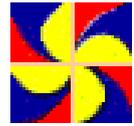




CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br



Oscilação de Neutrinos e o Prêmio Nobel de Física de 2015 (PNF/2015) – Parte 1: Histórico.

O PNF/2015 foi concedido aos físicos: o japonês Takaaki Kajita (n.1959) e o canadense Arthur (“Art”) Bruce McDonald (n.1943) pela descoberta da **oscilação dos neutrinos**, por intermédio de experiências envolvendo os **neutrinos atmosféricos** (produzidos por **raios cósmicos**) (Kajita) e os **neutrinos solares** (McDonald), experiências essas que indicam serem os **neutrinos** possuidores de massa. Neste verbete, trataremos do histórico da descoberta dos **neutrinos** e suas **oscilações**, tomando como base o artigo: **Neutrino Oscillations** (*Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2015, The Royal Swedish Academy of Sciences*), além de outros textos e verbetes da *Wikipédia* e da *Seara da Ciência* e que serão registrados na ocasião devida. Registre-se que esse verbete sobre o PNF/2015, será dividido em quatro partes, constituída de: 1) Histórico; 2) Trabalho dos Nobelistas; 3) Outras Colaborações e a Contribuição de Físicos Brasileiros; e 4) Projeto Brasileiro de Neutrinos.

Inicialmente, vejamos como surgiu a ideia da partícula **neutrino**. Em 1898 (*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **9**, p. 401), o físico neozelandês-inglês Sir Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908) mostrou que os “raios Becquerel” [descobertos pelo físico francês Antoine Henri Becquerel (1852-1908; PNF, 1903), em 1896 [*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l’Académie des Sciences de Paris* (CRHSASP) **122**, p. 420; 501]] eram constituídos de partículas carregadas positivamente [**partículas (raios) alfa** (α), identificada por Rutherford e pelo químico inglês Thomas Royds (1884-1955), em 1909 (*Philosophical Magazine* **17**, p. 281), como o átomo de hélio (He)] e negativamente [**partículas (raios) beta** (β)]. Logo depois, em 1899 (CRHSASP **129**, p. 996; 1205), Becquerel e, posteriormente, em 1900 (CRHSASP **130**, p. 647), o casal Curie [o físico francês Pierre (1859-1906; PNF, 1903) e a física e química polonesa-francesa Marie Sklodowska (1867-1934; PNF, 1903; PNQ, 1911)] mostraram que as **partículas β** eram elétrons (e^-) emitidos por um núcleo A que se transformava em um outro núcleo B. É oportuno registrar que, ainda em 1900 (CRHSASP **130**, p. 1010; 1178), o físico francês Paul Villard (1860-1934) observou a existência de uma “terceira partícula” não-carregada, altamente penetrante e denominada por Rutherford de **raios gama** (γ). Por sua vez, ao estudar o **decaimento β** (*beta decay*), o físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935) estabeleceu, em 1914 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft* **16**, p. 383), que as **partículas β** possuíam um espectro contínuo de energia. Em vista disso, na década de

1920, desenvolveu-se uma questão polêmica relacionada à energia dessas β . Desejava-se saber se essa energia era determinada pelas energias dos núcleos “mãe” e “filho” ou se variava continuamente. Além do mais, havia uma questão objetiva: se um elétron (e^-) é emitido por A, que se transforma em B e esse elétron, tem energia menor do que as energias de repouso desses dois núcleos, para onde vai a energia que está faltando? Essa polêmica foi resolvida pelo físico austro-norte-americano Wolfgang (Ernest) Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945) ao escrever, em 04 de dezembro de 1930, uma carta aos físicos, a sueco-austríaca Lise Meitner (1878-1968) e o alemão Hans (Johannes) Wilhelm Geiger (1882-1945), que participavam da reunião do *Group of Radioactivity of Tübingen*. Nessa carta (intitulada: **To Radioactivity Ladies and Gentlemen**), ele propunha a existência de uma partícula neutra, de massa muito pequena, não excedendo um centésimo da massa do próton, emitida junto com o elétron no **decaimento β** . Note-se que essa proposta foi apresentada por Pauli na Reunião da *Sociedade Americana de Física*, realizada em junho de 1931, em Pasadena, e publicada ainda em 1931 (*Physical Review* **38**, p. 579). Essa *partícula pauliana* foi denominada de **neutrino** (ν) (“nêutron pequenino”, em italiano) pelo físico ítalo-norte-americano Enrico Fermi (1901-1954; PNF, 1938), em 1934 (*Nuovo Cimento* **11**, p. 1; *Zeitschrift für Physik* **88**, p. 161), por ocasião em que formulou a teoria matemática do **decaimento β** , segundo a qual, por intermédio de uma nova força na natureza – chamada mais tarde de **força fraca** – o nêutron (n) transforma-se em um próton (p), com a emissão de um elétron (e^-) e da *partícula pauliana*, ou seja: $n \rightarrow p + e^- + \nu$. Registre-se que, ainda em 1934 (e em trabalhos independentes), o físico italiano Gian Carlo Wick (1909-1992) (*Atti Rendiconti Lincei. Accademia Nazionale dei Lincei* **19**, p. 319) e os físicos, o germano-norte-americano Hans Albrecht Bethe (1906-2005; PNF, 1967) e o inglês Rudolf Ernest Peierls (1907-1995) (*Nature* **133**, p. 532) propuseram o **decaimento (β) inverso**, traduzido pela **reação nuclear**: $p \rightarrow n + e^+ + \nu$, onde e^+ é o **pósitron** que fora previsto pelo físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933), em trabalhos publicados em 1928 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A117**; **A118**, p. 610; 351), como sendo a **antipartícula do elétron** e que foi detectada, em 1932 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A41**, p. 405; *Science* **76**, p. 238), pelo físico norte-americano Carl David Anderson (1905-1991; PNF, 1936). Note-se que, em sua *Nobel Lecture* (12 de dezembro de 1936) (**The Production and Properties of Positrons**), Anderson denominou-a de **pósitron**.

É interessante registrar que, ainda em 1932 (*Nature* **129**, p. 312), Chadwick descobriu o **nêutron** (n) como uma partícula constituinte do **núcleo atômico rutherfordiano**, e que, também em 1932 (*Physical Review* **39**, p. 164; 864; **40**, p. 1), os químicos norte-americanos Harold Clayton Urey (1893-1981; PNQ, 1934), Ferdinand Graft Brickwedde (1903-1989) e George Moseley Murphy (1903-1969), encontraram um isótopo do hidrogênio (${}_1\text{H}^2$), denominado por eles de **dêuteron** (${}_1\text{D}^2$). Merece ainda destaque o fato de que, em 1935 (*Proceedings of the Physical Mathematics Society of Japan* **17**, p. 48), o físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981; PNF, 1949) sugeriu que as

partículas do núcleo atômico (**próton** e **nêutron**) eram mantidas juntas por intermédio de uma **força nuclear** (denominada mais tarde de **força forte**). [Bassalo & Caruso, **Dirac/Fermi/Pauli** (Livraria da Física, 2013)].

Proposto o **neutrino** (ν), restava mostrar a sua existência. Uma das primeiras ideias de sua realidade no Universo aconteceu com o modelo dos **neutrinos solares**, proposto por Bethe e pelo físico norte-americano Charles Louis Critchfield (1910-1994) ao apresentarem, em 1938 (*Physical Review* **54**, p. 248), o famoso **ciclo próton-próton** (${}^1_1\text{H}^1-{}^1_1\text{H}^1$) (CPP) como gerador de energia das estrelas tão (ou menos) massivas quanto o Sol, obedecendo a uma **reação nuclear** em que dois **prótons** (${}^1_1\text{H}^1$) colidem formando o ${}^2_1\text{D}^2$, com a emissão do e^+ e do ν [devido ao **decaimento (β) inverso** e denominado então de **neutrino estelar**]. Em seguida, o ${}^2_1\text{D}^2$ colide com um ${}^1_1\text{H}^1$ formando um isótopo do hélio (${}^3_2\text{He}^3$) e emitindo γ . Por fim, dois ${}^3_2\text{He}^3$ colidem, formando o ${}^4_2\text{He}^4$, reproduzindo os dois ${}^1_1\text{H}^1$ (daí o CPP) e mais 24,7 MeV [1 MeV = 10^6 eV, sendo 1 eV a energia eletrostática de um elétron (e) sob a diferença de potencial de 1 volt (V)] de energia. É interessante frisar que, ainda em 1938 (*Physikalische Zeitschrift* **39**, p. 633), o físico alemão Barão C(K)arl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007) propôs o outro famoso **ciclo carbono-nitrogênio-oxigênio** (CCNO) como gerador de energia (24,7 MeV) das estrelas mais massivas do que o Sol, ciclo esse confirmado por Bethe, em 1939 (*Physical Review* **55**, p. 434). Outra evidência do **neutrino solar** foi apresentada, em 1941 (*Physical Review* **59**, p. 539), pelos físicos, o russo-norte-americano George Antonovich Gamow (1904-1968) e o brasileiro Mário Schenberg (1914-1990) ao publicarem um famoso trabalho para explicar o mecanismo do **colapso estelar**. Segundo eles, quando o centro de uma estrela atinge uma densidade muito alta, começa a haver a captura de elétrons (e^-) por parte dos prótons (p), que se transformam em nêutrons (n) e emitem **neutrinos** (ν), numa **reação nuclear** decorrente do **decaimento (β) inverso** e caracterizada por: $p + e^- \rightarrow n + \nu$. Portanto, esse mecanismo [denominado por eles de **Ultra Rapid Catastrophe (processo URCA)**] é o que causa a fuga de **neutrinos estelares** que provoca o resfriamento estelar e, conseqüentemente, o seu **colapso**.

Desse modo, a detecção do hipotético **neutrino** poderia ocorrer em experiências envolvendo a sua captura por nêutrons ($\nu + n \rightarrow p + e^-$) conforme foi sugerido pelo físico ítalo-inglês-russo Bruno Maximovitch Pontecorvo (1913-1993), em 1946 (*Chalk River Laboratory Report PD-205*). Assim, segundo Pontecorvo, a captação de ν [solares ou de reações de **fissão nuclear** ocorrida em reatores como, por exemplo, o *Brookhaven National Laboratory* (BNL), localizado em Upton, New York, criado em 1947] pelo cloro (${}^{37}_{17}\text{Cl}$) produziria o argônio (${}^{37}_{18}\text{Ar}$), com a emissão da β (e^-), acompanhado de um recuo do Cl. Logo depois, em 1947 (*Physical Review* **72**, p. 246), Pontecorvo propôs um novo tipo de **captura de neutrinos por nêutrons**, com a produção de “elétrons pesados” [nova partícula fortemente ionizante e com massa em torno de 200 vezes a massa do elétron (m_e), descobertos, em 1937, em experiências

independentes realizadas pelos físicos, os norte-americanos Anderson e Seth Henry Neddermeyer (1907-1988) (*Physical Review* **51**, p. 884); e Jabez Curry Street (1906-1989) e Edward Carl Stevenson (n.1907) (*Physical Review* **51**, p. 1005) e denominados, posteriormente, de **múons** (μ^-), em reação do tipo: $\nu + n \rightarrow p + \mu^- \rightarrow p + e^- + \gamma$. Contudo, em 1948 (*Physical Review* **73**, p. 257; 1122), o físico canadense E. P. (“Ted”) Hincks e Pontecorvo não confirmaram o decaimento desse “elétron pesado” proposto por Pontecorvo, ou seja: $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$. Note-se que, também em 1948 (*Reviews of Modern Physics* **28**, p. 278), o físico norte-americano Horace Richard Crane (1907-2007) apresentou uma revisão sobre o **neutrino** e sua possível detecção. É oportuno destacar que, ainda em 1948 (*Centennial Meeting of the American Association for Advancement of Science*) e, em 1949 (*Reviews of Modern Physics* **21**, p. 144; 153), os físicos, o norte-americano John Archibald Wheeler (1911-2008) e o brasileiro Jayme Tiomno (1920-2011) demonstraram que o decaimento do μ^- envolve dois **neutrinos**, por intermédio da reação: $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_1 + \nu_2$. Note-se que, também em 1948 (*Nuovo Cimento* **5**, p. 587), o físico italiano Giampietro Puppi (1917-2006) havia previsto esse decaimento para o μ^- , daí esse mecanismo haver sido conhecido como o **Triângulo de Puppi-Wheeler-Tiomno** (TP-W-T) [John Archibald Wheeler e Kenneth William Ford, **Geons, Black Holes & Quantum Foam: A Life in Physics** (W. W. Norton, 1998)]. É oportuno registrar que o **múon** (μ^-) é resultante do decaimento do **píon** (π^-), como inicialmente foi observado, em 1947 (*Nature* **159**, p. 694), na famosa experiência realizada pelos físicos, os ingleses Sir Cecil Frank Powell (1903-1969; PNF, 1950) e Hugh Muirhead (1925-2007), o italiano Giuseppe Pablo Stanislao Occhialini (1907-1993) e o brasileiro César (Cesare) Mansuetto Giulio Lattes (1925-2005), na qual mostraram que os **raios cósmicos** [basicamente, **prótons** (p)] ao colidirem com a atmosfera (contendo também p), produziam dois tipos de **mésons carregados**: “**primário**” [hoje: **píon** ($\pi^{+,0}$)] e “**secundário**” [hoje: **múon** ($\mu^{+,0}$)], sendo este decorrente do decaimento do “**primário**”, em uma **reação nuclear** e hoje caracterizada como sendo do tipo: $p + p = p + n + \pi^+$, com: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$.

A produção de novas partículas por intermédio da colisão de **raios cósmicos** com a atmosfera foi também observada, em 1947 (*Nature* **160**, p. 855), pelos físicos ingleses George Dixon Rochester (1908-2001) e Clifford Charles Butler (1922-1999), ocasião em que encontraram trajetórias em forma de V oriundas de uma origem comum, daí as denominaram de **partículas V**. Tais partículas apresentavam um comportamento “estranho”, pois elas são produzidas por **força (interação) forte** (vida média $\sim 10^{-23}$ s), entre **píons** (π) e **nucleóons** (p e n) [este nome foi cunhado pelo físico dinamarquês Christian Möller (1904-1980), em 1941 (*Köngelise Danske Videnskab Selskab Matematisk-Fysiske Meddelanden* **18**, p.3)] e decaíam por **força (interação) fraca** (vida média $\sim 10^{-10}$ s). Nas décadas de 1950 e 1960, novas **partículas “estranhas”** [algumas delas depois conhecidas como **mésons káons** ($K^{+,0}$)] foram produzidas em laboratórios mundiais: *Stanford Linear Accelerator Center* (SLAC) (Estados Unidos); *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN) (Suíça/França); *Fermi National*

Accelerator Laboratory (FERMILAB) (Estados Unidos); *Frascati National Laboratory* (FrNL) (Itália); BNL etc.

Voltemos aos **neutrinos**. Na primavera de 1948, o físico norte-americano Raymond Davis Junior (1914-2006; PNF, 2002) foi trabalhar no *Departamento de Química* do BNL e, ao se apresentar ao seu Diretor, o químico norte-americano Richard W. Dodson (1915-2002), perguntou-lhe o que esperava de seu apresentador. Para sua surpresa, Dodson mandou que Davis Junior fosse à Biblioteca e procurasse um tema de pesquisa. Assim, encontrou o artigo de Crane e, ao lê-lo, viu a possibilidade de “detectar” **neutrinos** por intermédio da reação envolvendo cloro e argônio (Cl-Ar). Assim, em 1951, Davis Junior passou a usar os ν do reator *Brookhaven Graphite Research Reactor* (BGRR), do BNL enviando-os para um tanque de 3.800 litros (ℓ) contendo tetracloreto de carbono (CCl_4). Contudo, não houve produção de argônio como era esperado, pois os reatores emitem **antineutrinos** e não **neutrinos**, como será esclarecido mais adiante. Em 1952 (*Physical Review* **86**, p. 976), Davis Junior usou a proposta de Pontecorvo sobre o recuo de um núcleo ao receber o ν , porém, trabalhou com a reação lítio-berílio: ${}_3\text{Li}^7 + \nu \leftrightarrow {}_4\text{Be}^7 + e^-$ (lembrar que: $\nu + n \leftrightarrow p + e^-$), na qual um feixe de ν com a energia de 0,862 MeV provoca um recuo do Li com a energia característica de 57 eV. Note-se que essa reação também pode ser interpretada como a **captura de elétrons** pelo Be, produzindo o Li e um feixe de ν com a energia de 0,862 MeV, conforme Davis Junior considerou. É interessante destacar que P. B. Smith e J. S. Allen já haviam realizado uma experiência desse tipo, antes, em 1951 (*Physical Review* **81**, p. 381). É oportuno registrar que o uso do CCl_4 como detector de **neutrinos** foi proposto, pela primeira vez, em 1945, pelo físico-químico francês Jules Guéron (1907-1990) [Frank Close, **HALF-LIFE: The Divided Life of Bruno Pontecorvo, Physicist or Spy** (Basic Books, 2015)].

Em 1953 (*Physical Review* **92**, p. 1045), os físicos norte-americanos Emil John Konopinski (1911-1990) e Hormoz Massou Mahmoud (n.1918) mostraram que a **partícula pauliana** era uma antipartícula, o hoje **antineutrino do elétron** ($\bar{\nu}_e$). Observe-se que esse trabalho permitiu reconhecer os **neutrinos** propostos por Wheeler e Tiomno (ν_1 e ν_2) como sendo: $\bar{\nu}_e$ e ν_μ . É interessante registrar que, desde 1945, o físico norte-americano Frederick Reines (1918-1998; PNF, 1995) tentava observar a **partícula pauliana** sem, contudo, lograr êxito. Em 1951, ao entrar de licença sabática de seu emprego no *Laboratório de Los Alamos*, Reines convidou seu colega, o também físico norte-americano Clyde Lorrain Cowan Junior (1919-1974), para irem à busca daquela partícula e que foi denotada por Reines como ν_- . Inicialmente, eles consideraram a hipótese de usar os testes de bombas atômicas como fonte de **neutrinos**, mas logo decidiram estudar a colisão de um fluxo de “neutrinos-menos” (ν_-) oriundos do **decaimento β** (conhecido, na época, como β_- e que era o **elétron**) produzido pelo reator do *Hanford Engineering Works* (HEW), situado em

Washington, com prótons (p) de um cintilador líquido, em uma reação nuclear do tipo: $\nu + p \rightarrow n + \beta^+$, com β^+ representando o **pósitron** (e^+). Estes, por sua vez, ao encontrarem **elétrons** livres do fluido do cintilador, se aniquilavam e se transformavam em fótons, responsáveis, portanto pela cintilação. O resultado dessa experiência foi apresentado por Reines e Cowan, em 1953 (*Physical Review* **92**, p. 830).

Ressalte-se que, em sua experiência (Cℓ-Ar) de 1951, Davis Junior observou que o BGRR/BNL não era uma forte fonte de $\bar{\nu}$ para realizar a reação Cℓ-Ar, e considerando o sucesso de Reines e Cowan com o HEW, em 1954, Davis Junior pensou em utilizar o *Savannah River Nuclear Reactor* (SRNR), localizado na Carolina do Sul e que, naquele momento, era a fonte mais intensa de ν . Desse modo, na base deste reator, ele voltou a usar o tanque de 3.800 ℓ contendo CCl₄ e, como no caso da experiência realizada no BGRR/BNL Davis Junior não conseguiu mostrar a identidade **neutrino-antineutrino**, pois encontrou que as taxas de captura de ν e de $\bar{\nu}$ por parte do Cℓ, eram diferentes, numa relação de 1/5. Em vista disso, em 1955 (*Physical Review* **97**, p. 766), Davis publicou um artigo no qual discutiu apenas a possibilidade de detectar **antineutrinos** oriundos de reatores por intermédio da reação Cℓ-Ar. Observe-se que, em 1956 (*Science* **124**, p. 103) e em 1960 (*Physical Review* **117**, p. 159), Cowan, Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse e A. D. McGuire confirmaram o resultado da experiência de 1953, usando um tanque de ½ m³ de água para detectar o seu ν proveniente do SRNR. Note-se que, em 1958 (*UNESCO Conference, Paris* **1**, p. 728), Davis Junior voltou a usar o SRNR, usando um tanque de 11.400 ℓ contendo CCl₄ e, desta vez, encontrou uma relação de 1/20 entre as taxas de **neutrino/antineutrino**.

Destaque-se que, em 1957 (*Nuovo Cimento* **5**, p. 299), o físico paquistanês Abdus Salam (1926-1996; PNF, 1979) aventou a hipótese de o **neutrino eletrônico** (ν_e) possuir massa em seu artigo sobre a **quebra da paridade na interação fraca**, confirmando essa **quebra** [esta havia sido descoberta, em 1956 (*Physical Review* **102**, p. 290; **104**, p. 254), pelos físicos sino-norte-americanos Tsung-Dao Lee (n.1926; PNF, 1957) e Chen Ning Yang (n.1925; PNF, 1957)]. É oportuno registrar que, em 1971 (*Lettere al Nuovo Cimento* **1**, p. 252), o físico brasileiro Mario Novello (n.1942), propôs que um mecanismo gravitacional era capaz de gerar a massa dos **neutrinos**, bem como a de outros **férmions** [Mario Novello, **A massa do neutrino** (*Scientific American Brasil* **163**, p. 21, dezembro de 2015; Bassalo & Caruso, **Salam** (em preparação)].

Os dois **neutrinos** [inicialmente associados ao **elétron** (ν_e) e ao **múon** (ν_μ)] previstos pelo TP-W-T foram deduzidos em experiências independentes conduzidas, em 1957, pelos físicos norte-americanos Richard Lawrence Garwin (n.1928), Leon Max Lederman (n.1922; PNF, 1988) e Marcel Weinrich (1927-2008) (*Physical Review* **105**, p. 1415) e pelos físicos, o norte-americano Jerome Isaac Friedman (n.1930; PNF, 1990) e o suíço Valentine Louis Teledgi (n.1922) (*Physical Review* **105**, p. 1681). Por sua vez, em 1960, Pontecorvo e o físico norte-americano Melvin Schwartz (1932-2006; PNF, 1988)

(*Soviet Physics – JETP* **10**, p. 1236) e, independentemente, Lee e Yang (*Physical Review Letters* **4**, p. 306; 307) propuseram um tipo de experiência para a produção de ν_μ em decorrência do decaimento do π^+ , ou seja: $p + p \rightarrow p + n + \pi^+ (\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu)$. De posse desses neutrinos, Schwartz e os físicos norte-americanos Lederman, Jack Steinberger (n.1921; PNF, 1988), Gordon Danby, Jean-Marc Gaillard, Konstantin Goulianos e Nariman B. Mistry, realizaram uma experiência no *ciclotron Nevis* do BNL, em 1962 (*Physical Review Letters* **9**, p. 36), na qual comprovaram a existência do ν_μ , bem como confirmaram a existência dos **neutrinos/antineutrinos** associados ao **elétron** ($\nu_{e^-/+}$) e ao **múon** ($\nu_{\mu^-/+}$), em reações dos tipos: $p + \nu_{e^+} \rightarrow n + e^+$; $n + \nu_{e^-} \rightarrow p + e^-$; $p + \nu_{\mu^+} \rightarrow n + \mu^+$ e $n + \nu_{\mu^-} \rightarrow p + \nu_{\mu^-}$. É oportuno salientar que a existência de $\nu_{e^-/+}$ e $\nu_{\mu^-/+}$ foi confirmada no CERN, em 1964 (*Physics Letters* **12**, p. 281; **13**, p. 80; 86), em experiências, envolvendo 37 cientistas (físicos, químicos e engenheiros), dentre os quais o físico brasileiro Roberto Aureliano Salmeron (n.1922).

Por fim, vejamos a descoberta do terceiro **neutrino**. Para entendê-lo, façamos um pequeno resumo histórico. Como vimos acima, durante as décadas de 1930, 1940, 1950 e 1960, várias partículas elementares (carregadas e neutras) foram descobertas. Em vista disso, foi necessário fazer uma classificação delas e, também, formular um modelo matemático para entender a sua Dinâmica, o hoje conhecido *Modelo Padrão da Física das Partículas Elementares* (MPFPE), desenvolvido entre 1970 e 1973. Assim, de um modo geral, as partículas elementares constituintes da matéria classificam-se em: **hádrons** e **léptons**. Os **hádrons** (do grego *adros*, que significa “grosso e volumoso”), nome cunhado pelo físico russo Lev Borisovich Okun (n.1929), em 1962 (*Proceedings of the Internacional Conference on High Energy Physics 1962*, CERN, p. 845), são partículas que sofrem os quatro tipos de força (interação): **gravitacional**, **eletromagnética**, **fraca** e **forte**, e são de dois tipos: **bárions** e **mésons**. Os **bárions** (do grego *barys*, que significa “pesado”), cujo nome foi cunhado pelo físico e historiador da ciência, o holandês-norte-americano Abraham Pais (1918-2000), em 1954 (*Proceedings of the Internacional Conference on Theoretical Physics 1954*, Kyoto, p. 157), são **férmions** [que satisfazem a *Estatística de Fermi-Dirac* (1926)], formados por três **quarks** [introduzidos pelo físico norte-americano Murray Gell-Mann (n.1929; PNF, 1969), em 1964 (*Physics Letters* **8**, p. 214)] e se juntam em duas categorias: **nucleóons** e **hyperons**. O termo **nucleón** (p, n) foi introduzido em 1941, por Möller, como já frisamos, e os **hyperons** (do grego *iper*, que significa “super”, “acima” ou “além de”), termo introduzido pelo físico francês Louis Leprince-Ringuet (1901-2000), em 1953 (*Annual Review of Nuclear Science* **3**, p. 39), representam as partículas com massa intermediária entre **nucleóons** e **píons**. Note-se que, por essa ocasião, ainda não se sabia que os **píons** tinham massa inferior a dos **nucleóons** e que estes também tinham massas inferiores a dos **hyperons**. Por sua vez, os **mésons** [do grego *meso*, que significa “médio” e que receberam essa denominação, em 1939, em trabalhos independentes, dos físicos, o inglês Charles Galton Darwin (1887-1962) (*Nature* **143**, p. 276) e o indiano

Homi Jehangir Bhabha (1909-1966) (*Nature* **143**, p. 602)], são **bósons** [que satisfazem a *Estatística de Bose-Einstein* (1924)], formados por um par **quark/antiquark**. Os **léptons** (do grego *leptos*, que significa “fino” ou “pequeno”), são **férmions** e não sofrem **interação forte**, e tiveram seu nome cunhado por Möller e Pais, em 1946, para representar qualquer partícula de massa pequena como o **elétron** e o **neutrino**. [Abraham Pais, **Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World** (Oxford University Press, 1995)].

Nesta oportunidade, é interessante pausar a história da descoberta do terceiro **neutrino** e fazer uma observação sobre as leis de conservação (que decorrem do MPFPE) que regem as reações nucleares. Além da conservação da energia, do momento linear e do momento angular, oriundos da Física Clássica, a descoberta das partículas elementares levou à introdução de novas leis de conservação, das quais destacaremos duas: 1) *Lei de Conservação do número bariônico* (B) e vale (B = + 1) para os **bárions** e (B = - 1) para os **antibárions**, e B = 0, para as demais partículas; 2) *Lei de Conservação do número leptônico* (L) e vale (L = + 1) para os **léptons** e (L = - 1) para os **antiléptons**, e L = 0, para as demais partículas. É por causa delas que se explicam as seguintes reações: $\nu_e + n \leftrightarrow p + e^-$ e $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$, pois p e n são **bárions** (B = + 1), e^- e ν_e são **léptons** (L = + 1), e e^+ e $\bar{\nu}_e$ são **antiléptons** (L = - 1).

Continuemos com a história da descoberta do terceiro **neutrino**. Como destacamos acima, na primeira metade da década de 1970, só se conheciam dois tipos de **léptons** [**eletrônico** (e^-) e **muônico** (μ^-)], com seus respectivos **neutrinos/antineutrinos** ($\nu_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu$). Contudo, o MPFPE previa a existência de mais um **lépton/antilépton** e seu respectivo **neutrino/antineutrino**, uma vez que o trabalho de Gell-Mann, de 1964 (referido acima), previa a existência de três **quarks**. Desse modo, se iniciou a busca do terceiro **lépton**, e seu companheiro **neutrino**. Assim, em outubro de 1975 (*Physical Review Letters* **35**, p. 1489), uma equipe de pesquisadores do SLAC, sob a liderança do físico norte-americano Martin Lewis Perl (n.1927; PNF, 1995), realizou uma experiência na qual estudaram a colisão **elétron-pósitron** ($e^- - e^+$), com a produção anômala de **elétrons** (e) e de **múons** (μ). Essa produção decorria do decaimento de uma nova partícula, a princípio denominada de U, inicial da palavra **unknown** (“desconhecido”, em inglês), decorrente da reação: $e^- + e^+ \rightarrow U^- + U^+$, com o seguinte modo de decaimento de U: $U \rightarrow \mu(e) + \bar{\nu}_\mu(\bar{\nu}_e) + \nu_U$. Ainda em 1975, Perl e seu estudante de pós-graduação, o físico grego Petros Afentoulis Rapidis (n.1951), sugeriram o nome **tau** (τ), inicial da palavra τριτων (“triton”, terceiro em grego), para esse terceiro **lépton** (“pesado”), com a massa aproximada entre 1,6 e 2,0 GeV/c² (1 GeV = 10³ MeV) [Martin Lewis Perl, **Reflections on the Discovery of the Tau Lepton** (*Nobel Lecture*, 08 de dezembro de 1995)]. Essa partícula foi comprovada por Perl [e mais 36 físicos, dentre eles Rapidis e o norte-americano Burton Richter (n.1931; PNF, 1976)], em 1976 (*Physics Letters* **B63**, p. 466). Hoje, existem o τ^+ e sua

antipartícula τ^- , com a massa aproximada de $1,77 \text{ GeV}/c^2$, bem como seus respectivos **neutrinos** (ν_τ) e **antineutrinos** ($\bar{\nu}_\tau$), de acordo com o MPFPE (porém, eles não possuem massa), segundo o qual, em qualquer membro de uma reação nuclear, todo **lépton (antilépton)** é acompanhado de seu **antineutrino (neutrino)** correspondente. [Martinus Veltman, **Facts and Mysteries in Elementary Particles** (World Scientific, 2003); Maria Cristina Batoni Abdalla, **O Discreto Charme das Partículas Elementares** (EdUNESP, 2006)].

Em seguida, trataremos da descoberta dos **neutrinos solares** e ver como foram observadas suas **oscilações**. Segundo anotamos acima, no artigo de 1955, Davis Junior examinou a possibilidade de detectar **antineutrinos** oriundos de reatores por intermédio da reação Cℓ-Ar, bem como a possibilidade de construir detectores para medir o fluxo de **neutrinos solares** liberados nos CPP e CCNO. Mais tarde, em 1958 (*Physical Review* **113**, p. 1556), H. D. Holmgren e R. L. Johnston investigaram a produção de **neutrinos** em reações nucleares do tipo: ${}_2\text{He}^3 + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_4\text{Be}^7 + \gamma$ e, também, do tipo: $e^- + {}_4\text{Be}^7 \rightarrow {}_3\text{Li}^7 + \nu_e$. Ainda em 1958, em trabalhos independentes, os físicos norte-americanos Alastair Graham Walter Cameron (1925-2005) (*Bulletin of the American Physical Society* **3**, p. 227; *Annual Review of Nuclear Science* **8**, p. 299) e William Alfred Fowler (1911-1995; PNF, 1983) (*Astrophysical Journal* **127**, p. 551) conjecturaram que o processo de geração de energia nas estrelas do tipo do Sol (solares) deve-se a reações nucleares do tipo: ${}_4\text{Be}^7 + p \rightarrow {}_5\text{B}^8 + \gamma$, seguida de: ${}_5\text{B}^8 \rightarrow {}_4\text{Be}^8 + e^+ + \nu_e$. Como nesses artigos havia a possibilidade de usar os ν_e para produzir a reação Cℓ-Ar, Davis Junior construiu um tanque de 3.800 ℓ de percloroetileno (C_2Cl_4) na *Barberton Limestone Mine*, em Ohio. Contudo, não houve nenhum sinal de ν_e produzido pelo Ar.

Continuemos com a história dos **neutrinos solares** (e suas **oscilações**). Um dos primeiros modelos sobre a produção da energia estelar foi apresentado, em 1958, pelo físico alemão Martin Schwarzschild (1912-1997) em seu livro intitulado **Structure and Evolution of the Stars** (Princeton University Press). Posteriormente, a partir de 1962, o astrofísico norte-americano John Norris Bahcall (1934-2005) desenvolveu o *Modelo Padrão Solar* [*Standard Solar Model* (SSM)] sobre o fluxo de **neutrinos solares** (NS) ao demonstrar que a taxa de emissão de ν_e pelo boro-8 (${}_5\text{B}^8$) era 20 vezes mais alta do que o valor previamente esperado, com energia máxima de 14,06 MeV. Em vista disso, Davis Junior planejou uma experiência do tipo Cℓ-Ar e, depois de trocar cartas com J. N. Bahcall resolveram publicar seus resultados, em 1964: o teórico de Bahcall (*Physical Review Letters* **12**, p. 300) e o experimental de Davis Junior (*Physical Review Letters* **12**, p. 303). Contudo, para que a experiência tivesse sucesso, era necessário que o tanque de C_2Cl_4 fosse bem enterrado.

Desse modo e com essa ideia em mente e ainda contando com o suporte do BNL e do *Council of Economic Advisers* dos Estados Unidos (CEA/US), Davis Junior

iniciou, em 1965, o planejamento de uma experiência do tipo Cℓ-Ar, usando um tanque de 378.000 ℓ de C₂Cℓ₄ e que foi enterrado na *Homestake Gold Mine*, em Lead, Dakota do Sul, a uma profundidade de 1.478 m e este experimento se tornou operacional em 1967. Os primeiros resultados dessa experiência foram publicados em 1968 (*Physical Review Letters* **20**, 1205), no artigo assinado por Davis Junior, D. S. Harmer e K. C. Koffman, no qual relataram que haviam encontrado um limite superior para o fluxo de ν_e bem abaixo do previsto, ou seja: 3 SNU [1 *Solar Neutrino Unit* (SNU) = 10⁻³⁶ capturas por segundo e por núcleo absorvedor], uma vez que, ainda em 1968 (*Physical Review Letters* **20**, 1209), J. N. Bahcall, Nata A. Bahcall e G. Shaviv demonstraram, usando o SSM, que aquele limite era de: (7,5 ± 3) SNU. É interessante registrar que, em 1973 (*Monthly Notices of Royal Astronomical Society* **163**, p. 331), A. J. R. Prentice explicou que os NS eram devidos às inhomogeneidades da composição do Sol; por exemplo, enquanto o hidrogênio (H) era queimado em suas partes mais externas, o caroço solar era composto de hélio (He). Por sua vez, também, em 1973 (*Nature* **246**, p. 33), P. Demarque, J. G. Mengel e A. V. Sweigart sugeriram que os NS estavam relacionados com o fato de que o interior do Sol gira mais rápido que o seu exterior.

Em 1984, Davis Junior deixou o BNL e transferiu o *Experimento Homestake* para a *Universidade da Pensilvânia*, e continuou a realizar trabalhos, com novos colaboradores. Assim, em 1987, Davis Junior organizou uma colaboração com físicos soviéticos, conhecida como *Soviet-American Gallium Experiment* (SAGE), com o objetivo da medição rádioquímica do fluxo de **neutrino eletrônico solar** baseada na seguinte reação $\nu_e + {}_{31}\text{Ga}^{71} \rightarrow e^- + {}_{32}\text{Ge}^{71}$ (lembrar que: $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$), na qual a presença do **neutrino eletrônico solar** (ν_e) é evidenciada pelo decaimento do germânio radioativo (${}_{32}\text{Ge}^{71}$), que tem uma vida média de 11,43 dias. O alvo para essa reação era um tanque contendo 50-57 toneladas (t) do líquido metálico de gálio (Ga) enterrado no *Baksan Neutrino Observatory* (BNO), nas montanhas do Cáucaso, na Rússia. Desse modo, em 1991 (*Physical Review Letters* **67**, p. 3332), Davis Junior e seus 27 colaboradores do SAGE apresentaram seus primeiros resultados. Novos resultados foram publicados, em 1999 (*Physical Review Letters* **83**, p. 4686), por Davis Junior e 24 colaboradores. Desde que o SAGE funcionou, de janeiro de 1990 até dezembro de 2007, foram realizados 168 experimentos, cujos resultados apresentavam a mesma discrepância (cerca de 1/3) entre os valores medidos do fluxo de ν_e e os previstos pelo SSM desenvolvido por J. N. Bahcall, desde 1962 (como vimos acima), modelo esse que foi refinado nos seguintes trabalhos: J. N. Bahcall, Nicola Cabibbo (1935-2010) e A. Yahil, *Physical Review Letters* **28**, p. 316 (1972); J. N. Bahcall, W. F. Huebner, S. H. Lubow, P. D. Parker e R. K. Ulrich, *Reviews of Modern Physics* **54**, p. 767 (1982); J. N. Bahcall e o físico norte-americano Sheldon Lee Glashow (n.1932; PNF, 1979), *Nature* **326**, p. 476 (1987); J. N. Bahcall, W. D. Arnett, R. P. Kirshner e S. E. Woosley, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **27**; p. 629 (1989); J. N. Bahcall, **Neutrino Astrophysics** (World Scientific, 1989); J. N. Bahcall, K. Lande, R. E. Lanou, J. G. Learned,

R. G. H. Robertson e Lincoln Wolfenstein, *Nature* **375**, p. 29 (1995); J. N. Bahcall, M. H. Pinsonneault, S. Basu e J. Christensen-Dalsgaard, *Physical Review Letters* **78**, p. 171 (1997); J. N. Bahcall, *Physical Review* **C56**, p. 3391 (1997); J. N. Bahcall, Plamen I. Krastev e o físico russo Alexei Yuryevich Smirnov (n.1951), *Physical Review* **D58**, n. 096016 (1998); J. N. Bahcall, Krastev e Smirnov, *Physical Review* **D60**, n. 093001 (1999); Bahcall, Pinsonneault e Basu, *Astrophysical Journal* **555**, p. 990 (2001). É interessante destacar que, além do Ga, o SAGE usou também o cromo ($^{51}_{24}\text{Cr}$) como fonte de **neutrinos**, cuja energia do fluxo é similar a dos **neutrinos solares** do ^7_4Be , e que os resultados dessas experiências, realizadas entre 2002-2007, podem ser vistos nos artigos publicados em 2009: *Physical Review* **C80**, n. 015807; *arXiv*: 0901.2200 (en.wikipedia.org/wiki/SAGE).

Paralelamente a esse trabalho no SAGE, Davis Junior continuou com suas experiências no *Homestake*. Com efeito, em 1998 (*Astrophysical Journal* **201**, p. 505), Davis Junior e mais 07 colaboradores mediram o fluxo de **neutrinos solares** usando a reação $\text{Cl}-\text{Ar}$ e o detector de C_2Cl_4 . Mais detalhes do trabalho de Davis Junior, ver sua *Nobel Lecture: A Half-Century with Solar Neutrinos* (08 de dezembro de 2002; *e-Nobel Museum*).

É oportuno ressaltar que a discrepância de 1/3, entre os valores medidos de fluxos de ν_e e os previstos pelo SSM, também foi encontrada em experiências realizadas pelo *Gallium Experiment* (GALLEX) e pelo seu sucessor, o *Gallium Neutrino Observatory* (GNO), das quais trataremos em outro verbete (Parte 2). Esses experimentos foram idealizados pelo *Laboratori Nazionali del Gran Sasso* (LNGS) [criado pelo *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare* (INFN)] e localizados na montanha de Gran Sasso, de 2.912 m de altura, na província de Abruzzo, da cidade de L'Aquila, Itália, para detectar **neutrinos solares** de baixa energia [com um limite superior de 233,2 keV (1 keV = 10^3 eV)]. Note-se que essa colaboração internacional usou um tanque de 54 m³ cheio de 101 t de uma solução ácida de triclorido-hidroclórico (Cl_3HCl), contendo 30,3 t de Ga. Nesses experimentos, também foi possível detectar **neutrinos solares** do ciclo CPP, com um limite superior de 0,420 MeV.

Durante o período (1971-1997) em que o GALLEX funcionou, seu detector mediu uma taxa total de 77,5 SNU, com um decaimento médio diário de 0,75. Das experiências realizadas por essa colaboração internacional de físicos, destaquemos as de 1992 (*Physics Letters* **B285**, p. 376), realizadas por 54 físicos [dentre eles, o físico alemão Rudolf Ludwig Mössbauer (n.1929; PNF, 1961)]; e o de 1999 (*Physics Letters* **B447**, p. 127), conduzidas por 49 físicos (incluindo Mössbauer).

Por sua vez, em abril de 1998, começou o experimento GNO (com 30 t de Ga e tendo ainda o Ge como fonte de ν_e), também liderado pelo LNGS, por intermédio do *BORONSOLAR NEUTRINO EXPERIMENT* (BOREX). No período de seu funcionamento, maio de 1998-janeiro de 2002, seus resultados foram apresentados em 2000 (*Physics*

Letters **B447**, p. 16), por 30 cientistas; e na *Neutrino 2002 Conference*, realizada em Munique, na Alemanha. Em resumo, nas experiências realizadas pelas colaborações GALLEX/GNO, os valores encontrados foram: GALLEX: $77,5 \pm 62$ (estatístico) + $4,3/-4.7$ (sistemático) SNU, e GNO: $65,2 \pm 6,2$ (estatístico) ± 3.0 (sistemático) SNU, comparado ao valor teórico de 138 SNU (www.lngs.it). Registre-se que essa discrepância foi resolvida com novos experimentos e levando em conta a **oscilação de neutrinos solares**, no *Sudbury Neutrino Observatory* (SNO), localizado na *Inco Nickel Mine*, em Sudbury (Ontário, Canadá), sob a direção McDonald (desde 1990) e apresentados em 2001 e 2002, segundo veremos no verbete (Parte 2) (en.wikipedia.org/wiki/GALLEX).

Creemos ser oportuno falar algo sobre o BOREX. Em maio de 2007, foi criada a *BOREXINO* (diminutivo italiano de *Borex*) *Collaboration* (uma colaboração internacional com a participação de cientistas de vários países: Alemanha, Canadá, Estados Unidos, França, Itália, Polônia, Rússia e Ucrânia), usando um detector líquido de cintilação e localizado na montanha italiana de Gran Sasso, objetivando detectar **antineutrinos/neutrinos radioativos** do interior e da crosta de nosso planeta Terra (**geoneutrinos/geoantineutrinos** ou **geológicos**) e **antineutrinos/neutrinos solares**. Os principais resultados dessa Colaboração foram: 1) em 2007 (*Physics Letters* **B658**, p. 101) (77 cientistas) e 2008 (*Physical Review Letters* **101**, no. 091302) (133 cientistas), detectados os primeiros **neutrinos/antineutrinos solares** produzidos pelo berílio radioativo (${}^7_4\text{Be}$); 2) em 2010 (*Physics Letters* **B687**, p. 299) (88 cientistas), detectados os primeiros **geoantineutrinos** dos elementos radioativos e, dentre eles: urânio (${}^{238}_{92}\text{U}$), tório (${}^{232}_{90}\text{Th}$) e potássio (${}^{40}_{19}\text{K}$); 3) em 2011 (*Physical Review Letters* **107**, no. 141302) (89 cientistas) e *Physical Review Letters* **108**, no. 051302) (91 cientistas), respectivamente, confirmação de **neutrinos/antineutrinos solares** emitidos pelo ${}^7_4\text{Be}$ e pela **fusão nuclear** (próton-próton) no centro do Sol; 4) em 2012 (*Physics Letters* **B716**, p. 401) (105 cientistas), foi medida a velocidade do **neutrino muônico** (ν_μ) produzido no CERN (sobre essa medida é interessante destacar que, inicialmente, ela apresentava um valor $> c$, e logo depois foi encontrado ser compatível com c); 5) em 2013 (*Physics Letters* **B722**, p. 29) (93 cientistas), novos **geoneutrinos/geoantineutrinos** foram detectados: em 2014 (*Nature* **512**, p. 383) (91 cientistas), foi confirmada a **fusão nuclear** (próton-próton) no centro do Sol; e, em agosto de 2015 (*Physical Review* **D92**, no. 031101) (102 cientistas) foi divulgada uma espectroscopia de **geoneutrinos/geoantineutrinos**. ([en.wikipedia.org/BOREXINO](http://en.wikipedia.org/wiki/BOREXINO)).

Continuemos com o histórico sobre o tema do PNF2015, agora tratando das **oscilações de neutrinos** ($\nu_e \rightarrow \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$). As primeiras considerações sobre a **oscilação de neutrinos (antineutrinos) eletrônicos solares** ($\nu_e \leftrightarrow \bar{\nu}_e$) no vácuo foi aventada por Pontecorvo, em 1957 (*Soviet Physics, JETP* **6**, p. 984) e em 1958 (*Soviet Physics, JETP* **7**, p. 172). Destaque-se que, com a descoberta do ν_μ , em 1962 (já registrada), os físicos japoneses Z. Maki, M. Nakagawa e Shoichi Sakata (1911-1970), ainda em 1962 (*Progress in Theoretical Physics* **28**, p. 870), discutiram a possibilidade de esses dois

conhecidos “sabores” de **neutrinos solares** serem uma mistura de dois auto-estados de massa dos mesmos. Contudo, o primeiro modelo fenomenológico da **oscilação de neutrinos (eletrônicos e muônicos) solares** ($\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$) foi proposto por Pontecorvo, em 1968 (*Soviet Physics, JETP* **26**, p. 172) e melhorado por ele e pelo físico russo Vladimir Naumovich Gribov (1930-1997), em 1969 (*Physics Letters* **B28**, p. 493). É interessante destacar que, no túmulo de Pontecorvo, em Roma, está escrita a seguinte equação: $\nu_\mu \neq \nu_e$. (Close, op. cit.).

Por sua vez, a possibilidade da existência do **neutrino tauônico** (ν_τ), decorrente das experiências de Perl (1975-1976) que analisamos acima, levou o FERMILAB, por intermédio de seu acelerador *Tevatron* [acelerador de **prótons** em um anel de 6,3 km e energia de até 1 TeV (= 10^3 MeV), com o início de operação ocorrido em 1983], a montar um experimento (*Collaboration*) [*Direct Observation of the NU Tau*, E872 (DONUT)], em 1997, para observar a interação de ν_τ , anunciada em 20 de julho de 2000 e publicada em 2001 (*Physics Letters* **B504**, p. 218). É oportuno registrar que o ν_τ foi confirmado, em 2012, em experiências realizadas no **Large Hadron Collider** (LHC/CERN), por duas *Colaborações*: **A Toroidal LHC Apparatus** (ATLAS) e **Compact Muon Solenoid** (CMS). Na do ATLAS (*Physics Letters* **B716**, p. 1), participaram quase 3.000 cientistas, sendo treze (13) cientistas brasileiros; na do CMS (*Physics Letters* **B716**, p. 30) com também quase 3.000 cientistas, dentre eles trinta e cinco (35) brasileiros (www.searadaciencia.ufc.br/bassalo/PNF2013).

Os trabalhos de Pontecorvo, Maki, Nakagawa e Sakata [e que foram confirmados pelos físicos russos S. P. Mikheev e Smirnov, em 1985 (*Yadernaya Fizika* **42**, p. 1441), em 1986 (*Nuovo Cimento* **C9**, p. 17)] ensejaram o desenvolvimento de um modelo para explicar as **oscilações de neutrinos** (ON) [de qualquer “sabor” e massivos (embora contra o MPFPE, pois para este, o **neutrino** não possui massa, como já destacamos): **eletrônico** (ν_e), **muônico** (ν_μ) e **tauônico** (ν_τ)]. Desse modo, hoje, a ON é devido a uma mistura dos auto-estados do Hamiltoniano (H) e dos auto-estados da **interação fraca** envolvendo seus **léptons** correspondentes (e, μ , τ). Assim, quando os **neutrinos** se propagam através do espaço, os **fatores de fase** correspondentes aos auto-estados oscilam devido a diferenças de massa dos auto-estados de H. Note-se que o conceito de **mistura de neutrinos** é o resultado natural de uma *Teoria de ‘Gauge’* com **neutrinos** (de três “sabores”) massivos, cuja transformação unitária relacionando os auto-estados de massa e de “sabor”, sendo estes dados por: $|v_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |v_i\rangle$ e $|v_i\rangle = \sum_\alpha U_{\alpha i}^* |v_\alpha\rangle$, onde $|v_\alpha\rangle$ corresponde a um **neutrino** com “sabor” bem definido (ν_e, ν_μ, ν_τ ou $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$) e $|v_i\rangle$ a um **neutrino** de massa m_i definida [$i = 1$ (ν_e), 2 (ν_μ), 3 (ν_τ)], $U_{\alpha i}$ é a **matriz de Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata** (PMNS) e (*) significa a matriz complexa conjugada. É interessante ressaltar que, com essa matriz, se calcula a probabilidade de **oscilação de dois neutrinos**: $P_{i \rightarrow j, (i \neq j)} \approx \sin^2(2\theta_{ij}) = \sin^2[1,27 (\Delta m_{ij}^2 L/E)]$, sendo θ_{ij} (o **ângulo de mistura**), $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ [m_i (ou m_j)] medido em eV, L (distância entre a fonte emissora e o detector de **neutrinos**)

considerado em km e E (energia do feixe de **neutrinos** suposta constante), tomada em GeV. (en.wikipedia.org/wiki/Neutrino_Oscillation).

Ressalte-se que as experiências com **neutrinos** envolvem o cálculo de Δm^2_{ij} e θ_{ij} , como veremos no verbete seguinte (Parte 2).



ANTERIOR

SEGUINTE