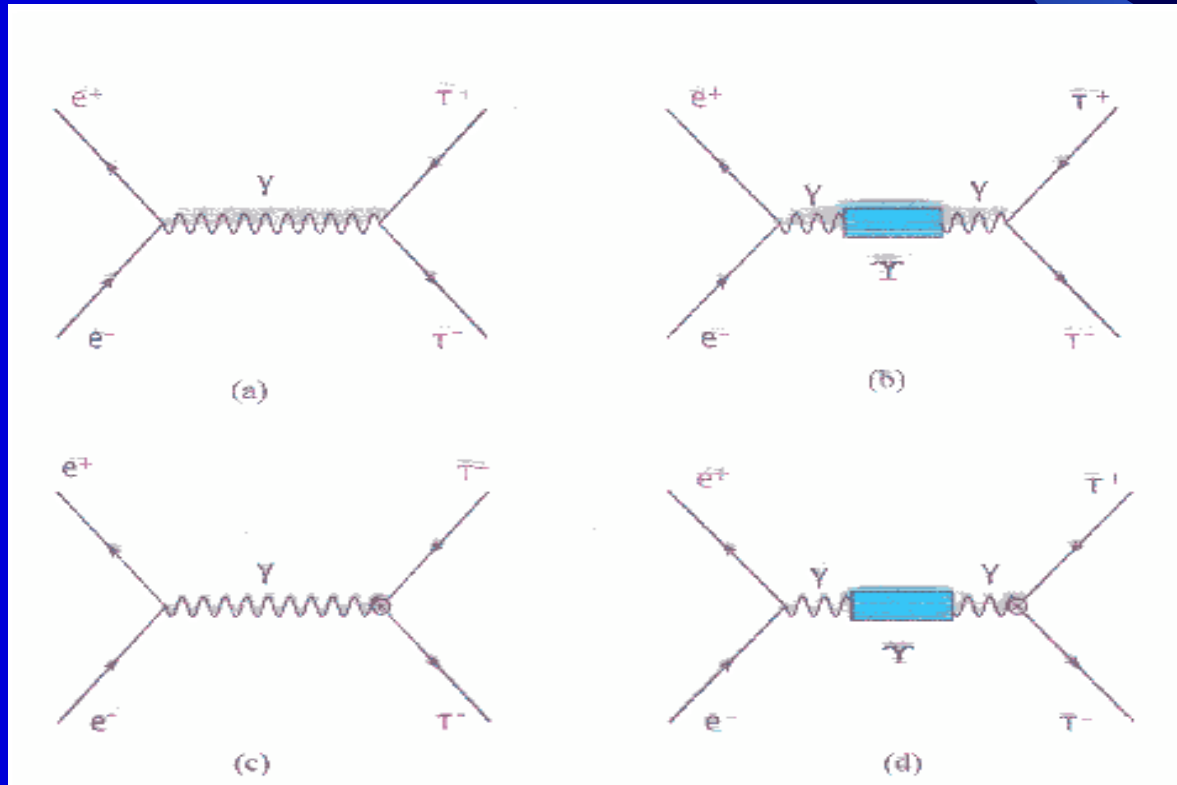
$$-0.003 < k_{\tau}^W < 0.004$$

(un orden de magnitud por debajo de PDG)

LÍMITES DE EDM DE τ A BAJAS ENERGÍAS

MAYOR ESTADÍSTICA DE τ : FÁBRICAS DE B

$$e^+e^- \rightarrow \gamma, \Upsilon \rightarrow \tau^+\tau^-$$



LÍMITE PDG 2002

$$-3.1 \times 10^{-16} e cm < d_{\tau}^{\gamma} < 3.1 \times 10^{-16} e cm$$

OBSERVABLE: SECCIÓN EFICAZ TOTAL $Z \longrightarrow \tau^+ \tau^- \gamma$

NUEVOS OBSERVABLES IMPARES CP ASIMETRÍAS AZIMUTALES DE CORRELACIÓN

$(\vec{s}_+ \times \vec{s}_-)_{N,T}$ es impar ante T

$$A_{NT} = \frac{4\beta}{\pi} \frac{\alpha_- \alpha_+}{3 - \beta^2} d_{\tau}^{\gamma}$$

Resonancias: $\Upsilon(1s)$, $\Upsilon(2s)$, $\Upsilon(3s)$

$10^7 - 10^8 \tau$:

$$d_{\tau}^{\gamma} \approx 10^{-17} - 10^{-18} e \text{ cm}$$

RESUMIENDO:

- análisis independiente a bajas energías de EDM respecto del obtenido por LEP
- separación de EDM electromagnético y débil
- alta estadística disponible

CONCLUSIONES

- ¿Qué importancia tienen?

Nueva física (sub-estructura, modelos extendidos) puede encontrarse en los experimentos de precisión relacionados con MD, a bajas y altas energías.

- ¿Qué preguntas se responden conociéndoles?

Las preguntas que sean, formuladas correctamente, permiten acercarse a problemas importantes en física de partículas: generación de masa, ruptura de CP y T.

- ¿Qué nuevas preguntas provocan?

No se han aun medido las predicciones del modelo estándar para los fermiones pesados

ALGUNAS REFERENCIAS

- TAU EDM AT LOW-ENERGIES.
J. Bernabeu, Gabriel A. González-Sprinberg, Jordi Vidal.
e-Print Archive: [hep-ph/0211249](#)
- MODEL INDEPENDENT BOUNDS ON THE TAU LEPTON ELECTROMAGNETIC AND WEAK MAGNETIC MOMENTS.
Gabriel A. González-Sprinberg, Arcadi Santamaria, Jordi Vidal
[Nucl.Phys.B582:3-18,2000](#)
- ELECTRIC AND WEAK ELECTRIC DIPOLE FORM-FACTORS FOR HEAVY FERMIONS IN A GENERAL TWO HIGGS DOUBLET MODEL.
Daniel Gomez-Dumm, G.A. González-Sprinberg
[Eur.Phys.J.C11:293-300,1999](#)
- THE TAU WEAK MAGNETIC DIPOLE MOMENT.
J. Bernabeu, G.A. González-Sprinberg, M. Tung, J. Vidal
[Nucl.Phys.B436:474-486,1995](#)
- NORMAL AND TRANSVERSE SINGLE TAU POLARIZATION AT THE Z PEAK.
J. Bernabeu, G.A. González-Sprinberg, J. Vidal
[Phys.Lett.B326:168-174,1994](#)

Estimación de EDM en el modelo estándar

$$d_e < 10^{-40} e \text{ cm}$$

$$d_q < 10^{-33} e \text{ cm}$$

$$d_n < 10^{-31} e \text{ cm}$$