



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

A Descoberta Indireta dos Quarks (u,d,s) e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 1990.

O PNF de 1990 foi atribuído aos físicos, os norte-americanos Jerome Isaac Friedman (n.1930) e Henry Way Kendall (1926-1999) e o canadense Richard Edward Taylor (n.1929) por seus experimentos pioneiros relativos ao espalhamento de elétrons por núcleos atômicos que revelaram a presença de **quarks**. Desde a descoberta do elétron (e^-), em 1897 [pelo físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906)], várias outras partículas foram então descobertas por todo o Século 20. Por exemplo, até a metade da década de 1940, haviam sido descobertos o próton (p), em 1919 [pelo físico e químico neozelandês-inglês Lord Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908)], o nêutron (n), em 1932 [pelo físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935)], o pósitron (e^+), também em 1932 [pelo físico norte-americano Carl David Anderson (1905-1991; PNF, 1936)], e o múon (μ), em 1936 [por Anderson e pelo físico norte-americano Seth Henry Neddermeyer (1907-1988)], e, desse modo, surgiu a necessidade de compreendê-las. Assim, em 1946 (*Annals of the New York Academy* **48**, p. 219), o físico norte-americano John Archibald Wheeler (1911-2009) desenvolveu a tese de que todas as partículas até então conhecidas poderiam ser constituídas a partir da junção do elétron e de sua antipartícula, o pósitron, junção essa que seria mediada pelo fóton [partícula mediadora da interação eletromagnética, depois de sua existência proposta pelo físico germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921), em 1905], segundo preconizava a Teoria Quântica da Radiação, formulada pelo físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (PNF, 1933), em 1927 (vide verbete nesta série). É interessante destacar que esse **bi-elétron**, como Wheeler denominou-o, que também fora concebido, de maneira independente, pelos físicos, o norte-americano Arthur Edward Ruark (1899-1979) e o russo Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962), foi pela primeira vez observado pelo físico austro-norte-americano Martin Deutsch (1917-2002), no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), em 1951 (*Physical Review* **82**, p. 455), e é hoje conhecido como **positrônio**.

A descoberta de novas partículas, em 1947, como o píon (π) [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 (1924-2005)] e as partículas estranhas lambda (Λ^0 ; $\Sigma^{\pm,0}$) [pelos físicos ingleses George Dixon Rochester (1908-2001) e Clifford Charles Butler (1922-1999)], ensejou novas ideias para explicá-las. Por exemplo, em 1949 (*Physical Review* **76**, p. 1739), os físicos, o ítalo-norte-americano Enrico Fermi (1901-1954; PNF, 1938) e o sino-norte-americano Chen Ning Yang (n.1922; PNF, 1957) propuseram que os π seriam estados dinamicamente ligados por núcleons (p e n). Contudo, a descoberta de novas partículas estranhas, como os káons ($K^{\pm,0}$), em 1951 (*Philosophical Magazine* **42**, p. 1032), pelo físico inglês C. O'Ceallaigh, e a cascata-menos (Ξ^-), em 1952 (*Philosophical Magazine* **43**, p. 597), por R. Armenteros, K. H. Barker, Butler, A. Chacon e C. M. York, levou o físico japonês Shoichi Sakata (1911-1970), em 1956 (*Progress in Theoretical Physics* **16**, p. 686), a usar o grupo SU(3) para estudar a estrutura das partículas estranhas. Vejamos como.

Conforme vimos em verbetes desta série, Sakata usou como representações irredutíveis do SU(3), o tripleto (p, n, Λ^0) e seu respectivo antitripleto ($\bar{p}, \bar{n}, \bar{\Lambda}^0$) e, com isso, encontrou que: $K^+ = p\bar{\Lambda}^0$, $K^0 = n\bar{\Lambda}^0$, $K^- = \bar{p}\Lambda^0$, $\bar{K}^0 = \bar{n}\Lambda^0$, $\Sigma^+ = p\bar{n}\Lambda^0$, $\Sigma^0 = \bar{p}n\Lambda^0$ e $\Xi^- = \bar{p}\Lambda^0\Lambda^0$. Contudo, esse **Modelo de Sakata** (MS) apresentava dificuldades, tais como: a previsão de partículas que não foram descobertas (p.e.: $p\bar{n}\Lambda^0$), a não confirmação do spin 3/2 para as partículas Ξ^- previsto por aquele modelo (seu valor experimental

era $\frac{1}{2}$), assim como não conseguia explicar as partículas delta ($\Delta^{++,+0,-}$) [estados excitados dos núcleons (N^*), depois denominadas de ressonâncias bariônicas], descobertas em 1953. Além disso, a descoberta também de estados excitados dos sigmas (Σ^*) e dos xi (Ξ^*), em 1960, fizeram com que os físicos, o norte-americano Murray Gell-Mann (n.1929; PNF, 1969) e o israelense Yuval Ne'eman (1925-2006), em trabalhos independentes realizados em 1961, usassem uma outra representação irredutível do SU(3), o octeto. Com esse **Modelo do Octeto** (MO), foram explicadas as partículas até então conhecidas, inclusive as não explicadas pelo MS, assim como foi prevista a existência de uma nova partícula, a ômega (Ω^-), esta anunciada por Gell-Mann, em 1962, por ocasião da *International Conference on High Energy*, realizada no *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN), em Genebra, na Suíça, e descoberta em 1964 (vide verbete nesta série).

Apesar do grande sucesso do MO, existiam algumas dificuldades como, por exemplo, as massas previstas por esse modelo não correspondiam às observadas experimentalmente. Em vista disso, Gell-Mann e o físico norte-americano George Zweig (n.1937), em trabalhos independentes, propuseram, em 1964, uma nova representação fundamental do SU(3) para o estudo da estrutura das partículas elementares até então conhecidas. Desta vez consideraram um novo tripleto, diferente do de Sakata, constituído de novas partículas denominadas de **quarks**, por Gell-Mann, e de **aces** por Zweig. Assim, para Gell-Mann-Zweig, essas partículas apresentavam três **sabores** (*flavours*) e com cargas fracionárias da carga e do elétron. São elas: **up** (u), com a carga de $+2e/3$; **down** (d), com carga $-e/3$, e **strange** (s), também com a carga de $-e/3$. Registre-se que também foram previstos os **antiquarks** ($\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$), com carga de sinal contrário. Segundo esse **Modelo de Quarks** (MQ) temos, por exemplo, a seguinte distribuição quarkônica das partículas: π^+ ($u\bar{d}$), K^+ ($u\bar{s}$), K^0 ($d\bar{s}$), p (uud), n (udd), Λ^0 (uds), Σ^+ (uus), Ξ^- (dss), Δ^{++} (uuu), Ω^- (sss) (para outras partículas, ver verbete nesta série).

O MQ despertou um grande interesse por parte dos físicos experimentais que passaram, então, a idealizar experiências para encontrar os **quarks**. Desse modo, ainda na década de 1960, dois tipos de experiências foram idealizados: as que procuravam detectar (sem êxito) **quarks** presos à matéria (1966, 1968), e as que procuravam detectar (também sem êxito) **quarks** livres, ainda de dois tipos: por intermédio de raios cósmicos (1967, 1969) e por levitação magnética (1965, 1970, 1974, 1977) (para detalhes, ver verbete nesta série). Contudo, foram as experiências realizadas por Friedman, Kendall e Taylor, em 1968, que confirmaram a **existência indireta dos quarks** (u, d, s), conforme veremos a seguir.

Friedman interessou-se por Física quando, ainda estudante do *High School*, leu o famoso livro **The Meaning of Relativity** (Princeton University Press, 1945) de Einstein. Em 1950, entrou para o *Departamento de Física da Universidade de Chicago*, onde Fermi ensinava, obtendo em 1953 o título de Mestre e, em 1956, o de Doutor. Registre-se que Fermi era o orientador de Doutorado de Friedman; contudo, com a morte de Fermi, em 1954, a orientação passou a ser do físico norte-americano John Marshall (n.1925). Logo em 1957 (*Physical Review* **106**, p. 1681), ainda em Chicago, Friedman e o físico suíço Valentine Louis Teledgi (1922-2006) observaram, pela primeira vez, a não conservação da paridade no decaimento de múons (μ). Este trabalho rendeu a Friedman a indicação, em 1957, para trabalhar no grupo do físico norte-americano Robert L. Hofstadter (1915-1990; PNF, 1961) no *High Energy Physics Laboratory da Universidade de Stanford*, particularmente no *Stanford Linear Accelerator Center* (SLAC), que havia sido construído, em 1956, sob a liderança do físico-norte-americano Kurt Hermann Panofsky (1919-2007). É interessante registrar que esse grupo tornara-se famoso pela experiência realizada, em 1953 (*Physical Review* **91**, p. 422; **92**, p. 978), por Hofstadter, H. R. Fechter e J. A. McIntyre, sobre o espalhamento elástico de elétrons por prótons, usando um alvo de polítileno [polímero do gás etileno (C_2H_4)], com as quais concluíram que o próton (p) e o nêutron (n) têm tamanho e forma similares, com um diâmetro médio de $\sim 0,74 \times 10^{-15}$ m, e que eram partículas envolvidas por nuvens pastosas (*mushy*) de mésons (píons: π), sendo que elas se juntavam no próton e se cancelavam no nêutron. Note que foi trabalhando no grupo de Hofstadter que Friedman encontrou-se com Kendall e Taylor. Em 1960, Friedman foi para o *Departamento de Física* do MIT, passando a trabalhar no grupo do físico norte-americano David Ritson. Em 1961, no MIT, Friedman criou seu próprio grupo de pesquisas, para o qual chamou Kendall. Em 1963, fez uma parceria com o SLAC (onde

trabalhava Taylor) e com o *Lawrence Laboratory* (LL), da *Universidade da Califórnia*, em Berkeley. Dessa colaboração, surgiu a célebre experiência com a qual compartilharam o PNF de 1990, conforme veremos mais adiante. Note que Friedman tornou-se *Full Professor* do *Departamento de Física* do MIT, em 1967, e dirigiu esse Departamento entre 1983 e 1988.

Kendall foi atraído pela Física quando estudou no *Amherst College*, em Massachusetts, no qual entrou em 1946. Ao concluir seu Bacharelado em Física nesse Colégio, por influência de um amigo de família, o físico norte-americano Karl Taylor Compton (1887-1954), então Presidente do MIT, foi para este Instituto estudar Física. No *Departamento de Física* do MIT, doutorou-se em Física em 1955, sob a orientação de Deutsch. Entre 1956 e 1961, ensinou e pesquisou no grupo de Hofstadter, onde conheceu Friedman e Taylor. A partir de 1961, passou a fazer parte do corpo docente do MIT, tornando-se *Full Professor*, em 1967.

Taylor bacharelou-se e mestrou-se em Física, na *Universidade de Alberta*, em Edmonton, no Canadá, respectivamente, em 1950 e 1952. Entre 1958 e 1961, Taylor juntou-se ao grupo de físicos franceses da *École Normale Supérieure*, em Paris, que estava construindo, em Orsay, um acelerador linear semelhante ao do SLAC. Em 1961, Taylor foi para os Estados Unidos, trabalhando inicialmente no LL, e, depois, transferiu-se para a *Universidade de Stanford* (US), onde se doutorou em 1962, sob a orientação do físico norte-americano Robert Fred Morley (1917-1999). Entre 1962 e 1968, trabalhou no grupo de Hofstadter, no SLAC. Em 1968 foi indicado Professor Associado da US e, em 1970, *Full Professor*.

Agora vejamos como aconteceu a experiência sobre a **descoberta indireta do quark**. Em 1967 (*Physical Review* **163**, p. 1767), o físico norte-americano James Daniel Bjorken (n.1934) usou a Álgebra de Correntes (ver verbete nesta série) para estudar o espalhamento inelástico profundo (*deep inelastic scattering*) elétron-próton. Esse estudo indicava que o próton poderia ser constituído de **partículas tipo-ponto** (*point-like particles*). Em vista dessa conjectura, Taylor, do SLAC, e Friedman e Taylor, do MIT, começaram um programa de pesquisa para estudar esse tipo de espalhamento usando o acelerador linear de 20 GeV, do SLAC. Nesse projeto, participaram também pesquisadores do *California Institute of Technology* (CALTECH).

Os primeiros resultados experimentais desse programa (espalhamento inelástico profundo de elétron-núcleo) foram apresentados, em 1968 (*Physical Review Letters* **20**, p. 292), pelos pesquisadores do SLAC (D. H. Coward, Hobey DeStaebler, R. A. Early, J. Litt, A. Miten, L. W. Mo, Panofsky e Taylor), do MIT (M. Breidenbach, P. N. Kirk, Friedman e Kendall), e do CALTECH (B. C. Barish, J. Mar e J. Pine). Duas novas experiências foram realizadas em 1969. A primeira (*Physical Review Letters* **23**, p. 930), realizada por E. D. Bloom, Coward, DeStaebler, J. Drees, G. Miller, Mo e Taylor (do SLAC), e por Breidenbach, Friedman, G. C. Hartmann e Kendall (do MIT). A segunda (*Physical Review Letters* **23**, p. 935), por Bloom, Coward, DeStaebler, Drees, Mo e Taylor (do SLAC), e por Breidenbach, Friedman e Kendall (do MIT). A análise dessas experiências indicou que a secção de choque para aquele tipo de espalhamento não decrescia com o aumento do quadrado do momento linear (p^2) transferido, como era o esperado se os prótons envolvidos nesse tipo de espalhamento fossem “caroços” rígidos. Desse modo, essa análise confirmava a previsão teórica sobre a estrutura **tipo-ponto** do próton.

É interessante destacar que, também em 1969 (*Physical Review* **179**, p. 1547) e ainda usando a Álgebra de Correntes, Bjorken apresentou sua famosa conjectura da **aproximação de escala** (*scaling approximation*). Tal conjectura foi mais um avanço no entendimento do espalhamento inelástico profundo (EIP), pois, segundo essa conjectura, tal espalhamento poderia ser descrito apenas pela **variável de escala** (*scaling variable*) dada por: $x = q^2/(2 M v)$, onde q^2 é o quadrado do quadri-momento linear transferido, M é a massa do alvo (núcleon), e $v = E_i - E_f$ representa a diferença entre as energias inicial (E_i) e final (E_f) do elétron. É interessante destacar que o quadri-momento é uma grandeza física relativista, com quatro componentes, formada do vetor tridimensional momento linear e da energia: $q = (\vec{p}, i E/c; i = \sqrt{-1})$.

Um outro artigo teórico importante para a compreensão do EIP entre elétrons e núcleons e a consequente estrutura **tipo-ponto** do próton, foi o **modelo de partons** (que significa “partes do próton”) apresentado pelo físico norte-americano Robert Philips Feynman (1918-1988; PNF, 1965) na

14th International Conference on High Energy Physics, que aconteceu em Viena, no verão de 1968, e publicado em 1969 (*Physical Review Letters* **23**, p. 1415). Essa proposta ensejou que se procurasse uma relação entre **quarks** e **partons**. Desse modo, ainda em 1969 (*Physical Review* **185**, p. 1975), Bjorken e E. A. Pachos sugeriram que os **partons** seriam formados por três **valências de quarks** e mais um “mar” de pares de **quark-antiquarks**. Mais tarde, em 1971, um novo **modelo quark-parton** foi proposto, independentemente, por J. Kuti e o físico austro-norte-americano Victor Frederick Weisskopf (1908-2002) (*Physical Review* **D4**, p. 3418), e por Peter V. Landshoff e o físico inglês John Charlton Polkinghorne (n.1930) (*Nuclear Physics* **B28**, p. 240).

A confirmação da equivalência entre **partons** e **quarks** deveu-se a uma contínua interface entre teoria e experiência, realizada na década de 1970, conforme se pode ver nos artigos enumerados a seguir e que tiveram a participação dos Nobelistas (Friedman e Kendall) de 1990. Assim, temos: Friedman e Kendall, em 1972 (*Annual Review of Nuclear Science* **22**, p. 203); A. Bodek, Breidenbach, D. L. Dubin, J. E. Elias, Friedman, Kendall, J. S. Poucher, E. M. Riordan e M. R. Sogard (do MIT) e Coward (do SLAC), em 1973 (*Physical Review Letters* **30**, p. 1087); Bodek, Dubin, Elias, Friedman, Kendall, Poucher, Riordan e Sogard (do MIT), Coward e D. J. Sherden (do SLAC), em 1974 (*Physics Letters* **B51**, p. 417); Riordan, Bodek, Breidenbach, Dubin, Elias, Friedman, Kendall, Poucher e Sogard (do MIT) e Coward (do SLAC), em 1974 (*Physical Review Letters* **33**, p. 561; *Physics Letters* **B52**, p. 249); e Bodek, Breidenbach, Dubin, Elias, Friedman, Kendall, Poucher, Riordan e Sogard (do MIT), Coward e Sherden (do SLAC), em 1979 (*Physical Review* **D20**, p. 1471).

Concluindo este verbete, é oportuno destacar que, em 1978 (*Physics Letters* **B77**, p. 347), que o Nobelista Taylor participou de uma experiência com C. Y. Prescott, W. B. Atwood, R. L. A. Cottrell, DeStaebler, E. L. Garwin, A. Gonider, R. H. Miller, L. S. Rochester, T. Sato, Sherden, C. K. Sinclair, S. Stein, J. E. Clendenin, Vernon Willard Hughes (1921-2003), N. Sasao, K. P. Schüller, M. G. Borghini, K. Lübelsmeyer e Willibald Jentschke (1911-2002), na qual observaram a violação da paridade no espalhamento inelástico profundo (EIP) de elétrons polarizados por prótons, comprovando as previsões da Teoria da Força Eletrofraca proposta, em 1967, pelo físico norte-americano Steven Weinberg (n.1933; PNF, 1979) e, independentemente, em 1968, pelo físico paquistanês Abdus Salam (1926-1996; PNF, 1979) (vide verbete nesta série). Para maiores detalhes da vida e trabalhos dos Nobelistas de 1990, ver suas Autobiografias e *Nobel Lectures*: Jerome Isaac Friedman, **Deep Inelastic Scattering: Comparisons with the Quark Model**; Henry Way Kendall, **Deep Inelastic Scattering: Experiments on the Proton and the Observation of Scaling**; Richard Edward Taylor, **Deep Inelastic Scattering: The Early Years** (*Nobel e-Museum*, 08 de Dezembro de 1990).



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)