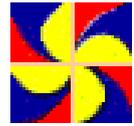




CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br



Oscilação de Neutrinos e o Prêmio Nobel de Física de 2015 (PNF/2015) – Parte 2: Os Trabalhos dos Nobelistas.

Neste verbete, trataremos dos trabalhos dos nobelistas. Assim, iniciemos o mesmo com um breve registro sobre a vida deles. Takaaki Kajita nasceu em 09 de março de 1959, em Higashimatsuyama, Saitama (Japão), tendo concluído seu Ensino Médio (*High School*), no *Saitama Prefectural Kawagoe* e bacharelou-se em Física pela *Saitama Universidade*, em 1981. Depois, foi para a *Universidade de Tóquio (UT)*, para realizar seu Mestrado em Física e, na mesma, defendeu sua Tese de Doutorado, em 1986, sob a orientação do físico japonês Masatoshi Koshiha (n.1926; PNF, 2002), então Diretor do *Institute for Cosmic Ray Research (ICRR/UT)*. Em 1988, Kajita passou a pertencer a esse Instituto, no qual se tornou *Professor Assistente*, em 1992, e *Professor Titular*, em 1999, o que lhe permitiu dirigir o *Center for Cosmic Neutrinos (CCN/ICRR/UT)*. É oportuno destacar que Kajita recebeu os seguintes prêmios (“prizes”): 1) *Asahi Prize*, da *Asahi Shimbun Foundation*, Japão, em 1988; 2) *Bruno Rossi Prize*, da *American Astronomical Society/High Energy Astrophysics*, Estados Unidos da América, em 1989; 3) *Nishina Memorial Prize*, da *Nishina Memorial Foundation*, Japão, em 1999; 4) *W. K. H. Panofsky Prize in Experimental Particle Physics*, da *American Physical Society/Stanford University*, em 2002; 5) *Japan Academy Prize*, em 2012; 6) *Nobel Prize in Physics*, em 2015 [*Discovery of Atmospheric Neutrino Oscillations (Nobel Lecture, 08 de dezembro de 2015)*]; e 7) *Fundamental Physics Prize*, pela *Fundamental Physics Prize Foundation* [fundada pelo físico e empresário russo Yuri Borisovich (Bentsionovich) Milner (n.1961), em julho de 2012], em 2016. (en.wikipedia.org/Kajita).

Arthur (“Art”) Bruce McDonald nasceu em 29 de agosto de 1943, em Sydney, Nova Scotia (Canadá). Na *Dalhousie University* desta sua cidade natal, ele obteve o título de *Bacharel em Física*, em 1964, e o de *Mestre em Física*, em 1965. Seu título de *Doutor em Física* foi-lhe atribuído pelo *California Institute of Technology (CALTECH)*, em 1969, após defender sua Tese intitulada **Excitation Energies and Decay Properties of $T = 3/2$ States in ${}_{8}\text{O}^{17}$, ${}_{9}\text{F}^{17}$ and ${}_{11}\text{Na}^{21}$** , sob a orientação do astrofísico norte-americano William Alfred Fowler (1911-1995; PNF, 1983). Entre 1970 e 1982, McDonald trabalhou no *Chalk River Nuclear Laboratories*, em Ottawa, no Canadá e, entre 1982 e 1989, foi *Professor de Física* da *Princeton University*. Em 1989, ele foi para a *Queen’s University* em Kingston (Ontário, Canadá), na qual rege a *Gordon and Patricia Gray Chair Particle Astrophysics* e, desde 1990, dirige o *Sudbury Neutrino*

Observatory (SNO), que é um detector de água pesada a uma profundidade de 2.100 m, localizado na *Inco Nickel Mine*, em Sudbury, também em Ontário. Note-se que McDonald recebeu destacadas honrarias, tais como: 1) *T. W. Bonner Prize in Nuclear Physics*, da *American Physical Society*, em 2001; 2) *Bruno Pontecorvo Prize in Particle Physics*, Dubna, Rússia, em 2004; 3) *Officer of the Order of Canada*, em 2006; 4) *Benjamin Franklin Medal*, do *Franklin Institute*, Philadelphia, nos Estados Unidos da América, em 2007; 5) *Fellow of the Royal Society*, Inglaterra, em 2009; 6) *Killam Prize in the Natural Sciences*, do *Canada Council*, em 2009; 7) *Henry Marshall Tory Medal*, da *Royal Society of Canada*, em 2011; 8) *Order of Ontario*, em 2012; 9) *Nobel Prize in Physics*, em 2015 [***The Sudbury Neutrino Observatory: Observation of Flavor Change for Solar Neutrinos*** (*Nobel Lecture*, 08 de dezembro de 2015)]; e 10) *Fundamental Physics Prize*, pela *Fundamental Physics Prize Foundation*, em 2016. (en.wikipedia.org/McDonald/Curriculum_Vitae).

Agora, passemos a analisar os trabalhos desses nobelistas. Kajita foi para o ICRR/UT trabalhar com Koshiba, que estudava o espalhamento de **neutrinos/antineutrinos** ($\nu_e/\bar{\nu}_e$) [decorrentes do decaimento de **nucleóns** (p e n)] pelos **elétrons** (e^-) e por **prótons** (p) da água, bem como o decaimento do p. Por exemplo, no caso do espalhamento $\nu_e - e^-$, como a massa do e^- é de 0,5 MeV (no sistema no qual se admite $c = 1$) e considerando que os ν_e têm energia muito mais alta (p.e.: 10 MeV), então, na colisão entre eles, o e^- recua praticamente na direção da incidência do ν_e e, portanto, há uma relação direta entre os espectros energéticos dessas duas partículas. O tempo dessa colisão é: ~ 10 ns (1 ns = 10^{-9} s). Para esse estudo, Koshiba usava a **Radiação de Vavilov-Cherenkov** (RV-C) [descoberta, em 1934, pelos físicos russos Pavel Alekseyvich Cherenkov (1904-1990; PNF, 1958) e Sergey Ivanovich Vavilov (1891-1951), em trabalhos independentes (*Doklady Akademii Nauk SSSR* **2**, p. 451; 457)], segundo a qual uma partícula carregada quando atravessa um meio transparente (de índice de refração n) com uma velocidade V/n maior que a velocidade da luz no vácuo (c) ($V/n > c$), ela perde uma fração de energia na forma de RV-C. Desse modo, por volta de 1980, Koshiba e colaboradores do ICRR construíram um tanque de 3.000 toneladas (t) de água, dotado de um detector *Imaging Water Cherenkov* (IWC), com fotomultiplicadores (construídos e aperfeiçoados pela *Hamamatsu Photonics Company*) e o enterrou na mina de Mozumi, propriedade da *Kamioka Mining and Smelting Company*, na cidade de Hida (antiga Kamioka), em Gifu, no Japão, com 1.000 m de profundidade. Em vista disso, esse experimento foi denominado de KAMIOKANDE, onde NDE significa *Nucleon Decay Experiment*. Contudo, como nesse experimento foram detectados **neutrinos atmosféricos**, NDE passou a ser conhecido como *Neutrino Detection Experiment*. Ainda por volta de 1980, as Universidades de Irvine, Michigan e Brookhaven, sob a liderança do físico norte-americano Frederick Reines (1918-1998; PNF, 1995), construíram o *Nucleon Decay Detector* (IMB/NDD), no terreno da *Morton Salt Mine*, localizada em Cleveland, no

estado de Ohio, nos Estados Unidos. É interessante destacar que, em 1983 (*Nuclear Instruments and Methods* **205**, p. 443), Kajita e os físicos japoneses H. Kume, S. Sawaki, M. Ito, K. Arisaka, A. Nishimura e A. Suzuki descreveram um fotomultiplicador. Note-se que o espalhamento $\bar{\nu}_e - p$ decorre da seguinte reação nuclear: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, sendo o e^+ detectado pela RV-C. Merece destaque o fato de que, o **decaimento do próton** (do tipo: $p \rightarrow e^+ + \pi^0$) foi examinado, também em 1983 (*Physical Review Letters* **51**, p. 27) por Reines e 28 colaboradores, bem como, em 1985 (*Journal of the Physical Society of Japan* **54**, p. 3213), por Koshiba e 12 colaboradores (incluindo Kajita). Nessas duas experiências, foi encontrado um limite superior para o tempo (τ_p) de **decaimento do próton**: $\tau_p > 6,5 \times 10^{31}$ anos.

Com a observação da **supernova** (SN), ocorrida em 23 de fevereiro de 1987, na *Grande Nebulosa de Magalhães*, a hoje conhecida SN1987A, as duas colaborações KAMIOKANDE e IMB/NDD, passaram a detectar os **neutrinos/antineutrinos atmosféricos** oriundos dessa **supernova** observando o seu espalhamento em p e e^- da água. O espalhamento de $\bar{\nu}_e - p$ foi publicado, em 1987, em trabalhos independentes, de Koshiba e 21 colaboradores (incluindo Kajita) (*Physical Review Letters* **58**, p. 1490), e de Reines e 36 colaboradores (*Physical Review Letters* **58**, p. 1494). Observe-se que um resultado importante do experimento KAMIOKANDE foi encontrado, em 1988 (*Physics Letters* **B205**, p. 416), na qual Koshiba e seus 25 colaboradores (incluindo Kajita) anunciaram a descoberta da chamada *Anomalia do Neutrino Atmosférico* (ANA), ao observarem que a razão entre o número de **neutrinos muônicos** [$N(\nu_\mu)$] e o de **neutrinos eletrônicos** [$N(\nu_e)$] era quatro (4) em vez de duas (2) conforme indicava o *Modelo Padrão da Física das Partículas Elementares* (MPFPE), tratado no verbete (Parte 1).

Destaque-se que a observação de **neutrinos eletrônicos** oriundos de uma SN apresenta grande interesse de investigação, pois, durante sua longa viagem até nosso planeta podem ocorrer decaimentos (**oscilações**) permitindo, portanto, estimar um limite mínimo para a vida média dos mesmos.

Desse modo, com o objetivo de realizar novas observações dos **neutrinos atmosféricos**, agora oriundos da SN1987A, em 1988 (*Physical Review* **D38**, p. 448), Koshiba e 23 colaboradores (incluindo Kajita), descreveram a construção de um detector constituído de um grande reservatório de água enterrado no terreno da *Morton Salt Mine*. Com tal detector, eles procuraram medir o decaimento de prótons (p) da água, observando a colisão dos **neutrinos atmosféricos** da SN1987A com a água do detector. Também, em 1988 (*Physical Review Letters* **61**, p. 2522), Reines e 32 colaboradores mediram a vida média (τ_p) do **decaimento do próton**, decorrente da passagem dos **neutrinos atmosféricos** por toneladas de água, e encontraram que: $\tau_p > 10^{32}$ anos. Este mesmo valor e com esse mesmo tipo de experiência, foi encontrado, em 1989 (*Physics Letters* **B220**, p. 308), por Koshiba e 33 colaboradores (incluindo

Kajita). É oportuno destacar que a proposta do **decaimento do próton** decorre da *Teoria de Grande Unificação* (TGU), proposta em 1972 (*Proceedings of the 16th Conference on High Energy Physics*) pelos físicos, o indiano Jogesh C. Pati (n.1937) e o paquistanês Salam e, em 1974 (*Physical Review Letters* **32**, p. 438), pelos físicos norte-americanos Howard Mason Georgi (n.1947) e Glashow. Nessa TGU, τ_p é da ordem de $10^{29} \pm 1.7$ anos, para altas energias ($\sim 10^{15}$ GeV), correspondentes a dimensões da ordem de 10^{-29} cm. Note-se que, segundo a *Teoria do Big Bang* (TBB), a idade do Universo (τ_U) tem o seguinte valor: $\tau_U \approx (13,73 \pm 0,15) \times 10^6$ anos, segundo observação realizada pelo *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) e anunciada em março de 2006.

O espalhamento dos **neutrinos atmosféricos** por elétrons (e^-) da água foi observado, pela primeira vez, em 1989 (*Physical Review Letters* **63**, p. 16), pela colaboração KAMIOKANDE/IMB (liderada por Koshiba e 32 colaboradores, incluindo Kajita) e confirmado em 1990 (*Physical Review Letters* **65**, p. 1297), por essa mesma colaboração, também liderada por Koshiba e 36 colaboradores, ainda com a participação de Kajita.

Em dezembro de 1990, Koshiba preparou um artigo no qual apresentou um projeto para ampliar o KAMIOKANDE. Desta vez, o SUPER-KAMIOKANDE (S-K), como ficou conhecido, teria um tanque de água pura de 50.000 t e seria rodeado por cerca de 11.200 fotomultiplicadores, conforme descrição feita, em 1992, por Koshiba (*Physics Reports* **220**, p. 229) e pelo físico japonês Yoji Totsuka (1942-2008) (*Reports on Progress in Physics* **55**, p. 377). Enquanto esse super detector não foi concluído (o que só aconteceu em 1996), o KAMIOKANDE juntou-se com alguns físicos do IMB e continuaram a busca pelos **neutrinos atmosféricos** e suas **oscilações**, usando a RV-C e o *Standard Solar Model* (SSM), formulado pelo astrofísico norte-americano John Norris Bahcall (1934-2005), a partir de 1962 (ver verbete Parte 1). Assim, essa colaboração KAMIOKANDE/IMB (sob a liderança de Koshiba e a participação ativa de Kajita) divulgou esses resultados: em 1991 (*Physical Review* **D44**, p. 2241) [e mais 37 cientistas (físicos, químicos e engenheiros)], ainda em 1991 (*Physical Review Letters* **65**, p. 1297) (e mais 33 cientistas); em 1992 (*Physical Review* **D45**, p. 2170) (e mais 39 cientistas); em 1994 (*Physics Letters* **B335**, p. 237) (e mais 52 cientistas); e em 1996 (*Physical Review Letters* **77**, p. 1683) (e mais 47 cientistas).

Com a entrada em funcionamento do S-K, em 1996 [iniciando a **Astrofísica do Neutrino/Antineutrino**, na qual foram usados métodos estatísticos constituindo o chamado **gráfico do neutrino** (*neutrino graph*)], novos resultados sobre a **oscilação de neutrinos** foram então encontrados por Koshiba e Kajita, em 1998 (*Physical Review Letters* **81**, p. 1562) (e mais 117 cientistas) e, ainda em 1998 (*Physical Review Letters* **81**, p. 2016), com a colaboração de mais 46 cientistas). Em 1999 (*Physical Review Letters* **82**, p. 1810), Koshiba, Kajita e Reines (e mais 117 cientistas), usaram o

neutrino graph e concluíram que o fluxo de **neutrinos atmosféricos** observado era muito menor do que o previsto pelo SSM. Essa mesma discrepância foi encontrada pelo GNO, em 2000 (*Physics Letters* **B490**, p. 15), em artigo assinado por 30 cientistas, dentre eles o físico norte-americano Burton Richter (n.1931; PNF, 1976). Em 2002, novas observações sobre **neutrinos solares** foram apresentadas pelo SAGE (*Journal of Experimental and Theoretical Physics* **95**, p. 181) (composto de 21 cientistas) e, também, por McDonald e mais 178 cientistas do GNO (*Physical Review Letters* **89**, 011301). Note-se que a importância do trabalho de McDonald foi a de observar a contribuição das **correntes neutras** [que acontecem, por exemplo, em **interações fracas** (envolvendo a partícula Z^0) tipo: $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$] como um argumento a mais que justifica a massa dos **neutrinos/antineutrinos solares** (João dos Anjos, e-mail, de 04/12/2015).

É interessante salientar que, em 1999, foi criada a **T2K Collaboration**, constituída de 508 cientistas de 62 instituições de pesquisa em 12 países (Alemanha, Canadá, Coreia do Sul, Espanha, Estados Unidos da América, França, Inglaterra, Itália, Japão, Polônia, Rússia e Suíça), proposta pelos físicos japoneses Koichiro Nishikawa (n.1947) e Totsuka, tendo aquela Colaboração (sob a direção de Kajita e mais 356 cientistas), em 2013 (*Physical Review* **D88**, no. 072010) observado, por intermédio do S-K, que **neutrinos atmosféricos** [**eletrônicos** ($\nu_{e(1)}$) e **muônicos** ($\nu_{\mu(2)}$)] se transformam em **neutrinos tauônicos** ($\nu_{\tau(3)}$). Nesse experimento, foram encontrados os seguintes valores: $\sin^2(2\theta_{23}) = 1$, $\delta_{CP} = 0$ e $|\Delta m^2_{23}| = 2,4 \times 10^{-3}$ (eV^2/c^4), valores esses que resultam em: $\sin^2(2\theta_{13}) = [0,088^{+0,49}_{-0,039}$ (estatístico + sistemático)], com $3,1 \sigma$ de confiabilidade (*confidence limit* – CL). Registre-se que, em 18 de maio de 2015, por ocasião de um seminário no *KEK High Energy Accelerator Research Organization* (instalado em 1997, em Tsukuba, na Prefeitura de Ibaraki, no Japão), o **T2K Collaboration** anunciou que havia observado a **oscilação de antineutrinos muônicos-tauônicos** com os parâmetros oscilatórios: $\sin^2(2\theta_{\bar{2}\bar{3}})$ e $\Delta m^2_{\bar{2}\bar{3}}$ com as respectivas confiabilidades: 68% e 90%. [Orlando Luís Goulart Peres, **Metamorfose Fantasmagórica** (*Ciência Hoje* **332**, dezembro 2015); en.wikipedia.org/wiki/T2K_Collaboration].

Por sua vez, com o objetivo de detectar **antineutrinos eletrônicos** ($\bar{\nu}_e$), foi construído um novo detector – o *Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector* (KamLAND) – localizado também na *Kamioka Mining*. Ele foi preparado para detectar **antineutrinos** ($\bar{\nu}_e$) (produzidos por **reatores nucleares**), bem como detectar **neutrinos/antineutrinos solares** e **neutrinos/antineutrinos geológicos** - estes provenientes do decaimento radioativo do tório (Th) e do urânio (U) da crosta e do manto terrestres -, assim como a sua **oscilação**. Esse detector é constituído de um balão esférico de aço inoxidável, de 18 m de diâmetro, e contendo em seu interior 1.879 fotomultiplicadores. No interior dessa esfera existe um balão de nylon, de 13 m de diâmetro, cheio de um líquido cintilador composto de 1.000 t de óleo mineral,

benzeno e fluorescentes químicos. Por sua vez, o balão de aço inoxidável é envolvido por um **Detector Vavilov-Cherenkov**, cuja finalidade é a de filtrar os **neutrinos muônicos** (ν_μ) e a de proporcionar blindagem contra a radioatividade das rochas.

A *Colaboração* KamLAND (en.wikipedia.org/wiki/KamLand) começou a funcionar em janeiro de 2002 e, em 17 de janeiro de 2003 (*Physical Review Letters* **90**, 021802), 97 de seus cientistas anunciaram que haviam detectado um fluxo de $\bar{\nu}_e$, com energia $> 3,4$ MeV, oriundos de **reatores nucleares** que se localizavam em uma faixa de 180 km. Já em 2004 (*Physical Review Letters* **92**, no. 071301), o KamLAND (com 90 cientistas) encontrou um limite superior do fluxo de **antineutrinos atmosféricos**, dado por: $3,7 \times 10^2 /(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$. Já a **oscilação de neutrinos** foi observada pelo KamLAND em duas oportunidades: 1) em 2005 (*Physical Review Letters* **94**, no. 081801) (93 cientistas); 2) em 2008 (*Physical Review Letters* **100**, no. 221803) (81 cientistas). Destaque-se que, em 2005 (*Nature* **436**, p. 499), 97 pesquisadores daquela *Colaboração* publicaram o resultado de sua investigação experimental sobre os **neutrinos/antineutrinos geológicos** (www.searadaciencia.ufc.br/bassalo/PNF2002). Como vimos no verbete (Parte 1) os **neutrinos/antineutrinos geológicos** também foram detectados pela *Borexino Collaboration*.

Também é oportuno registrar que, em setembro de 2015 (*Physical Review* **115**, no. 231802) (97 cientistas), a *Borexino Collaboration*, além de confirmar a existência do **neutrino massivo**, observou o seguinte decaimento: $e^- \rightarrow \nu_e + \gamma$, com uma vida média $\tau_e > 6,6 \times 10^{28}$ 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]. Contudo, esse decaimento, que mantém ainda o “dogma científico” de que o γ não possui massa, quebra outro “dogma científico” do MPFPE: - *A carga elétrica não é conservada!*



ANTERIOR

SEGUINTE