

## Reines e Perl: Os Prêmios Nobel de Física de 1995

*José Maria Filardo Bassalo*

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150  
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Departamento de Física da UFPA  
66075-900 - Belém, Pará – Brasil  
e-mail:bassalo@marajo.ufpa.br

### RESUMO

Neste trabalho vamos fazer um pequeno resumo histórico sobre a descoberta das partículas elementares - **neutrino do elétron** ( $\nu_e$ ) e o **lépton pesado** ( $tau$ ) -, respectivamente, por Frederick Reines em 1953 e Martin L. Perl em 1975, motivo da concessão por parte da Real Academia Sueca de Ciências, do Prêmio Nobel de Física de 1995, a esses dois cientistas norte-americanos.

No dia 10 de dezembro de 1995, dia em que se comemora a morte do sueco Alfred Bernhard Nobel (1833-1896), químico, engenheiro, industrial e inventor da dinamite, a Real Academia Sueca de Ciências entregou o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 1995, aos físicos norte-americanos FREDERICK REINES (1918- ) (professor da Universidade da Califórnia - Irvine) e MARTIN L. PERL (1927- ) (pesquisador do Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)), por haverem descoberto, respectivamente, o **neutrino do elétron** ( $\nu_e$ ) e o **lépton pesado tau** ( $\tau$ ).

Vejamos, de início, como se deu a descoberta do neutrino do elétron. Em 1896, o físico francês Antoine Henri Becquerel (1852-1908; PNF, 1903) descobriu que cristais de urânio (sulfato de Potássio-Urânio) eram capazes de emitir certos “raios” até então desconhecidos. Logo depois, em 1897, o físico inglês Sir Ernest Rutherford (1871-1937; Prêmio Nobel de Química (PNQ), 1908) observou que esses “raios” eram constituídos de partículas carregadas positivamente (às quais denominou de **partículas  $\alpha$** ), e de partículas carregadas negativamente (às quais denominou de **partículas  $\beta$** ). Em 1898, a física e química polonesa-francesa Marie Sklodowska (Madame Curie) (1867-1934; PNF, 1903; PNQ, 1911) denominou esse novo fenômeno físico de **radioatividade**. Em 1900, Madame Curie e seu marido, o físico francês Pierre Curie (1859-1906; PNF, 1903) - o famoso Casal Curie -, Becquerel e o físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928; PNF, 1911), em trabalhos independentes, demonstraram que os **raios  $\beta$**  eram elétrons emitidos por um núcleo A que se transforma em um outro núcleo B, processo esse conhecido como **decaimento beta**. Em 1908, Rutherford e o físico alemão Hans (Johannes) Wilhelm Geiger (1882-1945) descobriram que as partículas  $\alpha$  eram átomos de Hélio duplamente ionizados.

Em 1909, Rutherford e seus dois auxiliares, os físicos, o alemão Hans Geiger (1882-1945) e o inglês Sir Ernest Marsden (1889-1970) estudaram o espalhamento de partículas  $\alpha$  (com energia de 5 MeV ou  $5 \times 10^6$  eV) por uma lâmina fina de ouro. Para explicar o surpreendente resultado desse espalhamento, isto é, grandes desvios sofridos por essas partículas, inclusive chegando a voltar para a região onde se encontrava a fonte radioativa (Rádio) das mesmas, Rutherford idealizou, em 1911, um modelo para o átomo segundo o qual este seria como um sistema planetário em miniatura, com os elétrons girando em órbitas circulares - a **eletrosfera** - em torno de uma carço central, positivamente carregado, denominado por ele de **núcleo atômico**.

Ao estudar o decaimento  $\beta$ , em 1914, o físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935) demonstrou que nesse processo físico as partículas  $\beta$  possuíam um espectro contínuo de energia. Por outro lado, a existência de partículas positivas constituintes do núcleo atômico foi confirmada por Rutherford, na experiência que realizou em 1919, na qual analisou as cintilações que as partículas  $\alpha$  produziam em um anteparo de Sulfeto de Zinco (ZnS), depois que as mesmas atravessavam um cilindro contendo certos gases, principalmente Hidrogênio (H) ou Nitrogênio (N). No caso do cilindro conter H, acreditava Rutherford que as partículas  $\alpha$  expulsavam o núcleo desse elemento químico ( ${}_1H^1$ ) e este, por sua vez, iria colidir com o anteparo de ZnS. No caso do gás ser o N, Rutherford acreditava, também, que as partículas  $\alpha$  arrancavam um núcleo do H ao núcleo do N, transmutando-o no Oxigênio (O) segundo a reação:  ${}_2He^4 + {}_7N^{14} \rightarrow {}_8O^{17} + {}_1H^1$ . Em 1920, no *Cardiff Meeting* da Academia Britânica para o Desenvolvimento da Ciência, Rutherford propôs a denominação de **próton** (que significa **primeiro**, em grego) ao núcleo  ${}_1H^1$ . Desse modo, a experiência levou Rutherford a afirmar que o **núcleo atômico** era

constituído de prótons e de partículas neutras, estas compostas de prótons e de elétrons. Portanto, era natural que no começo da década de 1920 os físicos pensassem que os “raios”  $\beta$  eram oriundos dos núcleos radioativos.

Desse modo, no começo da década de 1920 desenvolveu-se uma questão polêmica relacionada à energia das partículas  $\beta$ . Desejava-se saber se ela era determinada pelas energias dos núcleos final e inicial ou se variava continuamente. Além do mais, havia uma questão objetiva: se um elétron é emitido por um núcleo A que se transforma no núcleo B e tem energia menor que suas massas de repouso, para onde vai a energia que está faltando? Em 1923, o físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962; PNF, 1922) passou a defender a idéia de que o **princípio da conservação da energia** só era válido estatisticamente para fenômenos macroscópicos, sendo violado nos processos microscópicos, como, por exemplo, o decaimento  $\beta$ . Contudo, em 1930, o físico austro-norte-americano Wolfgang Pauli (1900-1958; PNF, 1945) resolveu essa controvérsia postulando a existência de uma partícula neutra, de massa muito pequena, não excedendo 0,01 da massa do próton, e que é emitida junto com o elétron pelo núcleo radioativo.

Essa nova partícula elementar prevista por Pauli recebeu do físico ítalo-norte-americano Enrico Fermi (1901-1954; PNF, 1938), em 1934, o nome de **neutrino** ( $\nu$ ), ocasião em que formulou a teoria da **força fraca** como responsável pelo decaimento  $\beta$ , isto é:  $n \rightarrow p + e^- + \nu$ . Essa partícula teve sua comprovação experimental verificada pelos físicos norte-americanos Reines e Clyde Lowain Cowan (1919- ), em 1953, ao estudarem a colisão de um fluxo de neutrinos oriundos do decaimento  $\beta$  produzido pelo reator nuclear do *Hanford Engineering Works*, com prótons de um cintilador líquido, numa reação do tipo:  $\nu_- + p \rightarrow n + \beta^+$ , onde  $\beta^+$  era o **pósitron**, que havia sido descoberto pelo físico norte-americano Carl Anderson (1905-1991; PNF, 1936), em 1932. Hoje,  $\beta^+$  é representado por  $e^+$  e  $\nu_-$  por  $\nu_e$  e sabe-se, também, que o neutrino envolvido no decaimento  $\beta$  é o **anti-neutrino do elétron**  $\bar{\nu}_e$ . (Observe-se que o físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981; PNF, 1949) propôs, em 1935, a idéia da **força forte** como sendo a responsável pela estabilidade do núcleo atômico, composto de prótons e nêutrons, estes descobertos pelo físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935), em 1932.)

Vejamos, por fim, como se deu a descoberta do lépton pesado denominado tau. No começo da década de 1960, eram conhecidas as seguintes partículas elementares: o elétron ( $e^-$ ), descoberto pelo físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906), em 1897; o próton (p), por Rutherford, em 1919; o nêutron (n), por Chadwick, em 1932; o pósitron ( $e^+$ ), por Anderson, em 1932; os muons ( $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ), por Anderson e pelo físico norte-americano Seth Henry Neddermeyer (1907-1988), em 1937; os píons carregados ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ), pelos físicos, o brasileiro César Mansuetto Giulio Lattes (1924- ), o italiano Giuseppe Paolo Stanislao Occhialini (1907-1993), e os ingleses Hugh Muirhead e Sir Cecil Frank Powell (1903-1969; PNF, 1950), em 1947; as partículas estranhas ( $\Lambda^0$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^-$ ,  $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$ ), por vários grupos de físicos, entre 1947 e 1953; o pión neutro ( $\pi^0$ ), por dois grupos de físicos norte-americanos, em experiências distintas (R. F. Borklund, W. E. Crandall, B. J. Moyer, H. F. York e Wolfgang Panofsky (1919- ), Jack Steinberger (1921- ); PNF, 1988), R. L. Aamodt, J. S. Steller, York), em 1950; o neutrino do elétron ( $\nu_e$ ), por Reines e Cowan, em 1953; as ressonâncias bariônicas ( $\Delta^{++}$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^-$ ;  $\Sigma^{+*}$ ,  $\Sigma^{0*}$ ,  $\Sigma^{-*}$ ;  $\Xi^{0*}$ ,  $\Xi^{-*}$ ), por vários grupos de físicos (dentre os quais, se destaca o físico norte-americano Luis Walter Alvarez (1911-1988; PNF, 1968)), entre 1953 e 1963; as ressonâncias mesônicas

( $K^{+*}, K^{0*}, K^{-*}, \bar{K}^{0*}; \rho^+, \rho^0, \rho^-; \omega^0; \phi^0$ ), por vários grupos de físicos, entre 1961 e 1963; e o neutrino do muon ( $\nu_\mu$ ), descoberto em 1962 no *Brookhaven National Laboratory - BNL* (experiência na qual participaram 7 físicos, dentre os quais os norte-americanos Leon Max Lederman (1922- ; PNF, 1988), Melvin Schwartz (1932- ; PNF, 1988) e Steinberger) e confirmado em 1964 no *Centre Européen de Recherches Nucléaires - CERN* (experiência na qual participaram 17 físicos, dentre os quais o brasileiro Roberto Aureliano Salmeron (1922- )).

A existência dessas várias partículas levou os físicos a tentarem uma classificação, a exemplo do que fez o químico russo Dmitri Ivanovich Mendeleiev (1834-1907), em 1869, com os elementos químicos, ao propor a famosa **Tabela Periódica dos Elementos**. Assim, em 1956, o físico japonês Shoichi Sakata utilizou a álgebra do grupo  $SU(3)$  para classificar as partículas até então conhecidas, tomando como representações irredutíveis desse grupo, o tripleto ( $p, n, \Lambda^0$ ) e seu correspondente anti-tripletto ( $\bar{p}, \bar{n}, \bar{\Lambda}^0$ ). Nesse modelo, havia a previsão da existência de uma partícula com estranheza  $S = +1$ , bem como previa que o spin da partícula  $\Xi$  valia  $\frac{3}{2}$ . (Observe-se que a **estranheza** é um número quântico proposto, em 1953, pelo físico norte-americano Murray Gell-Mann (1929- ; PNF, 1969) e, independentemente, pelos físicos japoneses Kazuhiko Nishijima (1926- ) e T. Nakano.)

Em 1958, o físico russo L. B. Okun denominou as partículas que são sensíveis à **força forte de hádrons** (que significa **grande, massivo**, em grego) que, por sua vez, são compostos de dois grupos: **mésons** (píons ( $\pi$ ), kaons ( $K$ )) de spin inteiro, e **bárions** (nucleons ( $n, p$ ), hyperons ( $\Lambda, \Sigma, \Xi$ )) de spin fracionário. (Note-se que o nome **méson** foi cunhado pelo físico indiano Homi Jehangir Bhabha (1909-1966), em 1939.)

Na Conferência Internacional de Física de Altas Energias, realizada em Kiev (ex-URSS) em 1959, foi proposta uma simetria geral na Natureza: os três bárions de Sakata ( $p, n, \Lambda^0$ ) eram fundamentais para explicar a força forte, e os três léptons ( $e, \nu_e, \mu$ ) eram fundamentais para explicar a força fraca. (Registre-se que o nome **lépton** deriva do grego **leptos** (que significa fino, delgado) e foi cunhado em 1948.)

As dificuldades com o modelo de Sakata (não confirmação do bárion estranho ( $S = +1$ ) e o erro na previsão do spin das partículas  $\Xi$ , já que esse modelo indicava  $\frac{3}{2}$ , enquanto o valor experimental medido era de  $\frac{1}{2}$ ) levou Gell-Mann e, independentemente, o físico israelense Yuval Ne'eman (1925- ) a tomarem, em 1961, uma outra representação irredutível do  $SU(3)$ : o **octeto**, uma vez que já eram conhecidos dois octetos: o bariônico ( $n, p; \Lambda^0; \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-; \Xi^0, \Xi^-$ ) caracterizado por  $J^P = \frac{1}{2}^+$ , onde  $J$  é o momento angular total e  $P$  é a paridade; e o mesônico ( $\pi^+, \pi^0, \pi^-; K^+, K^0, K^-, \bar{K}^0; \eta^0$ ) caracterizado por  $J^P = 0^-$ . Esse **modelo do octeto** teve dois grandes sucessos: a confirmação experimental (por A. Pevsner *et al.*), ainda em 1961, do méson  $\eta^0$  (que havia sido previsto teoricamente por Y. Ohnuki, em 1960), e a previsão da partícula  $\Omega^-$ , cuja confirmação experimental ocorreu em 1964 (por N. Samios *et al.*).

Apesar desse enorme sucesso do modelo do octeto, ele apresentava algumas dificuldades relacionadas com as massas dos octetos formados pelas ressonâncias mesônicas pseudo-vetorial ( $J^P = 1^-$ :  $K^{+*}, K^{0*}; K^{-*}, \bar{K}^{0*}; \rho^+, \rho^0, \rho^-; \omega^0$ ), e pelas ressonâncias mesônicas pseudo-escalar ( $J^P = 0^-$ :  $K^+, K^0; K^-, \bar{K}^0; \pi^+, \pi^0, \pi^-; \eta^0$ ), uma vez que as mesmas não se enquadravam na fórmula de massa do modelo do octeto, demonstrada por Gell-Mann, em 1961, e generalizada nos trabalhos de S. Okubo, em 1962, de J.J. Swart, em 1963, e S. Coleman e H. J. Schnitzer, em 1964.

As dificuldades apontadas acima com o modelo do octeto, levaram Gell-Mann (ao acatar um sugestão feita por Robert Serber, em 1963) e, independentemente, George Zweig, em 1964, a proporem uma nova representação fundamental do SU(3) para a classificação das partículas elementares. Desta vez consideraram um tripleto, porém, não o tripleto de Sakata, e sim um tripleto constituído por novas partículas denominadas de **quarks**, por Gell-Mann e **aces**, por Zweig. (O nome **quark** - que no uso comum significa passoca ou ricota - foi tirado do livro **Finnegan's Wake** (*Velório de Finnegan*), de 1939, do escritor irlandês James Joyce (1882-1941) e da seguinte estrofe: **Three quarks for Muster Mark.**) No entanto, uma das grandes dificuldades desse modelo residia no fato de que esses três quarks (denominados de **sabores** ("flavours"): **up** (u); **down** (d); **strange** (s)) deveriam apresentar carga elétrica fracionária  $+\frac{2}{3}e$ ,  $-\frac{1}{3}e$ ,  $-\frac{1}{3}e$ , respectivamente. (Os antiquarks  $\bar{u}$ ,  $\bar{d}$ ,  $\bar{s}$  teriam cargas elétricas de sinais contrários.) Segundo esse **modelo de quarks**, os mésons seriam formados de um par de quark-antiquark (por exemplo,  $\pi^+ = u\bar{d}$ ,  $K^+ = u\bar{s}$ ) e os bárions, por três quarks (por exemplo,  $p = (ud)u$  e  $n = (ud)d$ ).

O **modelo de quarks** apresentava um resultado intrigante, qual seja, o de que três ressonâncias bariônicas eram compostas de quarks iguais:  $\Delta^{++} = (uuu)$ ,  $\Delta^- = (ddd)$  e  $\Omega^- = (sss)$ . Porém, como os quarks têm spin fracionário ( $\frac{1}{2}$ ), a existência dessas três partículas violava o **princípio da exclusão**, formulado em 1925, afirmando que mais de duas partículas idênticas e com spin fracionário, não podiam ficar juntas. Essa dificuldade foi sanada por O. W. Greenberg ao postular, em 1964, que os quarks possuíam um novo número quântico: a **cor**. Portanto, devido à estrutura ternária dos bárions, foi postulado que cada quark seria caracterizado por uma das três cores primárias do espectro luminoso: **vermelho**, **azul**, e **verde**. Por sua vez, os anti-quarks seriam caracterizados pelas cores complementares desse mesmo espectro: **cyan**, **amarelo** e **magenta**. Desse modo, estava salvo o **princípio da exclusão** pois, por exemplo, a partícula  $\Delta^{++}$  teria a seguinte estrutura:  $\Delta^{++} = (u(\text{vermelho}), u(\text{azul}), u(\text{verde}))$ . Além do mais, como as partículas compostas de quarks (bárions e mésons) não apresentavam nenhuma propriedade "incomum" com relação a esse novo número quântico, foi postulado, também, que eles seriam "descoloridos" e, portanto, a soma do número quântico cor seria nula. Em vista dessa **lei de conservação**, o méson  $\pi$ , que tem estrutura quarkônica dupla, poderia apresentar, por exemplo, a seguinte estrutura:  $\pi^+ = (u(\text{vermelho}), \bar{d}(\text{cyan}))$ .

A descoberta do  $\nu_\mu$  em 1962 (e sua confirmação em 1964) e a adoção da **cor**, ainda em 1964, resultados esses já referidos anteriormente, suscitaram novas questões para o desenvolvimento da Física das Partículas Elementares. Com efeito, a descoberta desse quarto lépton levou os físicos a postular que os hádrons deveriam, também, ser compostos de quatro quarks, ao invés dos três propostos por Gell-Mann e Zweig. Desse modo, ainda em 1964 (e em trabalhos distintos), os físicos D. Amati, H. Bacry, J. Nuyts e J. Prendtcki; B. J. Bjorken e Sheldon Lee Glashow (1932- ; PNF, 1979); Z. Maki e Ohnuki; e Y. Hara propuseram a existência do **quark charmoso** de "sabor" **c** (de carga elétrica  $Q = +\frac{2}{3}e$ ), nome dado por Bjorken e Glashow. Mais tarde, em 1970, Glashow, J. Iliopoulos e L. Maiani desenvolveram a **teoria do charme** (conhecida como **teoria GIM**) para estudar as propriedades de simetria nas forças (interações) fracas entre léptons e a matéria hadrônica.

Por outro lado, a adoção da cor ensejou que, em 1973, H. D. Politzer e, independen-

temente, D. Gross e F. Wilcker formulassem a teoria da **Cromodinâmica Quântica (Quantum Chromodynamics - QCD)**, segundo a qual a força forte entre os quarks seria consequência da troca entre si de novas partículas denominadas **gluons** (de **glue** (cola), em inglês), de spin 1, sem massa, e que seriam responsáveis pela “cor” do quark. Assim, um quark ao emitir ou absorver um gluon, muda de “cor” e não de “sabor”. (É interessante observar que no decaimento beta, decorrente de uma força fraca, há uma mudança de “sabor” entre os quarks componentes do nêutron e do próton. Com efeito, nesse decaimento, um dos quarks down (**d**) que compõem o nêutron **n** ( $n = udd$ ) transforma-se em quark up (**u**), formando o próton **p** ( $p = uud$ ), com a emissão da partícula  $W^-$ , mediadora da força fraca. Esta partícula foi prevista em 1958, em trabalhos independentes, pelos físicos, o brasileiro José Leite Lopes (1918- ), e os norte-americanos Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNF, 1965) e Sheldon Lee Glashow (1932- ; PNF, 1979), confirmada pela **teoria da força eletrofraca** desenvolvida, independentemente, pelos físicos, o norte-americano Steven Weinberg (1933- ; PNF, 1979), em 1967, e o paquistanês Abdus Salam (1926- ; PNF, 1979), em 1968, e detectada em 1983, em uma experiência realizada no CERN, por uma equipe de cientistas, liderada pelo físico italiano Carlo Rubbia (1934- ; PNF, 1984) e pelo engenheiro holandês Simon van der Meer (1925- ; PNF, 1984).)

A **teoria GIM** começou a fortalecer-se quando, em novembro de 1974, dois grupos de pesquisas, um da Universidade de Stanford (35 físicos), sob a liderança do norte-americano Burton Richter (1931- ; PNF, 1976) e o outro do BNL (14 físicos), sob a liderança do sino-norte-americano Samuel Chao Chan Ting (1936- ; PNF, 1976), descobriram uma nova partícula com massa muito elevada ( $\sim 6\,000\,m_e$ , sendo  $m_e =$  massa do elétron) e de spin-paridade  $J^P = 1^-$ , que foi chamada de  $\psi$  por Richter e de **J**, por Ting. Essa partícula  $\frac{\psi}{J}$  (**psigion**) (ou  $\frac{J}{\psi}$ , (**gionpsi**)), conforme ficou conhecida, foi confirmada, ainda em novembro de 1974, no Laboratório FRASCATI, na Itália. Em 1975, novas partículas **psigion** foram observadas e seu processo de produção indicava ser as mesmas produzidas por força (interação) forte, isto é, eram hadrônicas.

O modelo de quarks de Gell-Mann-Zweig (1964) despertou um grande interesse por parte dos físicos experimentais que passaram, então, a idealizar experiências no sentido de encontrar quarks isolados. Assim, em 1969, os físicos, os norte-americanos Jerome Isaac Friedman (1930- ; PNF, 1990) e Henry Way Kendall (1926- ; PNF, 1990) e o canadense Richard Edward Taylor (1929- ; PNF, 1990), ao analisar no **Stanford Linear Accelerator Center - SLAC**, o espalhamento inelástico de elétrons de 20 GeV por prótons, descobriram que estes eram constituídos de **partículas tipo-ponto** (“**point-like particles**”), às quais o físico norte-americano Richard Philips Feynman (1918-1988; PNF, 1965), ainda em 1969, deu o nome de **partons** (que significa **partes do prótons**). Uma análise mais detalhada desse tipo de espalhamento demonstrou que os **partons** tinham carga elétrica fracionária ( $+\frac{2}{3}e$ ,  $-\frac{1}{3}e$ ) e que, portanto, poderiam ser identificados com os **quarks** de Gell-Mann-Zweig.

A suposta simetria quadrangular universal (4 quarks: u, d, s, c; 4 léptons:  $e, \nu_e, \mu, \nu_\mu$ ) foi rompida com a descoberta de uma nova partícula em experiência realizada em outubro de 1975, por uma equipe de 34 pesquisadores da Universidade de Stanford, sob a liderança de Martin L. Perl, na qual foi estudada a colisão elétron-pósitron ( $e^- - e^+$ ), com a produção anômala de elétrons e de muons. Essa produção decorria do

decaimento de uma nova partícula, inicialmente denominada de **U**, inicial da palavra **unknow** (**desconhecido**, em inglês). A existência dessa partícula foi comprovada em 1977, ocasião em que foi observado que se tratava de um **lépton pesado**, recebendo então o nome de **tau** ( $\tau$ ), inicial da palavra  $\tau\rho\iota\tau\omicron\nu$  (**triton**, terceiro em grego). Essa partícula tem massa de  $\sim 3500 m_e$  e seu spin vale  $\frac{1}{2}$ .

## BIBLIOGRAFIA

- ALVES, G. A., SANTORO, A. e GOMES E SOUZA, M. H. 1995. **Do Elétron ao Quark Top: Como ver uma Partícula Elementar**. *Ciência Hoje*, 19 (113): 34.
- BASSALO, J. M. F. **Crônicas da Física**. Tomo 1 (1987); Tomo 2 (1990); Tomo 3 (1992); Tomo 4 (1994), GEU/UFPA.
- CARUSO, F. e SANTORO, A. **Do Átomo Grego à Física das Interações Fundamentais**, Rio de Janeiro, Ed. AIAFEX, 1994.
- FEINBERG, G. 1978. **What is the World Made of?** Anchor Press.
- GELL-MANN, M. 1994. **The Quark and the Jaguar**. W. H. Freeman and Company.
- GLASHOW, S. L. 1991. **The Charm of Physics**. A Touchstone Book.
- GLASHOW, S. L. 1994. **From Alchemy to Quarks**. Brooks/Cole Publishing Company.
- LEDERMAN, L. and TERESI, D. 1994. **The God Particle**. Delta.
- LEITE LOPES, J. 1992. **A Estrutura Quântica da Matéria**. Editora da UFRJ e Editora Gráfica Limitada.
- MIGNACO, J. A. e SHELLARD, R. C. 1984. **Ciência Hoje**, 3 (14): 42.
- PERL, M. L. and KIRK, W. T. 1978. **Heavy Leptons**. *Scientific American*, March.
- RECAMI, E., ZANCHIN, V. T. e VASCONCELOS, M. T. 1995. **Partículas Elementares como Micro-Universos**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 17 (1): 27.
- REINES, F. and COWAN, Jr. C. L. 1957. **Neutrino Physics**. *Physics Today*, August.
- SALAM, A. 1991. IN: **Em Busca da Unificação**. Gradiva, Portugal.
- SEGRÉ, E. 1987. **Dos Raios-X aos Quarks**. Editora da Universidade de Brasília.
- TREFIL, J. S. 1980. **From Atoms to Quarks**. Charles Scribners's Sons.
- YANG, C. N. 1962. **Elementary Particles: A Short History of Some Discoveries in Atomic Physics**. Princeton University Press.