Alguns comentários sobre a Física de neutrinos: do ANDES ao mistério das massas

Maria Fernanda Araujo de Resende

Departamento de Física Matemática – Instituto de Física – USP

Setembro de 2013

O que é um neutrino ?

- proposto por Pauli, nomeado por Fermi
- fiel escudeiro dos léptons carregados
- produzido apenas em interações fracas
- suposto inicialmente não massivo frente ao **Modelo Padrão**

MP : Teoria de gauge baseada no grupo $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ de todas as transformações locais de simetria envoltas num formalismo Lagrangeano adequado

Famílias conhecidas

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \; , \; \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \; , \; \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Produzidos

- em fusões nucleares nas estrelas $\rightarrow$ exemplo : neutrinos solares
- pela incidência de raios cósmicos na atmosfera $\rightarrow$ neutrinos atmosféricos
- nas reações das usinas nucleares
- no fênomeno das supernovas
- crosta terrestre etc.

O problema do neutrino solar

Suposição :

- μ e τ não são produzidos no interior do Sol $\rightarrow$ **não existe energia suficiente para isso !**

Fato :

- O **Modelo Solar Padrão (MSP)** prevê o espectro de ν_e (fluxo em função da energia)

Grande conflito existencial (Homestake) :

$$\phi_{exp}/\phi_{teo} < 1 \quad , \quad (\text{ detectores de } \nu_e \ )$$

Então

- o MSP está errado, ou
- Homestake está errado, ou
- pode estar acontecendo alguma coisa com ν_e no caminho

Proposta de Pontecorvo :

- número menor de partículas ser detectado não implica que elas não existam : elas apenas podem estar numa maneira não esperada.

Preliminares
Alguns comentários sobre a Física de neutrinos: do ANDES ao mistério das massas

Bruno Pontecorvo sugeriu inicialmente que: (Inspirado em $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$)

- Os experimentos não estavam preocupados em detectar antineutrinos
  Logo $\nu_e \leftrightarrow \bar{\nu}_e$ traria redução do fluxo

Após a descoberta dos outros dois neutrinos...

- $\nu_e \leftrightarrow \nu_\alpha$, onde $\alpha = e, \mu, \tau$

Muitos experimentos foram realizados:

- os radioquímicos *GALLEX* (*GALLium EXperiment*), *GNO* (*Gallium Neutrino Observatory*), e *SAGE* (*ruSsian American Gallium Experiment*)

$$\nu_e + {}^{71}\mathrm{Ga} \rightarrow {}^{71}\mathrm{Ge} + e^-$$

- os com água ultrapurificada para a detecção através do *efeito Cherenkov* em tempo real : *KamiokaNDE* (Kamioka Nucleon Decay Experiment) e *Super KamiokaNDE*
- os com o mesmo princípio , só que com amostra de *água pesada* (D_2O) : *SNO* (Sudbury Neutrino Observatory)

Conclusão : O Homestake não estava errado !

Preliminares
Alguns comentários sobre a Física de neutrinos: do ANDES ao mistério das massas

Do fato de *SNO* trabalhar com D_2O foi possível enxergar outros sabores

Moral da história : a segunda proposta do Pontecorvo venceu !

Suposição : Existe algo "errado" com o MP $\rightarrow$ Suspeita : **neutrinos são massivos**

- O estado físico de um neutrino com sabor arbitrário é uma superposição linear de "outros" estados ortonormais e especificamente massivos, interpretados como autoestados de uma densidade Hamiltoniana associada à localidade tempo-espacial de interesse

$$\nu_\alpha\,(x) = \sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{N}} U^*_{\alpha\mathrm{j}}\;\nu_\mathrm{j}\,(x) \quad , \quad \mathscr{H}_0\;\nu_\mathrm{j}\,(x) = E_\mathrm{j}\;\nu_\mathrm{j}\,(x) \tag{1}$$

$\mathscr{H}_0$ densidade Hamiltoniana no vácuo

$$\frac{d}{dt}\nu_\mathrm{j}\,(x) = \mathscr{H}_0\;\nu_\mathrm{j}\,(x) \quad \rightarrow \quad \nu_\mathrm{j}\,(x) = e^{-iE_\mathrm{j}\,t}\nu_\mathrm{j} \quad , \quad \text{onde} \quad \nu_\mathrm{j} = \nu_\mathrm{j}\,(0,0)$$

Necessidades :

- Os estados de sabor ν_α devem ser *independentes*. Logo (1) deve ser um sistema linear compatível : o número $\mathtt{N}$ de massivos é maior ou igual ao $\mathtt{D}$ de sabores
- Os conjuntos, formados independentemente pelos estados de sabor e de autoestados massivos supracitados, "devem" ser *isomórficos*

Preliminares
Alguns comentários sobre a Física de neutrinos: do ANDES ao mistério das massas

- $\mathtt{N} = \mathtt{D}:$ é possível estruturar duas bases distintas e ortonormais para a descrição puntual do estado físico associado a qualquer neutrino, haja vista que U^* é unitária

$$\nu_\alpha\left(x\right) = \sum_\beta \sum_{\mathtt{j}=1}^{\mathtt{N}} \left(U^*_{\alpha \mathtt{j}}\, e^{-iE_\mathtt{j}\, t}\, U_{\beta \mathtt{j}} \right) \nu_\beta \quad , \quad \text{sendo} \quad \nu_\alpha = \nu_\alpha\left(0,0\right)$$

  U^* não diagonal : estados de sabores interpretam-se como superposição linear dos estados de sabores existentes

- $\mathtt{N} \neq \mathtt{D}:$ os estados de sabor podem ser expressos como

$$\nu_\alpha\left(x\right) = \sum_\beta \sum_{\mathtt{j}=1}^{\mathtt{N}} \left(U^+_{\alpha \mathtt{j}}\, e^{-iE_\mathtt{j}\, t}\, U_{\beta \mathtt{j}} \right) \nu_\beta \quad , \quad \text{onde} \quad \nu_\alpha = \nu_\alpha\left(0,0\right)$$

  U^+ é uma matriz *pseudoinversa* de U.

- Para $\mathtt{N} = \mathtt{D} = 3$, temos

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}\, c_{13} & s_{12}\, c_{13} & s_{13}\, e^{-i\delta_{13}} \\ -s_{12}\, c_{23} - c_{12}\, s_{23}\, s_{13}\, e^{i\delta_{13}} & c_{12}\, c_{23} - s_{12}\, s_{23}\, s_{13}\, e^{i\delta_{13}} & s_{23}\, c_{13} \\ s_{12}\, c_{23} - c_{12}\, s_{23}\, s_{13}\, e^{i\delta_{13}} & -c_{12}\, c_{23} - s_{12}\, s_{23}\, s_{13}\, e^{i\delta_{13}} & c_{23}\, c_{13} \end{pmatrix} ,$$

  onde

$$s_{\mathtt{ab}} \equiv \sin\theta_{\mathtt{ab}} \quad , \quad c_{\mathtt{ab}} \equiv \cos\theta_{\mathtt{ab}} \quad , \quad \delta_{13} = \mathtt{fase}$$

Probabilidade para a conversão dos sabores :

$$P_{\nu_\alpha \to \nu_\beta}(x) = \sum_{\mathtt{j},\mathtt{k}=1}^{\mathtt{N}} U^*_{\alpha \mathtt{j}} U_{\beta \mathtt{j}} U_{\alpha \mathtt{k}} U^*_{\beta \mathtt{k}} e^{-i\left(E_\mathtt{j} - E_\mathtt{k}\right)t} \quad .$$

Ultrarrelatividade dos neutrinos :

$$E_\mathtt{j} = \sqrt{(\vec{p}_\mathtt{j})^2 + m^2_\mathtt{j}} \quad \Rightarrow \quad E_\mathtt{j} = E + \frac{m^2_\mathtt{j}}{2E} + \mathscr{O}\left(m^4_\mathtt{j}\right) \quad , \quad E = |\vec{p}_\mathtt{j}|$$

Então

$$\mathscr{P}_{\nu_\alpha \to \nu_\beta}(L, E) = \sum_{\mathtt{j},\mathtt{k}=1}^{\mathtt{N}} U^*_{\alpha \mathtt{j}} U_{\beta \mathtt{j}} U_{\alpha \mathtt{k}} U^*_{\beta \mathtt{k}} \exp\left(-i \frac{\Delta m^2_{\mathtt{jk}}}{2E} L\right) \quad .$$

onde L é a distância percorrida no intervalo Δt

Ou seja

- U^* deve ser não diagonal
- Deve existir diferenças entre as massas dos autoestados de $\mathscr{H}_0$

Questões sobre os neutrinos :

- Por que eles têm massa ? Por que eles não teriam massa ?
- Eles são candidatos a explicar a matéria escura do Universo ?
- Se U é quadrada de ordem 3, quais são todos os parâmetros ?
- Neutrinos são partículas de Dirac ou de Majorana ?
- **Qual a composição do interior da Terra ?**

Experimentos com cintiladores desenvolvidos para detectar neutrinos e antineutrinos

$$\nu_\alpha + e^- \rightarrow \nu_\alpha + e^- \quad , \quad \bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

são capazes de detectar (anti)neutrinos com energia bem baixa

- *KamLAND* (Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector) e *Borexino* detectaram uma quantidade razoável de antineutrinos eletrônicos vindos da Terra $\rightarrow$ **geoneutrinos**
- Detectam geoneutrinos com uma energia maior que $1,8$ MeV (limiar de energia associado ao decaimento beta inverso) : conjectura-se que apenas os geoneutrinos dos decaimentos de ^{232}Th e ^{238}U sejam observados

Importância :

- Avaliar a distribuição dos elementos
- Confrontar os dados com os associados aos diversos modelos de composição
- Tentar explicar o calor total que é produzido na Terra

ANDES : Agua Negra Deep Experiment Site

- Mergulhado em rochas $\rightarrow$ $1,7\ \mathtt{km}$
- Redução brutal do ruído de fundo de origens cósmicas
- Sensível aos neutrinos das Supernovas do tipo II

  SuperNova Early Warning System - SNEWS

Adicionar um isótopo beta instável ao cintilador :

- Duplo decaimento beta : neutrinos são de Majorana ?
- Estimar valores pras massas dos neutrinos

Voltando às questões sobre os neutrinos :

- **Por que eles têm massa ? Por que eles não teriam massa ?**
- **Neutrinos são partículas de Dirac ou de Majorana ?**

Partículas de Majorana são as suas próprias antipartículas !

Sobre a massividade dos neutrinos

Alguns comentários sobre a Física de neutrinos: do ANDES ao mistério das massas

Existe um problema na teoria se férmions carregados forem suas próprias partículas :
A carga elétrica do sistema pode não ser conservada !

Esse problema não existe com os neutrinos : **eles não tem carga !**

MP : O termo de massa para os quarks é dado por

$$-f_q \varphi (\bar{q}^0_L) q^0_R + h.c. \quad \rightarrow \quad -f_q \langle \varphi \rangle_0 (\bar{q}^0_L) q^0_R + h.c.$$

- $\langle \varphi \rangle_0$ é o valor esperado no vácuo para o Higgs $\rightarrow$ $f_q \langle \varphi \rangle_0$ é a massa de Dirac

Estendendo isso para os neutrinos...

`Dirac :` $$\mathscr{L}_D = -m_D \bar{\nu}^0_R \nu^0_L + h.c.$$

`Majorana :` $$\mathscr{L}_{m_L} = -\frac{m_L}{2} (\bar{\nu}^0_L)^c \nu^0_L + h.c. \quad \text{ou} \quad \mathscr{L}_{m_R} = -\frac{m_R}{2} (\bar{\nu}^0_R)^c \nu^0_R + h.c.$$

Termos de Majorana são prováveis ! Por que ?

Termos de Majorana são prováveis ! Por que ?

Adicionando ν_R ao modelo

$$-f_\nu \langle\varphi\rangle_0 \left(\bar{\nu_L^0}\right) \nu_R^0 + h.c. \quad \rightarrow \quad m_\nu = -f_q \langle\varphi\rangle_0$$

$$m_\nu \approx 0,05\ eV \quad \text{e} \quad \langle\varphi\rangle_0 \approx 174\ GeV \quad \Rightarrow \quad f_\nu \approx 10^{-13}$$

Dificilmente essa é a explicação pras massas dos neutrinos ...!

Férmions de mão-direita são “weak-isospin singlets” no MP

- Eles são carga conjugados a si mesmos

Ou seja : se ν_R existe $\quad \Rightarrow \quad$ é possível existir $\mathscr{L}_{m_R}$

Essa pode ser a explicação !

$$\begin{aligned} \mathscr{L}_D &= -m_D \bar{\nu_R^0} \nu_L^0 - \frac{m_R}{2} \left(\bar{\nu_R^0}\right)^c \nu_R^0 + h.c. \\ &= -\frac{1}{2} \left[\left(\bar{\nu_L^0}\right)^c, \bar{\nu_R^0} \right] \begin{bmatrix} 0 & m_D \\ m_D & m_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_L^0 \\ \left(\nu_R^0\right)^c \end{bmatrix} + h.c. \quad , \quad \mathscr{M}_\nu = \begin{bmatrix} 0 & m_D \\ m_D & m_R \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Indo pra uma situação diagonalizada com

$$Z^T \mathscr{M}_\nu Z = \mathscr{D}_\nu = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad , \quad \text{onde} \quad \nu_L \equiv Z^{-1} \begin{bmatrix} \nu_L^0 \\ \left(\nu_R^0\right)^c \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \nu = \nu_L + (\nu_L)^c = \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{bmatrix}$$

demonstra-se que

$$\mathscr{L}_\nu = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^{2} m_j \bar{\nu}_j \nu_j$$

Assumindo que $m_R \gg m_D$, mostra-se que $m_1 \approx m_D^2 / m_R$ e $m_2 \approx m_R$

- $m_D \sim m_{top} \approx 175\ GeV$ e $m_1 \approx 10^{-2}\ eV \Rightarrow m_R \sim 10^{15}\ GeV$

Essa é a ideia por trás do Mecanismo de Seesaw

- Pra cada neutrino leve existe um lépton neutro superpesado
- Talvez eles expliquem a assimetria barion-antibarion do Universo em termos da leptogênese
- m_R pode refletir alguma escala onde existe uma nova Física responsável pela massividade dos neutrinos

Existem 3 tipos de Mecanismo de Seesaw

- **Tipo I :** neutrinos pesados de mão-direita
- **Tipo II :** tripleto de escalares
- **Tipo III :** tripleto de férmions

Os experimentos não podem sondar uma escala tão alta

Outra possibilidade : **Mecânismo de Seesaw Inverso**

- Leveza dos neutrinos é devida a violação do número leptônico numa escala de energia baixa
- Os neutrinos de mão-direita estariam numa escala TeV

Dois artigos interessantes :

- **Dias, Pires, Rodrigues da Silva arXiv:1107.0739v3 [hep-ph]**
- Dias, Pires, Rodrigues da Silva, Sampieri arXiv:1206.2590v2 [hep-ph]

How the Inverse Seesaw Mechanism Can Reveal Itself Natural , Canonical and Independent of the Right-Handed Neutrino Mass

How the Inverse Seesaw Mechanism Can Reveal Itself Natural , Canonical and Independent of the Right-Handed Neutrino Mass

Ideia do MSI : adotamos 6 neutrinos de mão-direita

- Os usuais $\nu_{\alpha R}$, com $\alpha = 1,2,3$
- Os não usuais N_{jR} , com $j = 1,2,3$

Com uma base $[\nu_L, \nu_L^c, N_L^c]$ temos

$$\mathscr{M}_\nu = \begin{bmatrix} 0 & m_D^T & 0 \\ m_D & 0 & M_N^T \\ 0 & M_N & \mu \end{bmatrix}$$ com a Lagrangiana massiva sendo

$$\mathscr{L}_\nu = -\bar{\nu}_R m_D \nu_L - \bar{N}_R M_N \nu_L^c - \frac{1}{2}\bar{N}_R \mu N_L^c + h.c.$$

Supondo que os elementos das matrizes são tais que $M_N \gg m_D \gg \mu$

$$m_\nu \approx m_D^T M_N^{-1} \mu \left(M_N^T\right)^{-1} m_D$$

Consequências :

- Presença de M_N no denominador : alguma coisa pode existir numa escala mais baixa

  $M_N \to$ escala TeV , $m_D \to$ escala eletrofraca , $\mu \to$ escala keV

  A coisa poderia ser investigada em experimentos que envolvem neutrinos

  (long-baseline $\longleftrightarrow$ ANDES ?)

  Reza a lenda que a escala de μ é pequena por causa de uma violação da simetria do número leptônico $\leftarrow$ $U(1)_L$
  Não existe justificativa dinâmica pra isso

Novo mecânismo :

Assumindo que :

- $m_D \leftrightarrow v_w$, $M_N \leftrightarrow v$

$$m_\nu \propto \frac{v_w^2}{v^2}\mu$$

- μ surge do termo de Yukawa $\lambda\sigma^0 \bar{N}_R (N_R)^c \quad \to \quad \mu = \lambda v'$
  $\sigma^0 \to$ escalar pesado (singleto)
- **Violação do número leptônico ocorre apenas no potencial escalar do modelo**

Violação do número leptônico ocorre apenas no potencial escalar do modelo

- Escolhendo campos e simetrias apropriados , potencial tem um mínimo vinculando alguns parâmetros do modelo
- $\mu = \lambda v^2 / M \ \rightarrow \ M$ é a escala de violação
  $M \approx 10^{13}\ GeV\ ,\ v \approx 1\ TeV \quad \rightarrow \quad \mu \approx 0,1\ keV$

$$m_\nu \approx \frac{v_w^2}{M} \quad \leftarrow \quad \text{massa usual do Mecanismo de Seesaw}$$

Coisa bacana : v não aparece na expressão

Estendendo o SM pra esse MSI... Adotamos 6 neutrinos de mão-direita

- Os usuais $\nu_{\alpha R}$, com $\alpha = 1,2,3$
- Os não usuais N_{jR} , com $j = 1,2,3$

Dois escalares neutros (singletos) σ_1^0 e σ_2^0
Lagrangiana invariante sob a simetria $Z_5 \otimes Z_2$

$$\mathscr{L}_V = \mathscr{L}_Y^{SM} + G_{jk}\bar{\nu}_{jR}\tilde{H}^\dagger L_{kL} + G'jk\sigma_1 \bar{N}_{jR}\nu_{kL}^c + \frac{\lambda_{jk}}{2}\sigma_2 \bar{N}_{jR}N_{kL}^c + h.c.$$

$\tilde{H} = \varepsilon H^* \quad \rightarrow \ \varepsilon$ é um tensor antissimétrico $SU(2)$
λ é diagonal por comodidade

Sobre a massividade dos neutrinos
Alguns comentários sobre a Física de neutrinos: do ANDES ao mistério das massas

Quando H , σ_1 , $\sigma 2$ desenvolvem os seus VEVs

$$H, \sigma_1, \sigma 2 \to \frac{1}{\sqrt{2}} \left(v_{w,1,2} + R_{w,1,2} + iI_{w,1,2} \right) \quad \text{e} \tag{2}$$

$$\mathscr{M}_\nu = \begin{bmatrix} 0 & m_D^T & 0 \\ m_D & 0 & M_N^T \\ 0 & M_N & \mu \end{bmatrix} \quad \text{com} \quad m_D = \frac{G}{\sqrt{2}} v_w \, , \, M_N = \frac{G'}{\sqrt{2}} v_1 \, , \, \mu = \frac{\lambda}{\sqrt{2}} v_2$$

Com a hierarquia $M_N \gg m_D \gg \mu$ temos

$$m_\nu \approx m_D^T M_N^{-1} \mu \left(M_N^T \right)^{-1} m_D = \frac{1}{\sqrt{2}} G^T \left(G' \right)^{-1} \lambda \left(G^T \right)^{-1} G \frac{v_w^2 v_2}{v_1^2}$$

Com $v_w = 246 \; GeV$, $v_1 = 10^3 \; GeV$ precisamos de $v_2 \approx 10^{-7}$ pra gerar neutrinos na sub-eV

Pequenez de v_2 : consequência da nossa escolha para a quebra espontânea de simetria

O potencial adequado é

$$\begin{aligned} V &= \mu_H^2 |H|^2 + \mu_1^2 |\sigma_1|^2 + \mu_2^2 |\sigma_2|^2 + \lambda_1 |H|^4 + \lambda_2 |\sigma_1|^4 + \lambda_3 |\sigma_2|^4 \\ &= |H|^2 \left(\lambda_4 |\sigma_1|^2 + \lambda_5 |\sigma_2|^2 \right) + \lambda_6 |\sigma_1|^2 |\sigma_2|^2 - \left(\frac{M}{\sqrt{2}} \sigma_1^2 \sigma_2 + h.c. \right) \end{aligned}$$

Sobre a massividade dos neutrinos
Alguns comentários sobre a Física de neutrinos: do ANDES ao mistério das massas

$$
\begin{aligned}
V &= \mu_H^2|H|^2 + \mu_1^2|\sigma_1|^2 + \mu_2^2|\sigma_2|^2 + \lambda_1|H|^4 + \lambda_2|\sigma_1|^4 + \lambda_3|\sigma_2|^4 \\
&= |H|^2\left(\lambda_4|\sigma_1|^2 + \lambda_5|\sigma_2|^2\right) + \lambda_6|\sigma_1|^2|\sigma_2|^2 - \left(\frac{M}{\sqrt{2}}\sigma_1^2\sigma_2 + h.c.\right)
\end{aligned}
$$

- **O último termo é o único que quebra explicitamente a simetria do número leptônico**

Combinando com (2)

$$
\begin{aligned}
&\mu_H^2 + \lambda_1 v_w^2 + \frac{\lambda_4}{2}v_1^2 + \frac{\lambda_5}{2}v_2^2 = 0 \\
&\mu_1^2 + \lambda_2 v_1^2 + \frac{\lambda_4}{2}v_w^2 + \frac{\lambda_6}{2}v_2^2 - Mv_2 = 0 \\
&\mu_2^2 v_2 + \lambda_3 v_2^3 + \frac{\lambda_5}{2}v_w^2 v_2 + \frac{\lambda_6}{2}v_1^2 v_2 - \frac{M}{2}v_1^2 = 0
\end{aligned}
$$

- Número leptônico é violado na escala caracterizada por M
- Se σ_2 pertence a essa escala $\rightarrow\ \mu_2 \approx M$

$$
v_2 \approx \frac{1}{2}\frac{v_1^2}{M} \quad \rightarrow \quad m_\nu \approx \frac{1}{\sqrt{2}} G^T \left(G'\right)^{-1} \lambda \left(G^T\right)^{-1} G \frac{v_w^2}{M}
$$

m_ν tem a mesma magnitude que a do Mecanismo de Seesaw tradicional!

Sobre a massividade dos neutrinos

Alguns comentários sobre a Física de neutrinos: do ANDES ao mistério das massas

- v_w $\rightarrow$ escala eletrofraca , $M = 10^{14}\ GeV$ $\leftarrow$ neutrinos na escala sub-eV
- v_1 apenas estabelece uma escala de massa para os neutrinos de mão-direita