



SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



Os Físicos Brasileiros e os Prêmios Nobel de Física (PNF) de 1957, 1979, 1980, 1984 e 1988.

O PNF de 1957 foi concedido aos físicos sino-norte-americanos Chen Ning Yang (n.1922) e Tsung-Dao Lee (n.1926) pela descoberta da **quebra da paridade** nas interações fracas. O PNF de 1979, foi outorgado aos físicos, os norte-americanos Steven Weinberg (n.1933) e Sheldon Lee Glashow (n.1932) e o paquistanês Abdus Salam (1926-1996) pelo desenvolvimento da **Teoria Eletrofraca** que unificou as interações eletromagnética e fraca. O PNF de 1980 foi atribuído aos físicos norte-americanos James Watson Cronin (n.1931) e Val Logsdon Fitch (n.1923) pela descoberta da violação da **simetria carga-paridade** (CP). O PNF de 1984 foi recebido pelo físico italiano Carlo Rubbia (n.1934) e pelo engenheiro e físico holandês Simon van der Meer (n.1925) pela descoberta das partículas W^\pm e Z^0 mediadoras da interação fraca. E o PNF de 1988, foi partilhado pelos físicos norte-americanos Leon Max Lederman (n.1922), Melvin Schwartz (1932-2006) e Jack Steinberger (n.1921) (de origem alemã) por desenvolverem o método de feixes de neutrinos e pela consequente descoberta do neutrino do múon (ν_μ). Neste verbete, vou destacar os trabalhos de físicos estrangeiros e brasileiros que se relacionaram, diretamente ou indiretamente, com esses Prêmios. Em verbetes desta série, vimos como ocorreu a descoberta e a explicação do fenômeno físico chamado de **radioatividade**. Como essa explicação é importante para entender o significado do PNF/1957, façamos um pequeno resumo dessa explicação, principalmente a da “radioatividade beta (β)”. Em 1896, o físico francês Antoine Henry Becquerel (1852-1908; PNF, 1903) descobriu que cristais de sulfato de potássio-urânio [uranilo (UO_2)] eram capazes de emitir certos “raios” até então desconhecidos. Em 1898, a química e física polonesa Marya (Marie) Sklodowska Curie (1867-1934; PNF, 1903; PNQ, 1911) – a famosa Madame Curie -, descobriu que o tório (Th) também emitia “raios Becquerel” e, nessa ocasião, denominou de **radioatividade** a esse novo fenômeno físico. Também em 1898, o físico neozelandês-inglês Sir Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908) descobriu que os “raios Becquerel” eram constituídos de dois tipos de partículas: **alfa** (α), carregada positivamente, e **beta** (β), carregada negativamente. Em 1900, Becquerel, o casal Curie [Marie e o físico francês Pierre Curie (1859-1906; PNF, 1903)] e o físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928; PNF, 1911), em trabalhos independentes, demonstraram que a **partícula beta** era um elétron emitido por um determinado núcleo A que se transforma em um outro núcleo B. Em vista disso, essa emissão ficou conhecida como **decaimento beta** (“ β -decay”). Ainda em 1900, o físico francês Paul Villard (1860-1934) descobriu uma terceira componente da **radioatividade**, denominada por Rutherford de **gama** (γ).

Ao estudar o **decaimento β** , em 1914, o físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935) observou 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 um núcleo A que se transforma em um núcleo B e tem, esse elétron, energia menor do que as energias de repouso desses dois núcleos, para onde vai a energia que está faltando? Em verbete desta série, vimos que essa polêmica foi resolvida pelo físico austro-norte-americano Wolfgang 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, 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** .

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, 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 transforma-se em um próton, com a emissão de um elétron e da “partícula Pauliana”, ou seja: $n \rightarrow p + e^- + \nu$.

Somente em 1953, os físicos norte-americanos Emil John Konopinski (1911-1990) e Hormoz Massou Mahmoud (n.1918) mostraram que a “partícula Pauliana” era uma antipartícula, o **antineutrino do elétron** ($\bar{\nu}_e$). É oportuno destacar que, com a descoberta do **antipróton** (\bar{p}), em 1955, e do **antinêutron** (\bar{n}), em 1956, foram considerados mais dois princípios de conservação (além dos tradicionais princípios da conservação da energia, momento linear e momento angular, característicos da Física Clássica) que devem ser obedecidos nas reações envolvendo partículas elementares: **princípio da conservação do número leptônico (L)** e **princípio da conservação do número bariônico (B)**. Esses números [L(B)] assumem o valor +1 para os **léptons** [como o elétron (e^-) e seu neutrino associado (ν_e); nome cunhado em 1946] e para os **bárions** [como o próton (p) e o nêutron (n); nome cunhado em 1954], e o valor – 1, para os **antiléptons** [como o pósitron (e^+) e seu antineutrino associado ($\bar{\nu}_e$)] e para os **antibárions** [como o antipróton (\bar{p}) e o antinêutron (\bar{n})]. É importante registrar que a conservação de uma “carga pesada” (**bárion**) já havia sido postulada, independentemente, pelos físicos, o alemão Hermann Weyl (1885-1955), em 1929 (*Zeitschrift for Physik* **56**, p. 330), o suíço Ernst Carl Gerlach Stückelberg (1905-1984), em 1938 (*Helvetica Physica Acta* **11**, p. 225), e o húngaro-norte-americano Eugene Paul Wigner (1902-1995; PNF, 1963), em 1949 (*Proceedings of the American Philosophical Society* **93**, p. 521) [Donald H. Perkins, *IN: The Scientific Legacy of Beppo Occhialini* (Società Italiana di Fisica e Springer-Verlag, 2006)]. É também oportuno registrar que, em 1927, Wigner havia mostrado que as Leis de Conservação na Mecânica Quântica Schrödingeriana (vide verbete nesta série), que acabara de ser desenvolvida, eram associadas com a existência de um operador unitário – o **operador paridade P** – que troca o sinal do vetor posição, isto é: $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$, e cujos auto-valores valem ± 1 . Logo depois, em 1931, ele próprio propôs o **princípio da conservação da paridade**, segundo o qual nenhuma experiência física seria capaz de determinar, de maneira unívoca, a direita da esquerda.

Vejamos, agora, alguns trabalhos importantes que foram realizados no sentido de entender a “quebra do princípio da conservação da paridade na interação fraca”, objeto da concessão do PNF de 1957 a Yang e Lee. Quando o físico brasileiro Cesare (César) Mansueto Giulio Lattes (1924-2005) realizou um seminário no Brasil, no segundo semestre de 1947, sobre as experiências que realizou no Grupo de Bristol sobre a produção e decaimento de mésons “primários” (π) [hoje, **píons**] e “secundários” (μ) [hoje, **múons**] (vide verbete nesta série), participava desse seminário o físico brasileiro Jayme Tiomno (n.1920). Nessa ocasião, ele apresentou a idéia de que essa produção, principalmente o decaimento do méson “secundário”, poderia ser explicado por intermédio da nova interação proposta por Fermi, em 1934, referida acima. Além do mais, afirmava Tiomno, era necessário considerar que o méson μ teria o spin $\frac{1}{2}$. Aliás, é oportuno observar que, em 1941 (*Physical Review* **59**, p. 555), o físico alemão Lothar Wolfgang Nordheim (1899-1985) já havia sugerido spin $\frac{1}{2}$ para μ com os possíveis modos de decaimento: $\mu \rightarrow e + 2\nu$ e $\mu \rightarrow e + \gamma$. Este último tipo de decaimento foi considerado pelo físico ítalo-russo Bruno M. Pontecorvo (1913-1993), em 1947 (*Physical Review* **72**, p. 246), ao formular a hipótese de que o méson μ^- era um “elétron pesado” que interagia com o próton ($\mu^- + p \rightarrow n + \nu$), e com aquele modo de decaimento. Essas idéias (interação de Fermi e spin $\frac{1}{2}$ para o μ) foram retomadas por Tiomno em trabalhos que realizou com o físico norte-americano John Archibald Wheeler (n.1911), em 1948 (*Centennial Meeting of the American Association for Advancement of Science*) e 1949 (*Reviews of Modern*

Physics **21**, pgs. 144; 153), nos quais apresentou um esquema triangular cujos vértices eram constituídos dos **núcleons** [próton (p) e nêutron (n); nome cunhado em 1941], do elétron (e^-) e de seu companheiro neutrino (hoje, ν_e), do méson μ e de seu provável companheiro, a partícula leve e neutra μ_0 (hoje, ν_μ), e que sofriam, entre dois desses pares, a interação de Fermi. {Sobre esse esquema triangular, conhecido como **triângulo de Puppi-Wheeler-Tiomno** ver: John Archibald Wheeler e Kenneth William Ford, **Geons, Black Holes & Quantum Foam: A Life in Physics** [W. W. Norton (1998)]; José Maria Filardo Bassalo e Olival Freire Junior, **Wheeler, Tiomno e a Física Brasileira** [*Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, p. 426 (2003)].} Registre-se que o nome Puppi, no triângulo referido acima, decorre do fato de que o físico italiano Giampietro Puppi (1917-2006), em 1948 (*Nuovo Cimento* **5**, p. 587), havia também formulado a hipótese de que o μ^- tinha spin $\frac{1}{2}$ com o seu decaimento $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_1 + \nu_2$ decorrente de uma interação com a mesma constante de acoplamento (G_F) usada por Fermi, em 1934. Registre-se, também, que o físico sueco Oskar Benjamin Klein (1894-1977), ainda em 1948 (*Nature* **161**, p. 897), apresentou uma proposta análoga a essa de Puppi.

A universalidade da interação proposta por Fermi, em 1934, nos decaimentos do nêutron e do μ^- , foi confirmada em 1949, por Lee, Yang e o físico norte-americano Marshall N. Rosenbluth (1927-2003) (*Physical Review* **75**, p. 905); por Puppi (*Nuovo Cimento* **6**, p. 194); e, em 1950 (*Physical Review* **76**, p. 495), por Tiomno e Yang. Aliás, foi neste trabalho que foi cunhado o termo **interação universal de Fermi** que, posteriormente, em 1955 (*Nuovo Cimento* **1**, p. 962), passou a ser conhecida como **Interação Fraca** conforme a denominou N. Dallaporta.

Ainda em 1950, Tiomno defendeu sua Tese de Doutorado na *Universidade de Princeton*, sob a orientação de Wigner, no qual tratou da teoria dos neutrinos e a dupla desintegração beta. Nessa Tese, Tiomno apresentou novas idéias envolvendo o operador projeção γ_5 ($\gamma_5 = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4$, com $\gamma_{1,2,3,4}$ representando as **matrizes de Dirac**). No entanto, entre as combinações possíveis envolvendo esse operador, Tiomno descartou a combinação $(1 - \gamma_5)/2$, por ela violar o **princípio da conservação da paridade**. Contudo, foi justamente essa combinação a considerada por Lee e Yang, em seus célebres trabalhos de 1956 (*Physical Review* **102**; **104**, pgs. 290; 254), nos quais demonstraram a violação daquele princípio nas interações fracas. Sobre a escolha da combinação referida acima, rejeitada por Tiomno e considerada por Lee e Yang, há um diálogo interessante realizado entre eles a respeito desse episódio. Quando Tiomno, que trabalhou com Wheeler e Wigner, falou a Yang sobre a sua escolha, Yang lhe falou: *Então eu tive sorte de trabalhar com Fermi que não acreditava na conservação da paridade como um dos princípios fundamentais da Natureza*. É oportuno registrar que, muito embora já existissem indícios sobre a violação da paridade observada em experiências com elétrons oriundos do **decaimento β** de substâncias radioativas, como as realizadas em 1928, por R. T. Cox, C. G. McIlwraith e B. Kerrelmeyer, e em 1929, por C. T. Chase, parece que a primeira tentativa de considerar a violação da paridade, porém nas interações fortes entre mésons, foi apresentada pelo físico brasileiro Mário Schenberg (1914-1990), em 1941 (*Physical Review* **60**, p. 468).

Agora, vejamos como Lee e Yang chegaram àquele importante resultado. Em 1947 (*Nature* **160**, p. 855), os físicos ingleses George Dixon Rochester (1908-2001) e Clifford Charles Butler (1922-1999) anunciaram que haviam descoberto uma nova partícula ao examinarem cerca de 5.000 fotografias de experiências que realizaram sobre a penetração de raios cósmicos em **câmaras de Wilson** (vide verbete nesta série) colocadas em grandes altitudes. Nesse exame, descobriram trajetórias em forma de V provenientes de uma origem comum e interpretaram-nas como traços deixados por partículas carregadas e provenientes da desintegração de uma partícula neutra e desconhecida, à qual deram o nome de **partícula V**, devido à forma das trajetórias observadas. Novas experiências de Rochester e Butler, ainda em 1947, evidenciaram outras partículas do tipo V, carregadas (V^\pm). No entanto, enquanto a partícula neutra (V_2^0), que haviam descoberto anteriormente, apresentava um modo de decaimento definido [$V_2^0(\theta^0) \rightarrow \pi^+ + \pi^-$], para as carregadas, o modo de decaimento era indefinido. Em 1949 (*Nature* **163**, p. 82), o físico inglês Sir

Cecil Frank Powell (1903-1969; PNF, 1950) e sua equipe [R. Brown, Ugo Camerini (n.1925), Hugh Muirhead (1925-2007), Peter Howard Fowler (1923-1996) e D. M. Ritson] da *Universidade de Bristol*, na Inglaterra, anunciaram a descoberta de uma nova partícula tipo V, à qual deram o nome de τ , com o seguinte decaimento: $\tau^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^{\pm} + \pi^{\mp}$. Registre-se que, em 1953 (*Reports Progress in Physics* **16**, p. 364), Rochester e Butler apresentaram um resumo das experiências que realizaram em 1947.

No começo da década de 1950, novas partículas do tipo V foram descobertas, principalmente pelo físico francês Louis Leprince-Ringuet (1901-2000) e sua equipe (C. Peyrou, B. Gregory, A. Lagarrigue, R. Armenteros, F. Muller, A. Astier, W. B. Fretter, R. R. Rau, J. Tinlot e H. de Sthebler) da *École Polytechnique*, em Paris. O estudo em detalhes dessas novas partículas só foi possível depois da construção, em 1953, do **Cosmotron** de 3 GeV, do *Brookhaven National Laboratory*, nos Estados Unidos, e da instalação nesse mesmo laboratório da **câmara de bolhas**, que havia sido inventada pelo físico norte-americano Donald Arthur Glaser (n.1926; PNF, 1960), em 1952 (vide verbete nesta série). Essas partículas tipo V foram chamadas de **estranhas** por que eram produzidas por interação forte, entre píons ($\pi^{0,\pm}$) e núcleons (p, n), e decaíam por interação fraca. Como essas partículas recebiam denominações e símbolos diferentes (às vezes, para a mesma partícula), Leprince-Ringuet, em 1953 (*Annual Review of Nuclear Science* **3**, p. 39), apresentou um esquema de nomenclatura para as partículas elementares até então conhecidas. Nessa ocasião, denominou de **hyperon** (super, em grego) a partícula que apresentava massa maior do que a massa de um núcleon, tais como: $\Sigma^{0,\pm}$ (hoje, Λ^0 e Ξ^{\pm}). As que apresentavam a massa intermediária entre a massa dos mésons $\pi^{0,\pm}$ e a dos núcleons, ele denominou de **mésons pesados**: $\theta^{0,\pm}$ e τ^{\pm} (hoje, os **káons** K^{\pm}, K^0, \bar{K}^0).

Conforme vimos acima, as partículas “estranhas” θ e τ apresentavam modos de decaimentos diferentes, dois e três π , respectivamente. Contudo, havia uma suspeita de que elas eram a mesma partícula. Em vista disso, esse comportamento passou a ser conhecido como *quebra-cabeça* $\theta-\tau$ (“ $\theta-\tau$ puzzle”), e foi objeto de muita pesquisa. Com efeito, em 1955 (*Physical Review* **97**, p. 1387), os físicos, o norte-americano Murray Gell-Mann (n.1929; PNF, 1969) e o holandês-norte-americano Abraham Pais (1918-2000), ao tentarem resolver esse enigma, observaram que as partículas θ^0 (hoje, K^0) e $\bar{\theta}^0$ (hoje, \bar{K}^0) deveriam ser distintas e que uma se transformaria na outra e vice-versa. É oportuno notar que Tiomno, em sua Tese de Doutorado referida acima, havia encontrado a possibilidade de um bóson neutro, como o θ^0 , ser diferente de sua antipartícula. Aliás, a distinção entre essas duas partículas foi comprovada, em 1964, em experiências independentes realizadas pelos físicos, os norte-americanos James H. Christenson, Cronin, Fitch e o francês René Turlay (n.1932) (*Physical Review Letters* **13**, p. 138), e A. Abashian, R. J. Abrams, D. W. Carpenter, G. P. Fisher, B. M. K. Mefkens e J. H. Smith (*Physical Review Letters* **13**, p. 243), experiências essas nas quais observaram a violação da **simetria** (ou “invariância”) **CP** (troca de carga elétrica e inversão da paridade) do sistema $K^0 - \bar{K}^0$. Note-se que essa simetria foi formulada, em 1952 (*Physical Review* **88**, p. 101), pelos físicos, o italiano Gian Carlo Wick (1909-1992), o norte-americano Arthur Strong Wightman (n.1922) e Wigner.

Em 1956, o *quebra-cabeça* $\theta-\tau$ foi finalmente resolvido com os trabalhos distintos realizados pelos físicos norte-americanos Fitch e R. Mutilis (*Physical Review* **101**, p. 496); Luís Walter Alvarez (1911-1988; PNF, 1968), F. S. Crawford Junior, Myron Lindsay Good (1923-1999) e M. Lynn Stevenson (*Physical Review* **101**, p. 503); e o referidos trabalhos de Lee e Yang (*Physical Review* **102**; **104**, pgs. 290; 254). Nesses trabalhos, foi demonstrado que as partículas (θ^{\pm}, τ^{\pm}) só seriam idênticas (hoje, K^{\pm}), caso a interação fraca violasse o **princípio da conservação da paridade P**. É interessante notar que em seus trabalhos, Yang e Lee sugeriram experiências capazes de verificar essa violação.

Logo em 1957, a violação da paridade em interações fracas foi observada em três experiências distintas. A mais conhecida delas (*Physical Review* **105**, p. 1413), foi a realizada pela física sino-norte-americana Chien-Shing Wu (Madame Wu) (1912-1997) e colaboradores, os físicos norte-americanos E. Ambler, Raymond Webster Hayward (1921-2001), D. D. Hoppes e R. P. Hudson, ao examinarem a distribuição angular de elétrons emitidos por **decaimento β** em uma reação do tipo:

${}_{27}\text{Co}^{60} \rightarrow {}_{27}\text{Ni}^{60} + e^{-} + \bar{\nu}_e$. O resultado dessa experiência foi a constatação de uma assimetria naquela distribuição (em relação ao spin do núcleo), indicando que a paridade não era conservada. As outras duas experiências foram realizadas, respectivamente, pelos físicos norte-americanos Richard Lawrence Garwin (n.1928), Lederman e Marcel Weinreich (*Physical Review* **105**, p. 1415), que estudaram o decaimento do tipo (na linguagem atual): $\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} + \bar{\nu}_\mu$, 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), que estudaram o decaimento (na linguagem atual):

$$\mu^{-} \rightarrow e^{-} + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Ainda em 1957, e em trabalhos independentes, Lee e Yang (*Physical Review* **105**, p. 1671), Salam (*Nuclear Physics* **5**, p. 299), e o físico russo Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962) (*Soviet Physics – JETP* **5**, p. 337), demonstraram que a força fraca violava, independentemente, a paridade (P) e a conservação da carga (C), porém, mantinha invioláveis as simetrias CP e T, em virtude do Teorema CPT. Note-se que a simetria T, que significa **inversão temporal** (simetria no tempo, isto é, trocar o sinal de t), foi estudada por Wigner, em 1932. Registre-se que a invariância das simetrias CP e T, que decorre da invariância de Lorentz em uma Teoria de Campo Local, havia sido estudada pelo físico norte-americano Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNF, 1965), em 1953 (*Physical Review* **91**, pgs. 713; 728; **92**; p. 1283) e 1954 (*Physical Review* **93**; **94**, pgs. 615; 1362) e, também, pelo físico alemão Gerhart Lüders (1920-1995), em 1954 (*Matematisk-Fysiske Meddelelser K ngelige Danske Videnskabernes Selskab* **28**, p. 1). Em 1957 (*Annals of Physics* **2**, p. 1), Lüders demonstrou o famoso Teorema CPT, segundo o qual os observáveis em Física são invariantes por uma transformação combinada, em qualquer ordem, das operações C, P e T. Ainda segundo esse Teorema, toda partícula possui uma antipartícula (carga elétrica de sinal contrário) associada de mesma massa, mesma vida-média e de mesmo momento magnético da partícula correspondente., conforme foi demonstrado, ainda em 1957, em trabalhos independentes realizados por Lee, Reinhard Oehme (n.1928) e Yang (*Physical Review* **106**, p. 340) e, independentemente, pelos físicos russos Boris Lazarevich Ioffe (n.1926), Lev Borisovich Okun (n.1929) e A. P. Rudik (*Soviet Physics – JETP* **5**, p. 328). É oportuno assinalar que foi Okun quem, em 1958, cunhou o termo **hádron** para toda a partícula que é sensível à interação forte. A comprovação experimental, em 1957, da violação da paridade nas interações fracas, conforme vimos acima, apresentava um problema, qual seja, a de que os neutrinos nelas envolvidos deveriam ter massa nula, como, por exemplo, a do neutrino associado ao elétron ν_e . Ora, sendo o neutrino um **férmion**, pois obedece à **estatística de Fermi-Dirac** (ver verbete nesta série), o seu estudo no **decaimento β** era realizado usando a **equação de Dirac** (ver verbete nesta série). Contudo, como essa equação foi inicialmente proposta para explicar o elétron que é um férmion massivo, a função de onda Diraciana para descrevê-lo tem 4-componentes. Porém, como o ν_e era supostamente admitido de massa nula, bastariam então dois componentes para a função de onda Diraciana para descrevê-lo. Desse modo, surgiu a famosa Teoria de Dois Componentes do Neutrino e o conceito de **helicidade**, cujas primeiras idéias foram apresentadas nos artigos independentes, de 1957, de Lee e Yang, de Salam, e de Landau, referidos anteriormente. Segundo a Teoria de Dois Componentes do Neutrino, o spin (\vec{s}) dessa partícula *gira* como parafuso de rosca esquerda e tem sempre sentido contrário ao seu momento linear (\vec{p}), isto é, sua **helicidade** ($\mathbf{H} = \vec{p} \cdot \vec{s}$) é negativa ($\mathbf{H} < 0$). Por sua vez, o spin do antineutrino tem sempre o mesmo sentido do momento linear, ou seja: $\mathbf{H} > 0$. Destaque-se que a preferência da Natureza por essa helicidade dos neutrinos foi comprovada, em 1958 (*Physical Review* **109**, p. 1015), em uma experiência realizada pelos físicos, o austro-húngaro Maurice Goldhaber (n.1911) e seus colaboradores [Lee Grodzins e Andrey W. Sunyar (1920-1986)], na qual o núcleo do európio (Eu^{152}) decaí em um núcleo excitado do samário (Sm^{*152}) pela captura de um elétron de sua camada eletrônica K e com a emissão de um neutrino eletrônico de 0.840 MeV de energia. Ora, como o núcleo do európio tem spin 0 e o núcleo excitado do samário tem spin 1, então este decaí a um estado de spin 0 com a emissão de um raio gama (γ), num tempo de 3×10^{-14} s. [Val L. Fitch e Jonathan L. Rosner, **IN: Twentieth Century Physics, Volume II** (Institute of Physics Publishing

and American of Institute Physics Press (1995).]

A Teoria dos Dois Neutrinos foi completada com a famosa **Teoria V – A**. Vejamos como. O problema da **helicidade** do neutrino vista acima colocava em dúvida a conceituada interação S e T (Scalar e Tensor), utilizada para explicar o **decaimento β** . Em vista disso, conforme nos conta o físico norte-americano Richard Philips Feynman (1918-1988; PNF, 1965) [**Surely You're Joking, Mr. Feynman!** (Bantam Books, 1986)], certo dia de 1958, no *California Institute of Technology* (CALTECH), ele conversava com Gell-Mann, Hans Jensen, Aadert Hendrik Wapstra (1922-2006) e Felix Boehm sobre a vulnerabilidade da interação S e T, quando Gell-Mann sugeriu que essa questão poderia ser resolvida com uma interação do tipo V e A (Vector e Axial). Desse modo, ainda em 1958 (*Physical Review* **109**, p. 193), Feynman e Gell-Mann formularam a **Teoria V – A**, que universalizou a Teoria da Interação Fraca Fermiana. Observe-se que, comparando essa teoria com os resultados experimentais, Feynman encontrou uma diferença de 2% atribuída a erros experimentais. Contudo, o físico italiano Nicola Cabbibo (n.1935), em 1963 (*Physical Review Letters* **10**, p. 531), corrigiu aquela teoria, introduzindo a **corrente neutra** por intermédio de um parâmetro conhecido como **ângulo de Cabbibo θ_c** , reduzindo aquela diferença para 1%. Observe-se que Cabbibo foi levado a introduzir esse “ângulo” examinando os seguintes decaimentos (na linguagem atual): $\pi^- (K^-) \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ e $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$. Esse “ângulo” representa, então, a relação entre as intensidades relativas desses dois decaimentos e significa a “projeção” de uma intensidade sobre a outra que se encontra inclinada daquele “ângulo”.

É oportuno destacar que, ainda em 1958, os físicos, o norte-americano Robert Eugene Marshak (1916-1992) e o indu-norte-ameicano Ennackel Chandy George Sudarshan (n.1931) (*Physical Review* **109**, p. 1860), e o japonês Jun John Sakurai (1933-1982) (*Nuovo Cimento* **7**, p. 649) propuseram também o caráter do tipo V – A para a interação fraca. Também é oportuno destacar que, em 1955 (*Nuovo Cimento* **1**, p. 226), Tiomno havia chegado a dois tipos da então Interação de Fermi: S + P – T (Scalar + Pseudoescalar – Tensor) e V - A. Tiomno escolheu a primeira, apesar das físicas brasileiras Elisa Frota Pessoa (n.1921) e Neusa Margem (hoje, Amato) (n.1921), em 1950 (*Anais da Academia Brasileira de Ciências* **22**, p. 371), haverem observado que a desintegração do então méson “primário” (π^-) em elétron, era pelo menos, 100 vezes menos freqüente que a desintegração em méson “secundário” (μ^-). Esse resultado era incompatível com a presença do Pseudoescalar (P) na corrente fraca (vide verbete nesta série).

Sobre a violação da paridade na Interação Fraca Fermiana e o desenvolvimento da **Teoria V – A**, que universalizou essa interação, conforme registramos acima, é oportuno destacar dois aspectos curiosos, já referidos em verbetes anteriores desta série. O primeiro deles, refere-se ao fato de que a violação da paridade na interação fraca havia sido apresentada por Salam, em setembro de 1956, ao seu orientador de Tese de Doutorado, o físico inglês Sir Rudolf Ernest Peierls (1907-1995), bem como ao físico austro-norte-americano Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945) que, no entanto, os rejeitaram por acreditarem que a “Natureza preserva a paridade”. O outro aspecto, relaciona-se a sugestão que Wheeler fez ao *Comitê Nobel*, para atribuir o PNF de 1987, a Tiomno, Marshak, Sudarshan e Madame Wu, pelas grandes contribuições que esses físicos, de quatro continentes diferentes (América do Sul, América do Norte, Índia e China), deram ao entendimento da interação fraca. Note-se que o PNF/1957 foi atribuído aos físicos, o alemão Johannes George Bednorz (n.1950) e o suíço Karl Alex Miller (n.1927), por haverem descoberto, em 1986, as **cerâmicas supercondutoras**.

Na continuação deste verbete destacaremos dois importantes resultados decorrentes da **Teoria V – A**. O primeiro, refere-se ao fato de que Feynman e Gell-Mann, no trabalho de 1958 e no qual propuseram essa Teoria, sugeriram que a interação fraca poderia ser devido à troca de bósons massivos virtuais de spin 1, denominados por eles de X^\pm e por Lee e Yang, de W^\pm [Murray Gell-Mann, **The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex** (W. H. Freeman and Company, 1994)]. Ao ler esse trabalho de Feynman e Gell-Mann, o físico brasileiro José Leite Lopes (1918-2006), preparou um artigo, ainda em 1958 (*Nuclear Physics* **8**, p. 234), no qual considerou que a constante de interação eletromagnética com a matéria seria igual à constante de interação fraca com essa mesma matéria ($G_W = e$). Desse modo, ele propôs que a

interação elétron-nêutron só poderia ser realizada por intermédio de um bóson vetorial neutro, o hoje conhecido Z^0 , chegando a estimar a sua massa em cerca de 60 massas do próton (m_p). É interessante destacar que, 20 anos antes, em 1938 (*Journal de Physique et le Radium* **9**, p. 1), o físico sueco Oskar Benjamin Klein (1897-1977) havia sugerido que bósons vetoriais massivos e carregados, aos quais denominou de ω , seriam mediadores da interação fraca. Desse modo, para Klein, o decaimento β seria representado por: $n \rightarrow p + \omega^-$; $\omega^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_{\text{e}}$. Destaque-se, também, que ainda em 1958, trabalhos semelhantes a esses de Klein e Leite Lopes foram realizados pelos físicos norte-americanos Sidney Arnold Bludman (n.1927) (*Nuovo Cimento* **9**, p. 433); Gerald Feinberg (1933-1992) (*Physical Review* **110**, p. 1482); Schwinger (*Annals of Physics NY* **2**, p. 407); e Glashow (Tese de Doutorado, orientada por Schwinger).

Conforme vimos em verbetes desta série, a unificação das forças eletromagnética e fraca especulada nos trabalhos referidos acima foi finalmente formalizada nos artigos de Weinberg, em 1967 (*Physical Review Letters* **19**, p. 1264) e Salam, em 1968 (*Proceedings of the Eighth Nobel Symposium*, p. 367), a conhecida **Teoria Eletrofraca**. Segundo essa teoria, a “força eletrofraca” é mediada por quatro quanta: o **fóton** (γ), partícula não-massiva e mediadora da interação eletromagnética e os bósons vetoriais (W^{\pm}, Z^0) (a notação de Z^0 foi sugerida por Weinberg), de massas respectivas: 75 e $95m_p$. Observe-se que tais bósons foram descobertos, em 1983 (*Physics Letters* **122B**, p. 103; 476; **126B**, p. 398; **129B**, pgs. 130; 273), nas experiências realizadas no *Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire* (CERN), na fronteira França-Suíça, sob a liderança de Rubbia e Simon van der Meer (n.1925; PNF, 1984), nas quais estudaram a colisão próton e antipróton ($p - \bar{p}$) no *Superproton Synchrotron* (SPS) daquele laboratório. As massas desses bósons determinadas nessa experiência, foram: $m_W \approx 80m_p$, $m_Z \approx 90m_p$. Registre-se que o trabalho de Leite Lopes aparece nas citações que Weinberg fez em sua **Leitura Nobel**.

É oportuno registrar que a confirmação das partículas mediadoras da interação fraca, decorreu da descoberta das “correntes neutras das interações fracas”, cuja primeira evidência desse tipo de “corrente” foi observada nas experiências realizadas na **câmara de bolhas “Gargamelle”**, no CERN, sob a liderança do físico francês Paul Musset, nas quais foram estudadas as interações de neutrinos eletrônicos (ν_e) com a matéria nuclear. Os resultados dessas experiências foram descritos pelo próprio Musset, em 1973 (*Journal de Physique, Paris* **11/12**, p. T34). Para maiores detalhes sobre aquela descoberta, ver: E. C. F. S. Fortes, M. C. Tijero e Vicente Pleitez, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, p. 415 (2007).

O segundo aspecto importante da **Teoria V - A** está relacionado com a descoberta da violação da **simetria CP** do sistema $K^0 - \bar{K}^0$, descrita anteriormente. Queremos apenas acrescentar que, antes da célebre experiência realizada, em 1964, e confirmada em 1965 (*Physical Review* **B140**, p. 74), pelos Nobelistas (1980) Cronin e Fitch, com a colaboração de Christenson e Turlay, era conhecido que aquele sistema, formado por um modo longo (“long”) e um curto (“short”) apresentava dois tipos de decaimentos: $K_L^0 \rightarrow 3\pi$, em um tempo de (**em** $5,2 \times 10^{-8}$ s) e $K_S^0 \rightarrow 2\pi$, em um tempo de (**em** $8,6 \times 10^{-11}$ s) e que, portanto, depois de um certo tempo, digamos 10 vezes a vida média de K_S^0 , o feixe inicial de K^0 não deveria apresentar nenhum modo K_S^0 . No entanto, em sua experiência, esses físicos encontraram cerca de 0,3% do modo K_S^0 , resultado esse incompatível com a **simetria CP**. Note-se que, ainda em 1964, em trabalhos distintos realizados pelos físicos norte-americanos L. Wolfenstein (*Physical Review Letters* **13**, p. 286) e Robert Green Sachs (1916-1999) (*Physical Review Letters* **13**, p. 562), eles propuseram uma nova interação na Natureza, a **superfraca**, para explicar aquela violação. Também em 1964, em trabalhos independentes de John Stuart Bell (1928-1990) e J. K. Perring (*Physical Review Letters* **13**, p. 348), e de J. Bernstein, Cabibbo e Lee (*Physics Letters* **12**, p. 146), eles sugeriram que a violação da **simetria CP** poderia ser devida a um campo vetorial de longo alcance e de origem cósmica. Em 1965 (*Physical Review* **B139**, p. 1650), Bernstein, Feinberg e Lee observaram uma possível violação da **simetria CP** nas interações eletromagnéticas envolvendo **hádrons**.

Ao concluir este verbete, destacaremos a descoberta do neutrino associado ao múon: ν_{μ} .

Conforme vimos acima, a suspeita de haver um neutrino diferente do neutrino eletrônico (ν_e) e envolvido no decaimento do méson “secundário” μ , foi aventada por Nordheim, em 1941, Pontecorvo, em 1947, e Puppi-Wheeler-Tiomno, em 1948-1949. Por outro lado, em 1953 (*Physical Review* **92**, p. 830), os físicos norte-americanos Frederick Reines (1918-1998; PNF, 1995) e Clyde Lorrain Cowan Junior (1919-1974) estudaram a colisão de um fluxo de neutrinos oriundos do **decaimento β** produzido pelo reator nuclear do *Hanford Engineering Works* e observaram a produção de nêutrons (n) e de pósitrons (e^+); em vista disso, foi colocada a seguinte questão: será que os neutrinos oriundos do **decaimento β** são os mesmos que os decorrentes do decaimento dos píons (π)? Ou seja, será que um fluxo de neutrinos provindos do decaimento dos píons, ao colidir com prótons (p), produzirá nêutrons (n) e pósitrons (e^+) como observado por Reines e Cowan? Contudo, antes de se poder realizar tal experiência, existia a questão de se obter o feixe de neutrinos produzido pelos píons.

Em 1960, em trabalhos independentes de Pontecorvo e Schwartz (*Soviet Physics – JETP* **10**, p. 1236), e de Lee e Yang (*Physical Review Letters* **4**, pgs. 306; 307), eles propuseram um tipo de experiência para a produção dos neutrinos associados aos píons, qual seja: $p + p \rightarrow p + n + \pi^+$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. De posse desses neutrinos, os Nobelistas (1988) Lederman, Schwartz e Steinberger, com a colaboração dos físicos norte-americanos Gordon Danby, Jean-Marc Gaillard, Konstantin Goulianos e Nariman B. Mistry, realizaram uma experiência no **ciclotron Nevis** do *Brookhaven National Laboratory*, em 1962 (*Physical Review Letters* **9**, p. 36), na qual comprovaram a existência do neutrino associado ao múon (ν_μ), bem como confirmaram a existência do neutrino associado ao elétron (ν_e), em reações do tipo: $\nu_e + p \rightarrow n + e^+$; $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$; $\nu_\mu + p \rightarrow n + \mu^+$ e $\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$.

Por fim, a existência de dois neutrinos (ν_e , ν_μ) foi confirmada no CERN, em 1964 (*Physics Letters* **12**; **13**, p. 281; 80; 86), em experiências das quais participaram o físico brasileiro Roberto Aureliano Salmeron (n.1922) e mais os físicos Gilberto Bernardini (1906-1995), J. K. Bienlein, M. M. Block, A. Böhm, H. Burmeister, D. C. Cundy, B. Eiben, G. von Dardel, Helmut Faissner (1928-2007), F. Ferrero, C. Franzinetti, J. M. Gaillard, H. J. Gerber, B. Hahn, V. Kaftanov, J. Keren, Frank Krienen (n.1917), C. Manfredotti, R. Mollerud, G. Myatt, M. Nikolic, A. Orkin-Lecourtois, Michel Paty (n.1938), Donald H. Perkins (n.1925), C. A. Ramm, M. Reinharz, P. G. Seiler, K. Schultze, H. Sletten, K. Soop, A. Staude, J. Stein, H. J. Steiner, R. Stump, W. Venus e H. Yoshiki. Note-se que hoje é conhecido um terceiro neutrino (ν_τ) associado ao lépton pesado **tau τ** , partícula descoberta em uma experiência realizada no *Stanford Linear Accelerator Center* (SLAC), nos Estados Unidos, em 1975, sob a liderança do físico norte-americano Martin Lewis Perl (n.1927; PNF, 1995).



ANTERIOR

SEGUINTE