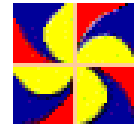




# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

[www.bassalo.com.br](http://www.bassalo.com.br)



---

## Oscilação de Neutrinos e o Prêmio Nobel de Física de 2015 (PNF/2015) – Parte 3: Outras Colaborações e a Contribuição de Físicos Brasileiros.

Neste verbete, trataremos de outras colaborações que confirmaram o tema do PNF2015 e que tiveram a participação de físicos brasileiros.

Essas colaborações trataram com *neutrinos/antineutrinos*, que são produzidos por *aceleradores nucleares*. Como vimos no verbete (Parte 2), o FERMILAB havia construído, em 1983, um acelerador de *prótons* (*Tevatron*) para estudar a colisão dessas partículas com alvos de grafite (para produzir *píons* e *káons*) e observar seus decaimentos envolvendo *neutrinos* ( $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ) e, então, produzir seus respectivos feixes [NuMI ( $\nu_\mu$ ), NuTAU ( $\nu_\tau$ )], constituindo-se nos denominados *Main Injector Neutrino*. Além do mais e, também, como destacamos naquele verbete, em 1986, foi elaborada a *Teoria das Oscilações de Neutrinos* (matriz: PMNS). Desse modo, para medir a ON, o FERMILAB organizou o experimento denominado de *Main Injector Neutrino Oscillation Search* (MINOS), um sistema composto de dois detectores para receber aqueles feixes. Um deles [*far detector* (FD)], com massa de 5.400 toneladas (t), localizado na *Soudan Mine*, no norte de Minnesota, na profundidade de 716 m, entrou em operação, no verão de 2003, para estudar os *raios cósmicos* e os *neutrinos atmosféricos (estelares)*. O outro [*near detector* (ND)], de 980 t, distante de algumas centenas de metros do alvo de grafite, enterrado na profundidade de quase 100 m, começando a funcionar em dezembro de 2004. Note-se que a distância entre esses dois detectores é de 734 km.

A MINOS Collaboration trata da oscilação [ $\nu_{\mu(2)} \rightarrow \nu_{\tau(3)}$ ] e mede a *diferença dos quadrados da massa* ( $\Delta m_{32}^2$ ) e os *ângulos de mistura* ( $\theta_{32}$ ). Assim, seus resultados foram apresentados em: 2006 (*Physical Review Letters* **97**, no. 191801) [275 físicos, sendo 02 brasileiros: Carlos Ourivio Escobar (n.1948), do *Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas* (IF/UNICAMP) e [Philippe Gouffon](#) (n.1954), do *Instituto de Física da Universidade de São Paulo* (IF/USP)] e 2008 (*Physical Review* **D77**, no. 072002) (199 cientistas, incluindo Escobar e [Gouffon](#)), com os mesmos valores, dados por:  $\Delta m_{32}^2 = 2,74^{+0,44}_{-0,26} \times 10^{-3}$  ( $\text{eV}^2/\text{c}^4$ ) e  $\text{sen}^2(2\theta_{32}) > 0,87$  [com 68% de *confidence limit* (“limite de confiança”) (CL)]. Ainda em 2008 (*Physical Review Letters* **101**, no. 131802) (171 cientistas, também com Escobar e Gouffon), a MINOS voltou a apresentar novos resultados:  $\Delta m_{32}^2 = 2,43^{+0,13}_{-0,13} \times 10^{-3}$  ( $\text{eV}^2/\text{c}^4$ ) e  $\text{sen}^2(2\theta_{32}) > 0,90$  (com 90% de CL). Em 2011 (*Physical Review Letters* **106**, no. 181801) [128 cientistas, com Escobar e Gouffon, e mais dois brasileiros: João de Abreu Barbosa Coelho

(n.1984), do IF/UNICAMP e Ricardo Avelino Gomes (n.1976) (a quem agradeço a leitura crítica deste artigo), do *Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás (IF/UFMG)*], os novos valores foram:  $\Delta m_{32}^2 = 2,32^{+0,12}_{-0,08} \times 10^{-3} \text{ (eV}^2/\text{c}^4)$  e  $\text{sen}^2(2\theta_{32}) > 0,90$  (com 90% de CL). Ainda em 2011, a MINOS divulgou novos resultados, desta vez envolvendo o desaparecimento de **antineutrinos muônicos** ( $\bar{\nu}_\mu$ ) em dois artigos. O primeiro foi publicado no *Physical Review Letters* **107**, no. 021801 (128 cientistas, e mais Coelho, Escobar, Gomes e Gouffon), cujos resultados foram os seguintes valores:  $\Delta m_{\mu\bar{\mu}}^2 = [2,43^{+0,13}_{-0,13} \text{ (estatístico)} \pm 0,06 \text{ (sistemático)}] \times 10^{-3} \text{ (eV}^2/\text{c}^4)$ , além de  $\text{sen}^2(2\theta_{\mu\bar{\mu}}) = [0,86^{+0,11}_{-0,12} \text{ (estatístico)} \pm 0,01 \text{ (sistemático)}]$ . Este experimento também mediu a **oscilação** ( $\nu_\mu \leftrightarrow \bar{\nu}_\mu$ ) com a confiança de 2% assumindo **parâmetros de oscilação** idênticos. O segundo, agora apresentado no *Physical Review* **D84**, no. 071103 (124 cientistas, incluindo Coelho, Escobar, Gomes e Gouffon), os resultados são dados por:  $\Delta m_{\mu\bar{\mu}}^2 = 2,32 \times 10^{-3} \text{ (eV}^2/\text{c}^4)$  e  $\text{sen}^2(2\theta_{\mu\bar{\mu}}) = 1$ .

Como os dois últimos experimentos de 2011 indicavam uma possível violação da **Simetria (Teorema) CPT** [**inversão de carga** (C): nenhuma experiência física se altera se uma partícula (p) for trocada por sua antipartícula ( $\bar{p}$ ); **inversão espacial** ou **paridade** (P): nenhuma experiência física será capaz de determinar, de maneira unívoca, a direita ou a esquerda (troca de r por  $-r$ ); e **inversão temporal** (T): se um certo movimento de sistema físico é possível, o seu reverso temporal também o será (troca de t por  $-t$ )], e que é um pilar básico do MPPE, a MINOS voltou a realizar nova experiência, em 2012 (*Physical Review Letters* **108**, no. 191801) [112 cientistas, ainda com Coelho, Escobar, Gomes e Gouffon], não confirmou o observado no artigo de 2011 (*Physical Review Letters* **106**, no. 181801), ou seja, uma possível violação da CPT. Desse modo, essa experiência de 2012 mostrou que a **Simetria CPT** continua válida no MPPE, pois os parâmetros para **neutrinos** e **antineutrinos** se mostraram consistentes. Nesta altura, é interessante registrar que, em 1964 (*Physical Review Letters* **13**, p. 138), os físicos, os norte-americanos James Henry Christenson (1935-2015), James Watson Cronin (n.1931; PNF, 1980), Val Lodgson Fitch (1923-2015; PNF, 1980) e o francês René Turlay (1932-2002) observaram a violação da **simetria CP** do sistema  $K_0 - \bar{K}_0$  (que são partículas neutras e massivas), porém, havia a preservação da CPT.

No caso dos experimentos de 2011 tratados acima, existem dois pilares básicos do MPPE que estão afetados: os **neutrinos** parecem possuir massa e sua **oscilação** viola a CPT. Portanto, se isso se confirmar no futuro, há a necessidade de se revisar o MPPE.

Ainda se tratando da MINOS Collaboration, merece destaque o fato de que ela esteve no centro das polêmicas experiências envolvendo a massa e a velocidade dos **neutrinos**, como, por exemplo, a realizada em 2007 (*Physical Review* **D76**, no. 072005) (203 cientistas, com Escobar e Gouffon). Neste experimento foi usado um

feixe de **neutrinos muônicos** (NuMI) com a energia da ordem de 3 GeV (com uma determinada velocidade  $v$  para o  $\nu_\mu$ ), tendo o *far detector* (FD) detectado 473 eventos, para os quais foi encontrado:  $v = 1,000051 c$  (com 68% de CL). Por sua vez, as medidas de correlação entre as massas dos  $\nu_\mu$  e correspondentes a 258 eventos, mostrou que o *limite de massa* imposto para esses **neutrinos** foi de:  $m < 50 \text{ MeV}/c^2$  (com 99% de CL). Para esses mesmos 258 eventos, foi encontrado que:  $0,999976 c < v < 1,000126 c$ . Registre-se que em 15 de setembro de 2015 (*Physical Review D92*, no. 052005), ainda a MINOS (123 cientistas, com Coelho, Escobar, Gomes e Gouffon) obteve o seguinte resultado:  $v/c - 1 = (1,0 \pm 1,1) \times 10^{-6}$ , consistente com  $v < c$ . (Ricardo Gomes, e-mail, 12/02/2016; [en.wikipedia.org/MINOS](http://en.wikipedia.org/MINOS)).

Segundo vimos acima, as experiências que examinaram a **oscilação de neutrinos** envolvem a medida de **ângulos de mistura** ( $\theta_{ij}$ ). Assim, para os **neutrinos solares**, são medidos:  $\theta_{12}$  [mistura de **neutrinos eletrônicos** ( $\nu_e$ ) e de **muônicos** ( $\nu_\mu$ )]; para os **neutrinos atmosféricos (estelares)**, tem-se:  $\theta_{23}$  [mistura de **neutrinos muônicos** ( $\nu_\mu$ ) e de **tauônicos** ( $\nu_\tau$ )]; e para os **neutrinos nucleares**, medem-se:  $\theta_{13}$  [mistura de **neutrinos eletrônicos** ( $\nu_e$ ) e de **tauônicos** ( $\nu_\tau$ )]. Para a medida de  $\theta_{13}$ , foram realizadas (em 2012) três experiências: *Double Chooz Collaboration* (França), *Daya Bay Collaboration* (China) e *RENO Collaboration* (Coréia). Vejamos os resultados de cada uma delas ([en.wikipedia.org/Double\\_Choosz/Daya\\_Bay/RENO](http://en.wikipedia.org/Double_Choosz/Daya_Bay/RENO)).

A *Double Chooz Collaboration* (DCC) foi um experimento localizado no município de Chooz, região de Ardenes (França perto da Bélgica) e destinado a medir o desaparecimento do **antineutrino eletrônico nuclear** ( $\bar{\nu}_e$ ) cujos fluxos eram produzidos por dois reatores [4,25 GWe (1 GWe =  $10^9$  watts)] da *Chooz Nuclear Power Plant*, oscilação essa medida por um FD (*far detector*) distante de 1.050 m dos reatores e localizado em cavernas de uma colina. Seu objetivo era medir o limite do parâmetro  $\theta_{13}$  (cuja expressão analítica foi registrada na Parte 2), sendo este consistente com a **oscilação** ( $\bar{\nu}_{e(1)} \leftrightarrow \bar{\nu}_{\tau(3)}$ ). Assim, esse limite foi medido (*Physical Review Letters 108*, no. 131801, 28/03/2012) pela DCC, da qual participaram 184 cientistas (físicos e engenheiros), de 36 instituições de pesquisa mundiais: 12 americanas; 07 japonesas; 05 francesas; 05 alemães; 02 russas; 01 espanhola, 01 inglesa e 03 brasileiras [João Carlos Costa dos Anjos (n.1944) (a quem agradeço nesta oportunidade a leitura crítica deste artigo), Ademarlaudo França Barbosa (1963-2012), Rafael Gonçalves Gama (n.1984), Herman Pessoa Lima Jr. (n.1973) e Iuri Muniz Pepe [agora, na *Universidade Federal da Bahia* (UFBA)], do *Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas* (CBPF); Pietro Chimenti, da *Universidade Federal do ABC* (UFABC); Luis Fernando Gomez Gonzalez e Ernesto Kemp, do *Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas* (IF/UNICAMP)]. O resultado obtido nesse experimento foi o seguinte:  $\sin^2(2\theta_{13}) = [0,086 \pm 0,041 \text{ (estatístico)} \pm 0,030 \text{ (sistemático)}]$ , o que corresponde a  $CL \sim 3\sigma$  para  $\theta_{13} \neq 0$ . É oportuno observar que, em setembro de 2014, foi instalado mais um detector (*near detector*) na DCC, distante 400 m dos reatores.

A *Daya Bay Collaboration* (DBC) corresponde a um experimento realizado na península Dapeng, na costa oeste da Baía *Daya*, no sul da China, projetado também para medir o desaparecimento de  $\bar{\nu}_e$  sendo seus fluxos oriundos de seis (6) **reatores nucleares** (2,9 GWe) produzidos pelo *Daya Bay Reactor Neutrino Experiment* (operado por 271 cientistas de 38 institutos de pesquisa: 20 chineses; 16 norte-americanos; 01 russo e 01 techcolosváquio) e examinados por 6 detectores enterrados na profundidade de 1.648 m, nos quais foi medido o  $\theta_{13}$ . Seu resultado (*Physical Review Letters* **108**, no. 171803, 23/04/2012), apresentou o seguinte valor:  $\sin^2(2\theta_{13}) = [0,092 \pm 0,016$  (estatístico)  $\pm 0,005$  (sistemático)] e equivalente a CL = 5,2  $\sigma$  para a existência do  $\theta_{13}$ .

Por fim, a *RENO (Reactor Experiment for Neutrino Oscillations) Collaboration* estabeleceu-se no então *Yeonggwang Nuclear Power Plant* (YNPP) [cujo nome foi mudado para *Hanbit Nuclear Power Plant* (HNPP), em 2013], na província Jeollanam, na Coreia do Sul, com o mesmo propósito das duas anteriores, ou seja, medir o  $\theta_{13}$ . Desse modo, um fluxo de **antineutrinos eletrônicos** ( $\bar{\nu}_e$ ) produzido por seis (6) **reatores nucleares** (2,8 GWe) foi registrado em dois detectores idênticos e distantes, de 294 m e 1.383 m, do complexo YNPP (no qual participaram 34 cientistas de 12 instituições de pesquisa sul-coreanas). Seu resultado (*Physical Review Letters* **108**, no. 191802, 11/05/2012) foi:  $\sin^2(2\theta_{13}) = [0,113 \pm 0,013$  (estatístico)  $\pm 0,019$  (sistemático)] consistente com a oscilação ( $\bar{\nu}_{e(1)} \leftrightarrow \bar{\nu}_{\tau(3)}$ ), sendo este correspondente a CL = 4,9  $\sigma$  para a existência do  $\theta_{13}$ . Para mais informações sobre o tema do PNF/2015, ver: Gustavo do Amaral Valdivieso e Marcelo M. Guzzo, **Compreendendo a Oscilação de Neutrinos**, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, p. 495 (2005); Ricardo Avelino Gomes, **Olhando o Céu do Fundo de um Poço**, *Revista UFG* **8**, p. 101 (2010); e Ricardo Avelino Gomes, **Neutrinos em Tudo que Eu Vejo**, *Revista UFG* **12**, p. 245 (2012).

Antes de concluir esta Parte 3, é interessante registrar dois trabalhos realizados em 2015 e que tratam da massa dos **neutrinos/antineutrinos** e de um possível decaimento deles. Com efeito, em janeiro de 2015 (*Physics Letters* **B740**, p. 345), o Prof. Ricardo Gomes e seus colaboradores, os físicos brasileiros Abner Leonel Gadelha Gomes (n.1990) e Orlando Luís Goulart Peres (n.1969), realizaram um trabalho no qual examinaram os resultados dos experimentos do MINOS e do T2K sobre a relação entre o tempo ( $T_3$ ) de decaimento do  $\nu_3$  (representando os neutrinos massivos 1,2 e 3) e sua massa ( $m_3$ ) considerando **correntes neutras** (envolvendo  $Z^0$ ) e **correntes carregadas** (envolvendo  $W^\pm$ , mediadoras da **interação fraca**), eles encontraram que (considerando  $c = 1$ ):  $T_3/m_3 > 2,8 \times 10^{-12}$  s/eV, com 90% de CL.

Por outro lado, em setembro de 2015 (*Physical Review* **115**, no. 231802) (97 cientistas), a *Borexino Collaboration*, além de confirmar a existência do **neutrino massivo**, estimou o melhor limite da vida média do elétron:  $\tau_e > 6,6 \times 10^{28}$  anos, com 90% de CL [lembrar que:  $\tau_p \approx 10^{29} \pm 1,7$  anos e  $\tau_U \approx (13,73 \pm 0,15) \times 10^6$  anos], caso o

elétron apresentasse o seguinte decaimento [que, no entanto, ainda não foi observado (Ricardo Gomes, *e-mail*, 25/01/2016)]:  $e^- \rightarrow \nu_e + \gamma$ . Denote-se que, se esse decaimento for constatado em futuros experimentos, ele provocará a quebra de mais outro “dogma científico” do MPFPE: - *A carga elétrica não é conservada!*

Para concluir esta Parte 3, destaque-se que os trabalhos sobre os “*misteriosos neutrinos*” e suas *oscilações* continuam como, por exemplo, por parte do FERMILAB e, também, no Brasil, por intermédio de um projeto organizado por vários físicos brasileiros (alguns deles trabalharam na DCC), usando a fonte de *antineutrinos eletrônicos* da *Usina Angra dos Reis II*, projeto esse que será tratado no verbete (Parte 4). No FERMILAB, a linha de feixe NuMI, que fornecia o feixe de *neutrinos* para o experimento *MINOS*, foi modificada para atender ao experimento *NuMI Off-Axis  $\nu_e$  Appearance* (NOvA), a partir de 2013, que tem as seguintes metas a serem atingidas até 2020: 1) *Determinar a hierarquia de massa dos neutrinos*; 2) *Determinar o octante do  $\vartheta_{23}$* ; 3) *Investigar a violação do CP dos léptons*; e 4) *Procurar por possível neutrino estéril*. Essa Colaboração conta com a presença da *Universidade Federal de Goiás* (UFG), sob a coordenação Prof. Ricardo Avelino Gomes e mais dois físicos, o brasileiro Stefano Castro Tognini (n.1987) e a indiana Tapasi Ghosh (n.1981). (Ricardo Gomes, *e-mails* de 15/01/2016, 12/02/2016 e 15/02/2016).



ANTERIOR

SEGUINTE