

Pruebas de Nueva Física en neutrinos solares y de reactores

Azucena Bolaños Carrera
Asesor de Tesis: Dr. Omar Miranda Romagnoli

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
Reunion Anual de la DP Y C

México, DF., Mayo 2009



Resumen

- 1 Motivación
- 2 Dispersión neutrino-electrón
- 3 Super Kamiokande, SNO y las Interacciones no-estándar
- 4 Física Unparticle
- 5 El operador unparticle
- 6 Dispersión anti-neutrino electrón en reactores
- 7 Sumario



Motivación

- *El origen de la masa de los neutrinos sigue siendo y probablemente será por mucho tiempo más una pregunta cuya respuesta será fundamental para entender la naturaleza de las partículas elementales.*
- *Una masa diferente de cero de los neutrinos es una fuerte motivación teórica para buscar Física mas allá del ME*
- *Las oscilaciones de neutrinos son la solución aceptada al problema del déficit en la detección de los neutrinos solares*



Motivación

- *El origen de la masa de los neutrinos sigue siendo y probablemente será por mucho tiempo más una pregunta cuya respuesta será fundamental para entender la naturaleza de las partículas elementales.*
- *Una masa diferente de cero de los neutrinos es una fuerte motivación teórica para buscar Física mas allá del ME*
- *Las oscilaciones de neutrinos son la solución aceptada al problema del déficit en la detección de los neutrinos solares*



Motivación

- *El origen de la masa de los neutrinos sigue siendo y probablemente será por mucho tiempo más una pregunta cuya respuesta será fundamental para entender la naturaleza de las partículas elementales.*
- *Una masa diferente de cero de los neutrinos es una fuerte motivación teórica para buscar Física mas allá del ME*
- *Las oscilaciones de neutrinos son la solución aceptada al problema del déficit en la detección de los neutrinos solares*



Motivación

- *Como consecuencia: Si existe el problema del origen de la masa del neutrino; si existe la oscilación de los neutrinos... Entonces naturalmente el sector de neutrinos del Modelo estándar es tierra fértil para buscar indicios de nueva Física*
- *Así, en nuestro caso buscamos estas señales de nueva Física en 2 lugares: experimentos de neutrinos solares y experimentos de neutrinos de reactores.*
- *Alentados por varias propuestas de Física más allá del ME en el sector de neutrinos realizamos un análisis fenomenológico.*



Motivación

- *Como consecuencia: Si existe el problema del origen de la masa del neutrino; si existe la oscilación de los neutrinos... Entonces naturalmente el sector de neutrinos del Modelo estándar es tierra fértil para buscar indicios de nueva Física*
- *Así, en nuestro caso buscamos estas señales de nueva Física en 2 lugares: experimentos de neutrinos solares y experimentos de neutrinos de reactores.*
- *Alentados por varias propuestas de Física más allá del ME en el sector de neutrinos realizamos un análisis fenomenológico.*



Motivación

- *Como consecuencia: Si existe el problema del origen de la masa del neutrino; si existe la oscilación de los neutrinos... Entonces naturalmente el sector de neutrinos del Modelo estándar es tierra fértil para buscar indicios de nueva Física*
- *Así, en nuestro caso buscamos estas señales de nueva Física en 2 lugares: experimentos de neutrinos solares y experimentos de neutrinos de reactores.*
- *Alentados por varias propuestas de Física más allá del ME en el sector de neutrinos realizamos un análisis fenomenológico.*



Motivación

- *Como consecuencia: Si existe el problema del origen de la masa del neutrino; si existe la oscilación de los neutrinos... Entonces naturalmente el sector de neutrinos del Modelo estándar es tierra fértil para buscar indicios de nueva Física*
- *Así, en nuestro caso buscamos estas señales de nueva Física en 2 lugares: experimentos de neutrinos solares y experimentos de neutrinos de reactores.*
- *Alentados por varias propuestas de Física más allá del ME en el sector de neutrinos realizamos un análisis fenomenológico.*



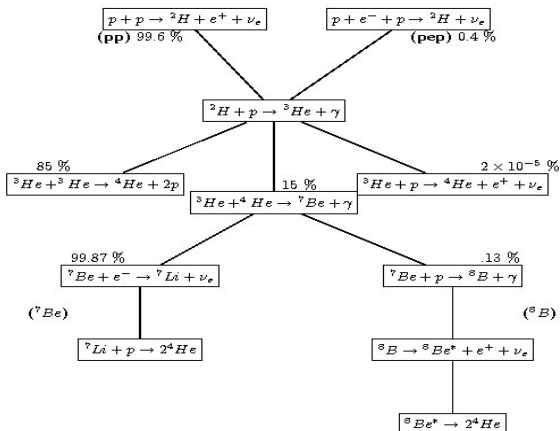
EL MES

El Modelo Estándar Solar (MES) que describe al sol, el cual forma parte de la secuencia principal de estrellas que han estado brillando de modo regular y silencioso por alrededor de 4.6 billones de años, se basa en los siguientes parámetros:

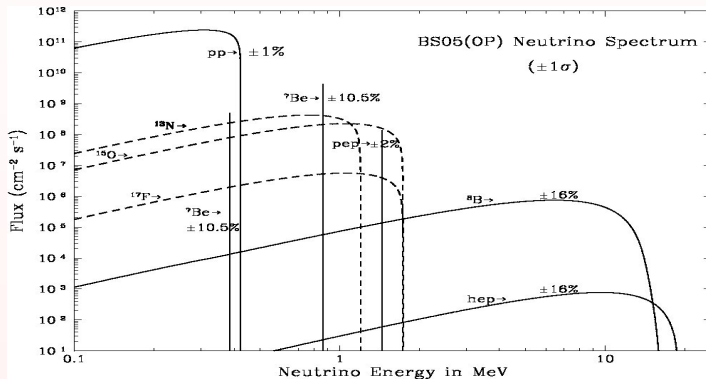
<i>Luminosidad superficial</i>	$L_{\odot} = 3.86(1 \pm 0.005) \times 10^{33} \frac{\text{erg}}{\text{seg}}$
<i>Temperatura Superficial</i>	$T_{s\odot} = 5.78 \times 10^3 \text{K}$
<i>Masa Solar</i>	$M_{\odot} = 1.99 \times 10^{33} \text{g}$
<i>Radio Solar</i>	$R_{\odot} = 6.96 \times 10^5 \text{Km}$



Reacciones Nucleares Solares



Neutrinos solares



Neutrinos solares

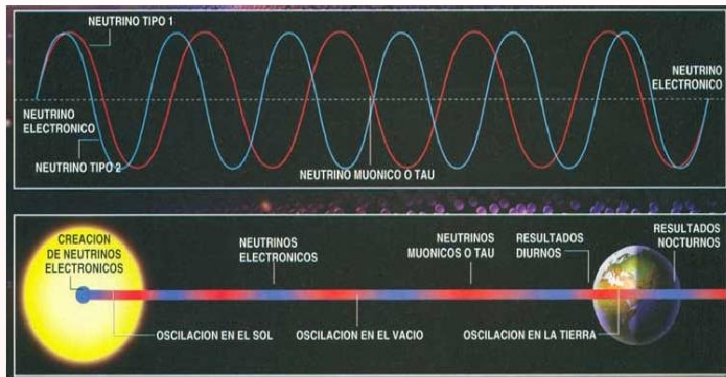
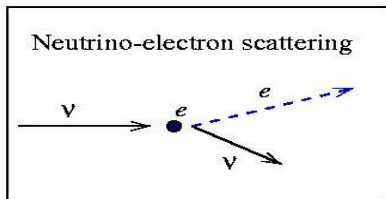


Figure: *Oscilación de los neutrinos solares*



Detección en Super-Kamiokande

En el Modelo Estándar la dispersión $\nu - e$ es dada por:



$$\mathcal{L}_{\text{eff,int}} = -\sqrt{2}G_f(\bar{\nu}_\alpha\gamma^\mu P_L\nu_\alpha)[g_R(\bar{e}\gamma_\mu P_R e) + g_L(\bar{e}\gamma_\mu P_L e)] \quad (1)$$

Y la sección eficaz correspondiente es:

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{2G_F m_e}{\pi} [g_L^2 + g_R^2(1 - \frac{T}{E_\nu})^2 - g_L g_R \frac{m_e T}{E_\nu^2}] \quad (2)$$

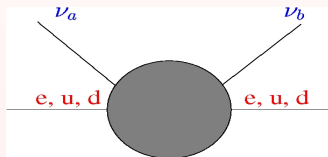


dispersión neutrino-electrón e INE

Cuando tomamos en cuenta Interacciones no-estándar, el lagrangiano se modifica de la manera siguiente:

$$\mathcal{L}_{INE} = -2\sqrt{2}G_F (\bar{\nu}_\alpha \gamma^\mu P_L \nu_\beta) [\epsilon_{\alpha\beta R} (\bar{e} \gamma_\mu P_R e) + \epsilon_{\alpha\beta L} (\bar{e} \gamma_\mu P_L e)] \quad (3)$$

- Las nuevas INE se parametrizan vía: $\epsilon_{\alpha\beta L}, \epsilon_{\alpha\beta R}$
- Nosotros estudiamos $\alpha = \beta$ (Interacciones del tipo no-universal)
- G_F es la constante de Fermi
- P_L, P_R son los proyectores de helicidad



Con las INE, la sección eficaz es:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma(E_\nu, T)}{dT} &= \frac{2G_F^2 m_e}{\pi} \left[\left(\tilde{g}_L^2 + \sum_{\alpha \neq \beta} |\epsilon_{\alpha\beta L}|^2 \right) + \left(\tilde{g}_R^2 + \sum_{\alpha \neq \beta} |\epsilon_{\alpha\beta L}|^2 \right) \left(1 - \frac{T}{E_\nu} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. - \left(\tilde{g}_L \tilde{g}_R + \sum_{\alpha \neq \beta} |\epsilon_{\alpha\beta L}| |\epsilon_{\alpha\beta R}| \right) m_e \frac{T}{E_\nu^2} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Y el número de eventos (en el caso de Super-Kamiokande) es:

$$\begin{aligned} \mathcal{N}_{ev} &= time \phi_B N_e \int_0^{T_{max}} \int_{T_j}^{T_{j+1}} c(T) \lambda(E_\nu) R(T, T') \times \\ &\quad P\left(\tan^2 \theta^2, \frac{\delta m^2}{4E_\nu}\right) \frac{d\sigma_{\nu e}}{dT} + \left(1 - P\left(\tan^2 \theta, \frac{\delta m^2}{4E_\nu}\right) \frac{d\sigma_{\nu e}}{dT}\right) dT' dT dE_\nu \end{aligned} \quad (5)$$

En el número de eventos hemos considerado las correcciones radiativas

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dT} &= \frac{2G_F^2 m}{\pi} \tilde{g}_L^2(T) \left[1 + \frac{\alpha}{\pi} f_{-}(z) \right] + \tilde{g}_R^2(T) (1-z)^2 \left[1 + \frac{\alpha}{\pi} f_{+}(z) \right] \\ &\quad - \tilde{g}_R(T) \tilde{g}_L(T) \frac{m}{q} z \left[1 + \frac{\alpha}{\pi} f_{+-}(z) \right] \end{aligned}$$



Con las INE, la sección eficaz es:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma(E_\nu, T)}{dT} &= \frac{2G_F^2 m_e}{\pi} \left[\left(\tilde{g}_L^2 + \sum_{\alpha \neq \beta} |\epsilon_{\alpha\beta L}|^2 \right) + \left(\tilde{g}_R^2 + \sum_{\alpha \neq \beta} |\epsilon_{\alpha\beta L}|^2 \right) \left(1 - \frac{T}{E_\nu} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. - \left(\tilde{g}_L \tilde{g}_R + \sum_{\alpha \neq \beta} |\epsilon_{\alpha\beta L}| |\epsilon_{\alpha\beta R}| \right) m_e \frac{T}{E_\nu^2} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Y el número de eventos (en el caso de Super-Kamiokande) es:

$$\begin{aligned} \mathcal{N}_{ev} &= \text{time} \phi_B N_e \int_0^{T_{max}} \int_{T_i}^{T_{i+1}} c(T) \lambda(E_\nu) R(T, T') \times \\ &\quad P\left(\tan^2 \theta, \frac{\delta m^2}{4E_\nu}\right) \frac{d\sigma_{\nu ee}}{dT} + \left(1 - P\left(\tan^2 \theta, \frac{\delta m^2}{4E_\nu}\right) \frac{d\sigma_{\nu \mu e}}{dT}\right) dT' dT dE_\nu \end{aligned} \quad (5)$$

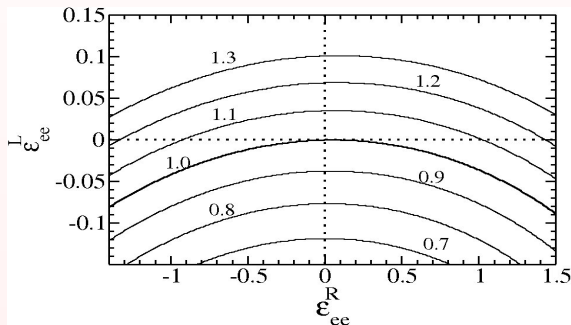
En el número de eventos hemos considerado las correcciones radiativas

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dT} &= \frac{2G_F^2 m}{\pi} \tilde{g}_L^2(T) \left[1 + \frac{\alpha}{\pi} f_-(z) \right] + \tilde{g}_R^2(T) (1-z)^2 \left[1 + \frac{\alpha}{\pi} f_+(z) \right] \\ &\quad - \tilde{g}_R(T) \tilde{g}_L(T) \frac{m}{q} z \left[1 + \frac{\alpha}{\pi} f_{+-}(z) \right] \end{aligned}$$



Número de eventos

Para tener una idea preliminar sobre la sensibilidad que tiene el detector SK hemos graficadola sección eficaz $\nu - e$ integrada, variando los parámetros no estándar en el intervalo de $[-1.5, 1.5]$ para ϵ_R y $[-0.15, 0.15]$ para ϵ_L .



INE en la propagación

En la base de sabor, la evolución de los neutrinos es:

$$H = H_{cin} + H_{MSW} + H_{INE} \quad (7)$$

H_{MSW} es el Hamiltoniano que contiene la parte del efecto MSW y las interacciones No-Estándar estándar están contenidas en H_{INE} de la siguiente manera:

$$\mathcal{H}_{MSW} = \begin{bmatrix} +\sqrt{2}G_F N_e(r) - \frac{\Delta m^2}{4E} \cos 2\theta & \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2\theta \\ \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2\theta & \frac{\Delta m^2}{4E} \cos 2\theta \end{bmatrix}$$

y

$$\mathcal{H}_{NSNI} = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{2}G_F \epsilon N_f(r) \\ \sqrt{2}G_F \epsilon N_f(r) & \sqrt{2}G_F \epsilon' N_f(r) \end{bmatrix}$$



En el Hamiltoniano anterior las INE son las siguientes:

$$\epsilon = -\sin \theta_{23} \epsilon_{e\tau}^V \quad \epsilon' = \sin^2 \theta_{23} \epsilon_{\tau\tau}^V - \epsilon_{ee}^V \quad (8)$$

Puesto que las INE no Universales son diagonales, la probabilidad de sobrevivencia de ν_e es la siguiente:

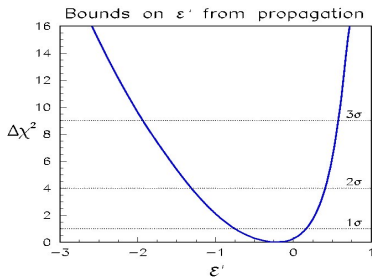
$$\mathcal{P}_{ee} = \frac{1}{2} (1 + \cos 2\tilde{\theta}_{12}(x_o) \cos 2\theta_{12}) \quad (9)$$

$\tilde{\theta}_{12}(x_o)$ es el ángulo de mezcla en materia:

$$\tilde{\theta}_{12}(x_o) = \frac{\cos \theta_{12}(x_o) - \frac{V(x_o)}{k}}{\sqrt{(\cos(2\theta_{12} - \frac{V(x_o)}{k})^2) + \sin 2\theta_{12}^2}} \quad (10)$$



Cotas al parámetro ϵ' al combinar datos solares con KamLAND

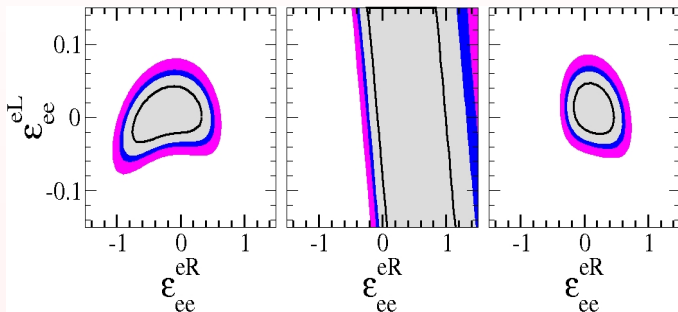


AB et al arxiv:0812.4417



Nuestro Resultado final!

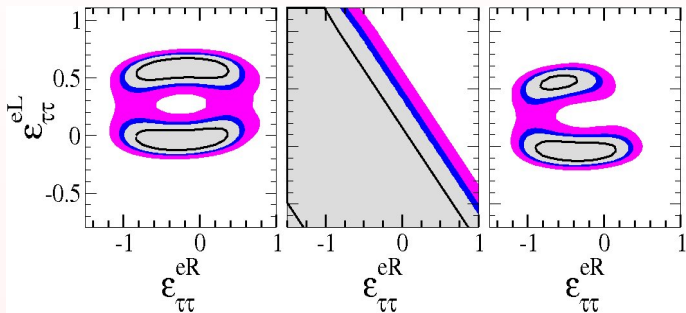
Cotas a las INE del ν_e



Panel Izquierdo: INE en detección, Panel central: INE en propagación



Cotas a las INE del ν_τ

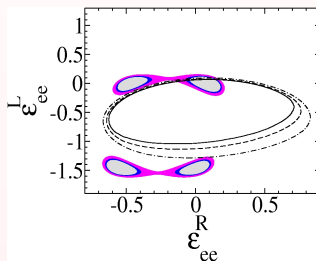


Panel Izquierdo: INE en detección, Panel central: INE en propagación



Comparando con otros resultados de reactores

	90% C.L. Allowed Region	One parameter	Previous limits
ϵ_{ee}^L	$-0.14 < \epsilon_{ee}^L < 0.09$	$-0.03 < \epsilon_{ee}^L < 0.08$	$-0.05 < \epsilon_{ee}^L < 0.1$
ϵ_{ee}^R	$-0.03 < \epsilon_{ee}^R < 0.18$	$0.004 < \epsilon_{ee}^R < 0.15$	$0.04 < \epsilon_{ee}^R < 0.14$



Con ayuda de todos los datos de neutrinos solares, especialmente Super-Kamiokande, obtuvimos cotas a los parámetros INE que son complementarias a los resultados de laboratorio. Especialmente los acoplamientos a los parámetros izquierdos son mejores.



Física de no-partículas y neutrinos de reactores

- *Hay un sector de la teoría (una teoría efectiva)(ME) que aún no ha sido descubierto y que interactúa débilmente con el resto de la teoría*

H.Georgi, 2007

- *La física de este sector no se describe con partículas, es por eso que a sus elementos se les llama no-partículas (unparticle) **unparticle** stuff*
- *La existencia de este sector nos llevaría a descubrimientos muy interesantes de nueva Física*



Los operadores Banks Zaks \mathcal{O}_{BZ} y los operadores del Modelo Estándar \mathcal{O}_{SM} interactúan a través del intercambio de partículas de dimensiones de escala: \mathcal{M}_U^k

$$\frac{1}{\mathcal{M}_U^k} \mathcal{O}_{BZ} \mathcal{O}_{SM}, \quad (11)$$

Donde \mathcal{O}_{BZ} y los operadores del ME tiene dimensiones d_{BZ} y d_{SM} respectivamente.

- Las interacciones dependen de la dimensión del operador y del tipo de interacción; escalar, vectorial, etc...



En una teoría efectiva, sobre una escala Λ_U , tenemos los operadores unparticle

$$\frac{C_U \Lambda_U^{d_{bz}} - d_U}{M_U^k} \quad (12)$$

donde d_U es la dimensión de este operador O_U , se asume que el operador O_U es el operador de dimensión más baja posible.



La sección eficaz estándar en el caso de anti-neutrino del electrón-electrón es:

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{G_F^2 m_e}{2\pi} \left[(g_V + g_A)^2 + (g_V - g_A)^2 \left(1 - \frac{T}{E_\nu}\right)^2 + [g_A^2 - g_V^2] \frac{m_e T}{E_\nu} \right], \quad (13)$$

donde T es la energía de retroceso del electrón, $g_V = 2 \sin^2 \theta_W + \frac{1}{2}$, $g_A = \frac{1}{2}$ for ν_e , $g_A = -\frac{1}{2}$ for $\bar{\nu}_e$.

En los experimentos a bajas energías de dispersión elástica antineutrino-electrón-electrón, se busca un exeso en la sección eficaz, lo cual es un indicio de nueva física



Interacción Unparticle tipo escalar

A partir de la amplitud de dispersión para el caso escalar tenemos:

$$M_u = \frac{f(d)}{\Lambda_U^{2d-2}} \{\bar{\nu}_\beta(k') \nu_\alpha(k)\} [-q^2 - i\epsilon]^{d-2} \{\bar{e}(p') e(p)\} \quad (14)$$

La contribución unparticle a la sección diferencial $\bar{\nu}e$ debida a una interacción escalar es de la forma:

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{f(d)^2 (2)^{2d-6}}{\pi E_\nu^2 \Lambda_U^{4d-4}} (m_e T)^{(2d-3)} (T + 2m_e) \quad (15)$$

con:

$$f(d) = \frac{\lambda_{0\nu}^{\alpha\beta} \lambda_{0e} A_d}{2 \sin d\pi} \quad (16)$$



Interacción Unparticle tipo vectorial

y

$$A_d = \frac{16\pi^{\frac{5}{2}}\Gamma(d + \frac{1}{2})}{2\pi^{(2d)}\Gamma(d - 1)\Gamma(2d)} \quad (17)$$

En el caso del intercambio de una unparticle vectorial:

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{f(d)^2(2)^{2d-5}}{\pi\Lambda_u^{4d-4}}(m_e)^{(2d-3)}(T)^{(2d-4)}\left(1 + \left(1 - \frac{T}{E_\nu}\right)^2 - \frac{m_e T}{E_\nu^2}\right) \quad (18)$$



Dispersión neutrino núcleo

Interacción escalar:

$$\frac{d\sigma_{\mathcal{U}_S}^{\nu N}}{dT} = \frac{1}{\Lambda^{(4d-4)}} \frac{2^{(2d-6)}}{\pi E_\nu^2} *$$

$$[g_{0u}(d)(2Z + N) + g_{0d}(d)(Z + 2N)]^2 (m_A T)^{(2d-3)} (T + 2m_A) \quad (19)$$

T es la energía de retroceso del núcleo, Z y N son el número de protones y neutrones respectivamente del núcleo blanco del detector, A es el número de masa $A = Z + N$.

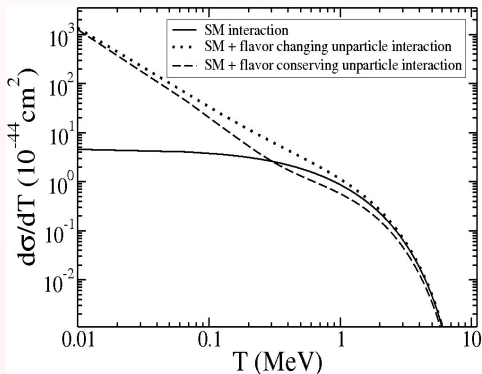
La Interacción vectorial:

$$\frac{d\sigma_{\mathcal{U}_V}^{\nu N}}{dT} = \frac{2^{(2d-5)}}{\pi \Lambda^{(4d-4)}} m_A (m_A T)^{(2d-4)} [g_{1u}(d)(2Z + N) + g_{1d}(d)(Z + 2N)]^2$$

$$\times \left[1 + \left(1 - \frac{T}{E_\nu} \right)^2 - \frac{m_A T}{E_\nu^2} \right].$$

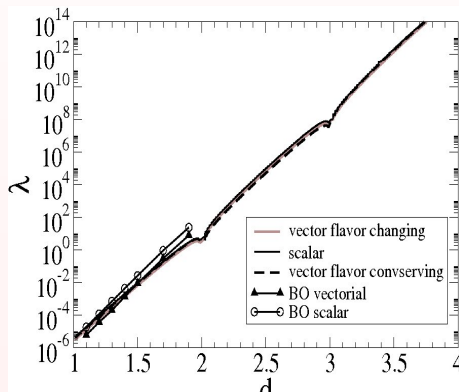


Nuestro resultado

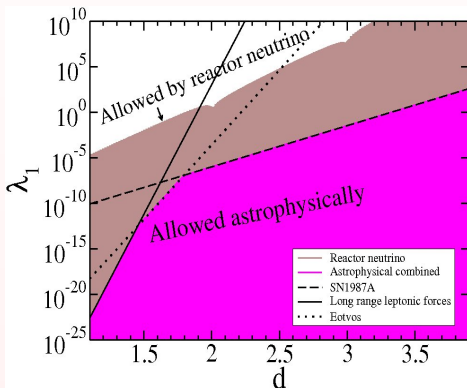


Nuestro resultado

Para el experimento MUNU: caso escalar, vectorial...



Cotas actuales a los acoplamientos unparticle λ_1 y d



Cotas actuales a los acoplamientos unparticle λ_1 provenientes de dispersión neutrino-electrón y de límites astrofísicos

d	$\nu - e$ scattering	$E\ddot{o}tv\ddot{o}s$	Long range	SN1987A	Solar ν 's
1.1	2.0×10^{-5}	6.3×10^{-19}	2.8×10^{-23}	9.1×10^{-11}	1.1×10^{-5}
1.25	1.9×10^{-4}	1.6×10^{-16}	5.2×10^{-19}	4.0×10^{-10}	1.2×10^{-4}
1.5	9.7×10^{-3}	1.7×10^{-12}	5.7×10^{-12}	5.7×10^{-9}	7.3×10^{-3}
1.75	3.7×10^{-1}	2.6×10^{-8}	6.1×10^{-5}	7.4×10^{-8}	3.4×10^{-1}
2.1	40.	1.1×10^{-2}	6.0×10^5	2.9×10^{-6}	100.
2.25	713	4.2	1.0×10^{10}	1.3×10^{-5}	1127.
2.5	5.5×10^4	4.8×10^4	1.1×10^{17}	1.8×10^{-4}	6.6×10^4
2.75	2.9×10^6	5.5×10^8	1.8×10^{24}	2.3×10^{-3}	3.5×10^6
3.1	1.2×10^9	3.3×10^{14}	1.1×10^{34}	9.9×10^{-2}	1.0×10^9
3.25	2.3×10^{10}	9.6×10^{16}	3.1×10^{38}	4.7×10^{-1}	1.1×10^{10}
3.5	2.1×10^{12}	1.5×10^{21}	3.2×10^{45}	6.1	6.7×10^{11}
3.75	1.1×10^{14}	1.9×10^{25}	3.3×10^{52}	87.2	3.5×10^{13}
3.9	1.1×10^{15}	6.2×10^{27}	5.8×10^{56}	414.3	4.0×10^{14}



Sumario

- *Hemos estudiado y analizado las INE del tipo NU en el caso de interacciones del electrón con neutrino del electrón y neutrino del tau*
- *Para tener un análisis completo tomamos en cuenta los datos del detector Super-Kamiokande, SNO, GALLEX, SAGE, Cloro y KamLAND*
- *Hemos obtenido un análisis muy robusto. Este problema no había sido abordado de esta manera.*



Sumario

- *Hemos estudiado y analizado las INE del tipo NU en el caso de interacciones del electrón con neutrino del electrón y neutrino del tau*
- *Para tener un análisis completo tomamos en cuenta los datos del detector Super-Kamiokande, SNO, GALLEX, SAGE, Cloro y KamLAND*
- *Hemos obtenido un análisis muy robusto. Este problema no había sido abordado de esta manera*



Sumario

- *Hemos estudiado y analizado las INE del tipo NU en el caso de interacciones del electrón con neutrino del electrón y neutrino del tau*
- *Para tener un análisis completo tomamos en cuenta los datos del detector Super-Kamiokande, SNO, GALLEX, SAGE, Cloro y KamLAND*
- *Hemos obtenido un análisis muy robusto. Este problema no había sido abordado de esta manera*



Sumario

- *Hemos estudiado y analizado las INE del tipo NU en el caso de interacciones del electrón con neutrino del electrón y neutrino del tau*
- *Para tener un análisis completo tomamos en cuenta los datos del detector Super-Kamiokande, SNO, GALLEX, SAGE, Cloro y KamLAND*
- *Hemos obtenido un análisis muy robusto. Este problema no había sido abordado de esta manera*



Sumario

- *La física de neutrinos es un buen marco para estudiar la Física de no-partículas*
- *Hemos obtenido una buena concordancia con resultados previos (Balantekin) e incluso hemos realizado mejoras como calcular la dispersión neutrino-núcleo*
- *Hemos obtenido cotas a los acoplamientos unparticle con neutrinos del electrón provenientes del experimento MUNU*
- *Si Unparticle Physics se descubre, ya sea mediante efectos virtuales o producción directa sería un hallazgo SORPRENDENTE*



Sumario

- *La física de neutrinos es un buen marco para estudiar la Física de no-partículas*
- *Hemos obtenido una buena concordancia con resultados previos (Balantekin) e incluso hemos realizado mejoras como calcular la dispersión neutrino-núcleo*
- *Hemos obtenido cotas a los acoplamientos unparticle con neutrinos del electrón provenientes del experimento MUNU*
- *Si Unparticle Physics se descubre, ya sea mediante efectos virtuales o producción directa sería un hallazgo SORPRENDENTE*



Sumario

- *La física de neutrinos es un buen marco para estudiar la Física de no-partículas*
- *Hemos obtenido una buena concordancia con resultados previos (Balantekin) e incluso hemos realizado mejoras como calcular la dispersión neutrino-núcleo*
- *Hemos obtenido cotas a los acoplamientos unparticle con neutrinos del electrón provenientes del experimento MUNU*
- *Si Unparticle Physics se descubre, ya sea mediante efectos virtuales o producción directa sería un hallazgo SORPRENDENTE*



Sumario

- *La física de neutrinos es un buen marco para estudiar la Física de no-partículas*
- *Hemos obtenido una buena concordancia con resultados previos (Balantekin) e incluso hemos realizado mejoras como calcular la dispersión neutrino-núcleo*
- *Hemos obtenido cotas a los acoplamientos unparticle con neutrinos del electrón provenientes del experimento MUNU*
- *Si Unparticle Physics se descubre, ya sea mediante efectos virtuales o producción directa sería un hallazgo SORPRENDENTE!*



