



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

A Liberdade Assintótica das Interações Fortes, a Cromodinâmica Quântica (QCD) e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 2004.

O PNF de 2004 foi atribuído aos físicos norte-americanos David Jonathan Gross (n.1941), Hugh David Politzer (n.1949) e Frank Anthony Wilczek (n.1951) pela descoberta da **liberdade assintótica das interações fortes** e o consequente desenvolvimento da QCD (“Quantum Chromodynamics”).

Nascido em 1941, em Washington, D.C., Gross foi para Israel, em 1953, acompanhando seu pai, Bertram Meyer Gross (1912-1998) (filho de imigrantes judeus da Tchecoslováquia-Hungria) que, juntamente com um grupo de democratas norte-americanos, tinham a missão de ajudar a consolidação do Estado de Israel, que havia sido criado, em 1948, pela *Organização das Nações Unidas* (ONU). Quando terminou essa missão, em 1955, o pai de Gross resolveu permanecer em Jerusalém, ligando-se à *Universidade Hebraica* (UH). Continuando sua afeição pela leitura, principalmente de divulgação científica, adquirida em sua infância em Arlington, subúrbio de Washington, Gross começou, então, aos 13 anos de idade, seu interesse por Física e Matemática e, depois de terminar o *High School*, entrou para a UH onde obteve os graus de bacharel e de mestre em ciências, em 1962. De posse desses títulos, candidatou-se a fazer sua pós-graduação nos Estados Unidos, sendo aceito na *Universidade da Califórnia*, em Berkeley, na qual funcionava o hoje famoso *Lawrence Berkeley Laboratory* (LBL), que possuía uma excelente equipe de físicos teóricos e experimentais. Como, em Israel, ele já havia decidido ser um físico teórico, em 1964, Gross começou a trabalhar com o físico norte-americano Geoffrey Foucar Chew (n.1924), pois este, juntamente com o físico norte-americano Steven C. Frautschi (n.1933), em 1962 (*Physical Review Letters* **8**, p. 41), haviam desenvolvido o **Modelo “Bootstrap”** (MB) para explicar os **hádrons** (vide verbete nesta série), segundo o qual cada **hádron** é constituído de uma combinação de todos os outros e a comunicação entre eles é feita por **interação forte**. Dentro desse esquema “democrático” de classificação de tais partículas, nenhuma delas é fundamental, sendo a diferença de massa entre elas determinada pela dinâmica da interação, dinâmica essa estudada via a matriz de espalhamento (“scattering”) – **matriz S** (vide verbete nesta série). As demais partículas que não se enquadraram nesse modelo, como os **léptons** (mediadores da interação fraca) e os **fótons** (mediadores da interação eletromagnética), foram jocosamente chamadas de “aristocráticas”. Para contornar essa dificuldade, o físico norte-americano Murray Gell-Mann (n.1929; PNF, 1969) desenvolveu a Álgebra de Correntes [*Physical Review* **125**, p. 1067 (1962); *Physics* **1**, p. 63 (1964)] e a Teoria de Grupos para estudar as Partículas Elementares e propor, ainda em 1964, os **quarks** [proposta independente, porém com o nome de **aces**, foi apresentada pelo físico russo-norte-americano George Zweig (n.1947), também em 1964] conforme vimos em verbetes desta série.

Como a **matriz S** deveria satisfazer uma série de “axiomas”, dentre eles a unitariedade (matriz hermitiana é igual a sua inversa), analiticidade (invariância por uma reversão temporal) e invariância lorentziana, começaram as críticas ao MB. Assim, em 1966 (*Proceedings of the International Conference on High Energy Physics 1966*, p. 249), o físico norte-americano Francis Eugene Low (1921-2007) disse que o MB era mais uma tautologia do que uma teoria, pois os “axiomas” eram checados e ajustados aos dados experimentais. Gross, impressionado com essa crítica, já que havia defendido seu doutorado, em 1966, sob a orientação de Chew, pensou em desenvolver um esquema dinâmico mais potente para explicar as **interações fortes**. Para isso, ainda em 1966, foi para a *Harvard University* (HU) como jovem bolsista (“fellow junior”) na *Harvard Society of Fellows*. Nessa Universidade, encontrou o consagrado físico norte-americano Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNF, 1965), e os que seriam

mais tarde também consagrados, como os norte-americanos Sheldon Lee Glashow (n.1932; PNF, 1979), Steven Weinberg (n.1933; PNF, 1979) e Sidney Richard Coleman (1937-2007). Foi ainda em Harvard, que Gross fez amizade com os jovens físicos norte-americanos Curt G. Callan Junior (n.1942) e Roman Wladimir Jackiw (n.1939).

Em 1967, começou a operar o *Stanford Linear Accelerator Centre* (SLAC) sob a direção do físico norte-americano Wolfgang Kurt Hermann Panofsky (1919-2007) para estudar a eletroprodução de partículas, isto é, o espalhamento inelástico profundo (“deep inelastic scattering”) entre léptons (p.e.: elétron) de alta energia e hádrons (p.e.: núcleons). Esse tipo de espalhamento havia sido estudado teoricamente, ainda em 1967 (*Physical Review* **163**, p. 1767), pelo físico norte-americano James Daniel Bjorken (n.1934), usando a Álgebra de Correntes. Para isso, ele considerou um resultado que demonstrara, em 1963 (*Annals of Physics NY* **24**, p. 201), sobre o efeito das correções radiativas nas medidas das secções de choque desse espalhamento. Assim, nesse trabalho de 1967, Bjorken demonstrou que a secção de choque para esse tipo de espalhamento estava relacionada com o 4-momento ($q = k - k'$) transferido dos léptons inicial (k) e final (k') ao hádron, em virtude de os alvos (p.e.: prótons) apresentarem uma estrutura de uma **partícula tipo-ponto** (“point-like particle”), caracterizado por uma **função estrutura** ou **fator hadrônico** (x). No verão de 1968, ocorreu a *14th International Conference on High Energy Physics*, em Viena, na qual o físico norte-americano Richard Phillips Feynman (1918-1988; PNF, 1965) apresentou a primeira ideia de que os núcleons seriam constituídos de **partículas tipo-ponto**. Na primavera de 1968, Gross impressionou-se com o trabalho de Bjorken, o de 1967 e, juntamente com Callan, propuseram uma **regra de soma** para os x e que poderia ser testada em uma experiência de espalhamento inelástico profundo entre elétrons e prótons. Registre-se que essa **regra** foi publicada em novembro de 1968 (*Physical Review Letters* **21**, p. 311). No outono de 1968, Bjorken percebeu que essa **regra de soma** poderia ocasionar relações de gradação (“scaling relations”) entre as secções de choque daquele tipo de espalhamento. Desse modo, ao tratar um hádron (principalmente o próton) como uma **partícula tipo-ponto**, em 1969 (*Physical Review* **179**, p. 1527), Bjorken demonstrou que x depende da relação entre $(-q^2)$ e v , isto é: $x = (-q^2)/(2p \cdot q) = (-q^2)/(2Mv)$ e não, separadamente, de $-q^2$ e da troca de energia ($v = E - E'$) do hádron alvo, de massa M e de 4-momentum p . Essa propriedade de “scaling” foi interpretada por Feynman em termos de **partículas tipo-ponto** e apresentada por ele na *3rd Topical Conference on High Energy Collisions of Hadrons*, realizada em Stonybrook, NY, em 1969 (*Proceedings*, p. 237). Foi nesse trabalho que apareceu pela primeira vez o termo **párton**, nome dado por Feynman, para representar as partes constituintes (**partículas tipo-ponto**) dos núcleons. [Oscar Wallace Greenberg, *arXiv:0805.2588v3, hep-ph* (4 Jun 2008)].

Em 18 de novembro de 1968, Callan e Gross submeteram à *Physical Review Letters* um trabalho no qual mostraram que os comutadores da corrente elétrica poderiam dar informações sobre a carga e o spin dos núcleons e, portanto, os **pártons** poderiam ser identificados com os **quarks**. Note que esse trabalho foi publicado em 27 de janeiro de 1969 (*Physical Review Letters* **22**, p. 156). É interessante registrar que, quando Gross estava na HU, ele apresentou esse trabalho em um jantar dos *Junior Fellows* no qual estava presente Weinberg. Este foi enfático em dizer que não estava interessado no possível resultado do trabalho (**pártons** \equiv **quarks**), pois não acreditava nos **quarks**.

O “scaling” foi confirmado em uma experiência sobre o “deep inelastic scattering” entre elétrons e prótons, realizada no SLAC, e seu resultado publicado, em 1969 (*Physical Review Letters* **23**, p. 930; 935), por E. D. Bloom, M. Breidenbach, D. W. Coward, H. DeStaebler, J. Drees, Jerome Isaac Friedman (n.1930; PNF, 1990), G. C. Hartmann, Henry Way Kendall (1926-1999; PNF, 1990), G. Miller, L. W. Mo e R. E. Taylor. Ainda em 1969, os **pártons** e as “scaling relations” foram analisados por Bjorken e E. A. Paschos (*Physical Review* **185**, p. 1975), Jackiw e G. Preparata (*Physical Review Letters* **22**, p. 975), o físico norte-americano Stephen L. Adler (n.1939) e W. K. Tung (*Physical Review Letters* **22**, p. 978), e Feynman (*Physical Review Letters* **23**, p. 1415).

Em busca de uma nova dinâmica para os **hádrons**, em 1969, Gross foi para a *Princeton University* (PU), depois de haver trabalhado no *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN)

ocasião em que, juntamente com o físico inglês Christopher Hubert Llewellyn-Smith (n.1942) [*Nuclear Physics* **B14**, p. 337 (1969)] e com o físico austríaco Julius Wess (1934-2007) [*Physical Review* **D2**, p. 753 (1970)], investigou as “scaling relations” (e sua invariância) no comportamento dinâmico dos núcleons (prótons e nêutrons). Na PU, os físicos norte-americanos Marvin Leonard Goldberger (n.1922) e Sam Bard Treiman (1925-1999), [que haviam trabalhado juntos, em 1958 (*Physical Review* **110**; **111**, p. 1178; 1478; 354; *Nuovo Cimento* **9**, p. 451), estudando o decaimento de píons], ofereceram a Gross um excelente ambiente de pesquisa e sua estabilidade (“tenure”), em 1971. Neste ano, Gross deu um curso de Teoria de Campos tendo como aluno Wilczek, que era um estudante de Matemática na PU. Depois desse curso, Wilczek percebeu que seu interesse era o estudo das Partículas Elementares e, em 1972, começou a trabalhar com Gross e, em consequência, a descoberta da **liberdade assintótica das interações fortes**, descoberta essa realizada, independentemente, por Politzer. Vejamos como isso aconteceu.

Em 1954, os físicos norte-americanos Chen Ning Yang (n.1925; PNF, 1957) (de origem chinesa) e Robert Laurence Mills (n.1927) propuseram uma **Teoria de “Gauge” não-Abeliana** para estudar a **interação forte**. É interessante ressaltar que o físico inglês Ronald Shaw (n.1929) apresentou, em 1955, uma proposta semelhante. A **Teoria de Yang-Mills-Shaw** (TY-M-S) tinha uma grande dificuldade em virtude de ela não ser renormalizável, como acontecia com a QED (“Quantum Electrodynamics”), que trata da interação eletromagnética. Esse problema foi resolvido, em 1967 (*Nuclear Physics* **35**, p. 167), pelo físico holandês Gerardus ‘t Hooft (n.1946; PNF, 1999) ao renormalizar a interação fraca. Esse trabalho permitiu o desenvolvimento do Grupo de Renormalização (GR) (que especifica a dependência dos parâmetros da Teoria Quântica de Campos com a mudança de escala) e, com ele, foi estudada, em 1970, em trabalhos independentes, a polarização do vácuo, pelos físicos, os norte-americanos Kenneth Geddes Wilson (n.1936; PNF, 1982) (*Physical Review* **D2**, p. 1438), Callan (*Physical Review* **D2**, p. 1541), e o germano-polonês Kurt Symanzik (1923-1983) (*Communications in Mathematical Physics* **18**, p. 227). Logo em 1971 (*Physical Review* **D3**, p. 1818), Wilson aplicou o GR nas **interações fortes**. Conforme vimos em verbetes desta série, em 1972, foi completada a unificação entre as interações eletromagnética [grupo U(1)] e fraca [grupo SU(2)] – a interação eletrofraca – que havia sido proposta, em 1967, por Weinberg, e pelo físico paquistanês Abdus Salam (1926-1996; PNF, 1979), em 1968. É importante destacar que, ainda em 1972, os físicos, o francês Claude C. Bouchiat (n.1932) e os norte-americanos John Iliopoulos (n.1940) e Philippe Meyer (n.1925) (*Physics Letters* **B38**, p. 519) e, independentemente, Gross e Jackiw (*Physical Review* **D6**, p. 477) mostraram que a renormalização do grupo SU(2) \otimes U(1) – grupo da interação eletrofraca – indicava a necessidade de mais de três quarks, além dos previstos pelos físicos norte-americanos Murray Gell-Mann (n.1929; PNF, 1969) e George Zweig (n.1947) (de origem russa), em 1964. É oportuno destacar que o GR deve-se aos trabalhos dos físicos suíços Ernst Carl Gerlach Stückelberg (1905-1984) e A. Petermann, em 1953 (*Helvética Physica Acta* **26**, p. 499), e de Gell-Mann e Low, em 1954 (*Physical Review* **95**, p. 1300).

Em 1972, quando Wilczek começou a trabalhar com Gross, este estava interessado em explicar o “scaling” por intermédio do cálculo da **função beta (β) de Euler** (1731) para a TY-M-S. Nessa ocasião, Coleman estava visitando a PU e perguntou a Gross sobre esse mesmo cálculo (ver um detalhe curioso sobre o sinal dessa função quando tratarmos dos trabalhos de Politzer), pois pedira ao seu aluno Politzer para fazê-lo. Assim, em 1973, Gross e Wilczek (*Physical Review Letters* **30**, p. 1343) e, independentemente, Politzer (*Physical Review Letters* **30**, p. 1346) apresentaram a descoberta da **liberdade assintótica nas interações fortes** e, como consequência, formularam o que hoje se conhece como QCD (“Quantum Chromodynamics”), segundo a qual a **interação forte** entre os quarks seria decorrente da troca entre si das partículas **glúons** (g_C) que são bosônicas (spin 1) e não-massivas. Tais partículas seriam responsáveis pela **cor** dos quarks, um novo número quântico proposto em 1964 e 1965 (vide verbete nesta série). Este número quântico representa na QCD o mesmo papel que a carga elétrica (e) representa na QED. Contudo, enquanto os **quanta vetoriais** da QED (o fóton γ) são únicos, os **quanta vetoriais** da QCD (g_C) são em número de oito (8), formados de pares de **cor-anticor**.

Portanto, para que os quarks (férmions) se mantenham sempre juntos, sem violar o **princípio da exclusão de Pauli**, de 1925, deverão trocar g_C entre si, a fim de mudarem de cor. Por exemplo, um **quark vermelho** (r, de “red”) para se transformar em **quark azul** (b, de “blue”) emite um **glúon vermelho-amarelo**, pois o **quark amarelo** (y, de “yellow”) é o **quark anti-azul** (\bar{b}). Destaque-se que, nesses trabalhos, Gross, Wilczek e Politzer, a **liberdade assintótica das interações fortes** por eles descoberta, explicava o “mistério” da razão dos quarks se apresentarem sempre confinados em hádrons vistos em baixa energia, mas são quase-livres vistos como **pártons** em alta energia (Greenberg, op. cit.). É oportuno lembrar que, quando o físico norte-americano Oscar Wallace Greenberg (n.1932) propôs, em 1964, o conceito de **cor** ele considerou que cada quark seria caracterizado por uma das três cores primárias do espectro luminoso: **vermelho** (r), **azul** (b) e **verde** (g, de “green”). Por sua vez, os antiquarks seriam caracterizados pelas cores complementares desse mesmo espectro: **ciano** (c= \bar{r} , de “cyan”), **amarelo** (y= \bar{b}) e **magenta** (m= \bar{g} , de “magenta”).

É interessante destacar que o nome **Quantum Chromodynamics** apareceu pela primeira vez, em 1978 (*Physics Reports* **C36**, p. 137), no trabalho dos físicos norte-americanos W. J. Marciano e Heinz Rudolf Pagels (1939-1988). Porém, o nome **chromodynamics** já havia sido cunhado por Gell-Mann, por volta de 1972, usando como raiz a palavra grega *chromo* que significa cor [Murray Gell-Mann, **The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex** (W. H. Freeman and Company, 1994)]. Destaque-se, também, que a descoberta da **liberdade assintótica** resolveu o problema do “screening” que havia sido discutido pelo físico russo Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962), em 1955 [Wolfgang Pauli Junior (Editor), **Niels Bohr and the Development of Physics** (McGraw-Hill)]. Basicamente, o “screening” significa que as partículas virtuais consideradas na renormalização da QED para evitar os infinitos, poderiam se acumular em torno de uma partícula real impedindo o cancelamento dos infinitos.

A QCD continuou a ser aprimorada com novos trabalhos. Com efeito, ainda em 1973, em trabalhos distintos, Weinberg (*Physical Review Letters* **31** p. 494), Gross e Wilczek (*Physical Review* **D8**, p. 3633), Gell-Mann, Haram Fritzsche e Heinrich. Leutwyler (n.1938) (*Physical Review* **D8**, p. 4482) estudaram as “anomalias” (infinitos) na QCD, que foram caracterizadas como correções logarítmicas para o “scaling”, em 1974, por Politzer e o físico norte-americano Howard Mason Georgi (n.1947) (*Physical Review* **D9**, p.426), e por Gross e Wilczek (*Physical Review* **D9**, p.980). Essas correções foram expressas em linguagem de **pártons**, em 1977, pelos físicos, o russo Yu. L. Dokshitzer (*Soviet Journal – JETP* **46**, p. 641) e os italianos G. Altarelli e Giorgio Parisi (n.1948) (*Nuclear Physics* **B126**, p. 298). Note-se que, em 1972 (*Soviet Journal of Nuclear Physics* **15**, p. 438), os físicos russos Vlademir N. Gribov (1930-1997) e L. N. Lipatov já haviam estudado o espalhamento inelástico profundo com teoria de perturbação.

Depois de trabalhar com a QCD por alguns anos, Gross voltou-se, na década de 1980, para a Teoria de Cordas (TC) que havia sido criada, em 1968, com os trabalhos independentes, do físico italiano Gabrielle Veneziano (n.1942) e do físico japonês M. Suzuki, ao descobrirem que a **função β de Euler**, interpretada como uma amplitude de espalhamento satisfazia todos os “axiomas” da **matriz S** para a interação hadrônica, exceto a unitariedade. A TC que se seguiu, desenvolvida em 1971, por Claude Lovelace, conhecida como Primeira Teoria de Cordas, era descrita em um espaço de 26 dimensões. Ainda em 1971, surgiu a Segunda Teoria de Cordas, em 11 dimensões (sendo uma temporal), nos trabalhos independentes dos físicos, o francês Pierre Ramon (n.1943), e o francês André Neveu (n.1943) [com quem Gross trabalhou, em 1974 (*Physical Review* **D10**, p. 3235), quando desenvolveram o hoje famoso **modelo quiral de Gross-Neveu**, no qual foi obtida a expansão $1/N$ da **matriz S** de campos bidimensionais fatorizáveis; esse modelo tem uma simetria interna global do tipo de grupo $U(N)$, onde U significa unitário ($U = U^+$) e N é a dimensão do espaço, sendo uma temporal] e o norte-americano John Henry Schwarz (n.1941). Em 1981, foi dado mais um passo para a TR com a inclusão da supersimetria [para cada férmion existe um companheiro bóson e vice-versa, as chamadas **s-partículas** (**s-aquarks** e **s-léptons**) e as mediadoras da interação entre elas, as **partículas ino: gravitino, fotino, gluonino, wino-mais/menos e zino-zero**], em 1982 e 1984, por Schwarz e o físico

inglês Michael Boris Green (n.1946), surgindo então a Teoria das Supercordas (TSC) baseada em grupos de “gauge” do tipo SO (32) (Grupo Special Orthogonal de 32 dimensões), livres de infinitos e, portanto, poderia incluir a interação gravitacional. Esse mesmo resultado foi encontrado, em 1985, em trabalhos independentes de Gross, Jeffrey A. Harvey, Emil Martinec e Ryan Rohm (*Physical Review Letters* **54**, p. 502) (o famoso *Quarteto de Cordas de Princeton*), e de Philip Candelas, Gary Horowitz, Andrew Strominger e o físico e matemático norte-americano Edward Witten (n.1951) (ex-aluno de Gross) (*Nuclear Physics* **B258**, p. 46) por intermédio do **grupo heterótico** de simetria formado pelo produto tensorial (\otimes) de E_8 , ou seja: $E_8 \otimes E_8$. (Note que o grupo E_α satisfaz o seguinte comutador entre ele e a hamiltoniana H_i : $[H_i, E_\alpha] = \alpha_i E_\alpha$). A partir da descoberta da **supercorda heterótica**, Gross realizou uma série de trabalhos em TSC como, por exemplo, em 1986 (*Nuclear Physics* **B256**, p. 253; **B267**, p. 75), quando voltou a trabalhar com o **grupo heterótico**, com os mesmos parceiros do trabalho de 1985. Em 1997, Gross publicou o livro intitulado **The Rise of the Standard Model** (Cambridge University Press), no qual mostrou como se desenvolveu o **Standard Model**, modelo que envolve a QED, a QCD e a **Teoria Eletrofraca**.

Para maiores detalhes da vida e dos trabalhos de Gross que o levaram ao Nobelato, ver sua *Autobiography e Nobel Lecture: The Discovery of Asymptotic Freedom and the Emergence of QCD* (08 de Dezembro de 2004; *Nobel e- Museum*).

Wilczek, que nasceu em Mineola, na cidade de Nova York, em 1951, estudou em escolas públicas do Queens, como a *Martin Van Buren High School*, desde criança tinha fascínio por quebra-cabeças, jogos e mistérios. Ele percebeu sua inclinação para a Matemática quando descobriu formas simples de realizar repetidas formas de exponenciação. Em 1970, bacharelou-se em Matemática na *Chicago of University*. Seu primeiro interesse pela Física Teórica aconteceu quando ele fez um curso de Simetria e Teoria de Grupos, ainda em Chicago, com o físico norte-americano Peter George Oliver Freund (n.1936). Em 1972 e 1974, ele obteve os graus de Mestre em Matemática e de Doutor em Física, respectivamente, na *Princeton University*, na qual foi aluno de doutorado de Gross, com quem descobriu a **liberdade assintótica das interações fortes** e a criação da QCD, segundo vimos acima quando tratamos dos trabalhos de Gross.

Agora, vejamos novos trabalhos de Wilczek relacionados com outros temas da Física como, por exemplo: Física da Matéria Condensada, Cosmologia, Teoria Quântica de Campos e Física das Partículas Elementares, dos quais destacaremos alguns deles. Com efeito, em verbetes desta série, vimos que a partícula **jota/psi** (J/Ψ) foi descoberta em 1974. No ano seguinte, em 1975, Callan, R. L. Kingsley, Treiman, Wilczek e A. Zee (*Physical Review Letters* **34**, p. 52) e Wilczek, Zee, Kingsley e Treiman (*Physical Review* **D12**, p. 2768), mostraram que essa partícula era formada de um par quark charm-antiquark charm ($J/\Psi = c\bar{c}$), confirmando o mesmo resultado que havia sido obtido, ainda em 1975, por S. Borchardt, V. S. Mathur e o físico japonês Susumu Okubo (n.1930) (*Physical Review Letters* **34**, p. 38); pelo físico norte-americano Thomas Appelquist (n.1941) e Politzer (*Physical Review Letters* **34**, p. 43); e Glashow e o físico espanhol Álvaro de Rújula (n.1944) (*Physical Review Letters* **34**, p. 46). Sobre o nome **charmonium** para o estado ligado $c\bar{c}$, é oportuno dizer que ele foi primeiramente sugerido por de Rújula, porém o nome apareceu no trabalho de Appelquist e Politzer. Mais tarde, em 1978 (*Physical Review Letters* **40**, p. 279), Wilczek estudou a invariância das simetrias paridade (P) e inversão temporal (T) na presença de **instantons** [pseudo-partículas decorrentes da solução da TY-M-S e encontradas pelo físico russo Aleksandr Morkowitsch Polyakov (n.1945), em 1975 (*Physics Letters* **B59**, p. 82)]. Ainda em 1978, Weinberg (*Physical Review Letters* **40**, p. 223) e Wilczek (*Physical Review Letters* **40**, p. 279) usaram a Supersimetria e confirmaram as partículas **áxions** (nome cunhado por Wilczek – nome de um detergente usado em lavanderias-, pois elas haviam clareado um problema com a corrente axial), partículas leves, sem spin, que haviam sido previstas pelos físicos, o italiano Roberto Daniele Peccei (n.1942) e a australiana Helen Rhoda Quinn (n.1943), em 1977 (*Physical Review Letters* **38**, p. 1440; *Physical Review* **D16**, p. 1791). Logo depois, em 1979, B. Toussaint, Treiman, Wilczek e Zee (*Physical Review* **D19**, p. 1036) usaram a Teoria da Grande Unificação – TGU (unificação entre as interações eletrofraca e forte, desenvolvida em 1972/1974, conforme vimos em verbete desta série) para calcular

o excesso de bárions no Universo. Note-se que cálculo análogo a esse foi também realizado, ainda em 1979, por J. Ellis, M. K. Gaillard e D. V. Nanopoulos (*Physics Letters* **B80**, p. 360; **B82**, p. 464), e por Weinberg (*Physical Review Letters* **42**, p. 850). A desintegração do próton decorrente da TGU foi investigada, também em 1979, por Weinberg (*Physical Review Letters* **43**, p. 1566) e por Wilczek e Zee (*Physical Review Letters* **43**, p. 1571).

Na continuação de suas pesquisas sobre novos temas da Física, em 1982 (*Nature* **298**, p. 633), Wilczek e o físico norte-americano Michael S. Turner (n.1949) examinaram a metaestabilidade do vácuo. Ainda em 1982 (*Physical Review Letters* **49**, p. 957), Wilczek desenvolveu a Estatística Fracionária (EF) para tratar de partículas que não são nem bósons e nem férmions, como, por exemplo, as que acontecem no Efeito Hall Quântico (EHQ), conhecidas como **quasepartículas laughlianas** (vide verbete nesta série). É interessante destacar que a EF desempenha um papel intermediário entre a Teoria Quântica de Campos e a Física da Matéria Condensada, nas quais existem excitações, chamadas **ânions**, que continuamente interpolam bósons e férmions. A EF foi ainda estudada, também em 1982 (*Physical Review Letters* **53**, p. 957), por Wilczek, Daniel Arovas e o físico norte-americano John Robert Schrieffer (n.1931; PNF, 1972). Em 1986 (*Physical Review* **D33**, p. 2079), Wilczek, M. Srednicki e o físico norte-americano Lawrence Maxwell Krauss (n. 1954) investigaram a matéria escura de nosso Universo (ver verbete nesta série). A cosmologia inflacionária envolvendo **áxions** foi discutida por Wilczek e Turner, em 1991 (*Physical Review Letters* **66**, p. 5), e por Wilczek, em 1992 (*Physical Review Letters* **69**, p. 132). As **quasepartículas laughlianas** foram analisadas, em 1996 (*Physical Review Letters* **77**, p. 4418), por Wilczek e Chetan Nayak. Em 1997 (*Physical Review Letters* **78**, p. 4679), Wilczek e Lorenzo Cornalba discutiram o confinamento cruzado (“cross-confinement”) e Teorias Múltiplas de Chern-Simons. Note que a Teoria de Chern-Simons [S. S. Chern and J. Simons, *Annals of Mathematics* **99**, p. 48 (1974)] é definida como qualquer 3-variedade topológica M, com ou sem fronteira. Em 1998, Wilczek, M. G. Alford e Krishna Rajagopal (*Physics Letters* **B422**, p. 247) estudaram a QCD em densidade finita de bárions; Wilczek, E. H. Fradkin, Nayak e A. Tselik (*Nuclear Physics* **B516**, p. 704) usaram o campo efetivo de Chern-Simons na investigação do EHQ. Ainda em 1998 (*Physical Review Letters* **80**, p. 4851), Wilczek analisou a simetria “gauge” em uma estrutura riemanniana-einsteiniana. Em 1999, Wilczek, Alford e Rajagopal (*Nuclear Physics* **B537**, p. 443) examinaram a quebra de simetria quiral na QCD de alta densidade; Wilczek e Tomas Schäfer (*Physical Review Letters* **82**, p. 3956) trataram da matéria hadrônica e a continuidade do quark; Wilczek fez uma revisão da Teoria Quântica de Campos (*Reviews of Modern Physics* **71**, p. 585). Em 2000, Wilczek, e os físicos indianos K. S. Babu e Jogesh C. Pati (n.1937) (*Nuclear Physics* **B566**, p. 33) analisaram a experiência SuperKamiokande (ver verbete nesta série) sobre a oscilação de neutrinos. Em 2001 (*Physical Review Letters* **86**, p. 1833), Wilczek e Michael M. Floger investigaram o efeito Josephson (vide verbete nesta série) sem supercondutividade. Em 2002 [*Physical Review Letters* **88**, paper number (pn) 161102], Wilczek, Jonathan L. Feng, Peter Fischer e Terri M. Yu observaram os neutrinos ultra energéticos que atingem nosso planeta. Em 2003 (*Physical Review Letters* **91**, pn. 032001), Wilczek, Elena Gubankova e W. Vincent Liu usaram a QCD no entendimento da superfluidez. Em 2005 (*Physical Review Letters* **95**, pn. 011303), Wilczek e Sean P. Robinson estudaram as relações entre a radiação (efeito) Hawking e as anomalias gravitacionais. Ainda em 2005 (*Nature* **433**, p. 239), Wilczek discutiu o problema da quebra espontânea de simetria “gauge” e a descoberta das **partículas de Higgs** (previstas em 1964), que são as partículas responsáveis pela massa das partículas elementares (e também delas próprias?) (ver verbete nesta série). Registre-se que sua descoberta é o objetivo primordial dos maiores aceleradores do mundo: FERMILAB e *Large Hadron Collider* (LHC), no CERN, uma vez que elas representam a coluna mestra do *Standard Model*. Até o presente momento, 22 de agosto de 2011, elas não foram descobertas.

Para maiores detalhes da vida e dos trabalhos de Wilczek (principalmente os que o levaram ao Nobelato), ver sua *Autobiography* e *Nobel Lecture: Asymptotic Freedom: From Paradox to Paradigm* (08 de Dezembro de 2004; *Nobel e- Museum*). Sobre outros trabalhos, ver: members.fortunecity.es/lamb1/wilczek_pr.html.

Na conclusão deste verbete, trataremos dos trabalhos de Politzer. Nascido na cidade de New York, em 1949, formou-se na *Bronx High Scholl Science*, em 1966, e recebeu o grau de bacharel na

University of Michigan, em 1969. Sob a orientação de Coleman, ele obteve o título de Doutor em Física, na Harvard University, em 1974. Segundo registramos acima, Politzer e, independentemente, Gross e Wilczek descobriram, em 1973, a **liberdade assintótica das interações fortes**; em 1974 (*Physics Reports* **14**, p. 129), Politzer confirmou essa descoberta; e, em 1975, juntamente com Appelquist previram a existência do **charmonium: $c\bar{c}$** . Note que, entre 1974-1977, Politzer foi jovem bolsista (“fellow junior”) na *Harvard Society of Fellows*, como Gross havia sido, no meio da década anterior.

Creio ser oportuno registrar um fato curioso que aconteceu na descoberta da **liberdade assintótica**, que ocorreu em 1973, conforme descrevemos acima. Tal fato está descrito por Politzer em sua *Nobel Lecture: The Dilemma of Attribution* (08 de Dezembro de 2004; *Nobel e- Museum*), na qual o leitor poderá ver maiores detalhes do trabalho de Politzer que o levou ao Nobelato. Aliás, é oportuno destacar que nessa *Lecture*, Politzer estranha a razão pela qual o trabalho dos físicos argentinos Juan José Giambiagi (1924-1996) e Carlos Guido Bollini (1926-2007) sobre a descoberta, em 1972, da **regularização dimensional** tenha sido esquecido, uma vez que essa descoberta foi publicada antes (*Physics Letters* **B40**, p. 566), enquanto que o trabalho de ‘t Hooft e de seu orientador, o físico holandês Martinus Justinus Godefridus Veltman (n.1931; PNF, 1999) sobre essa mesma **regularização**, só foi publicado na (*Physics Letters* **B44**, p. 189).

Agora, vamos ao citado fato. Coleman pediu a seu aluno Politzer para realizar o cálculo da **função β** para a TY-M-S, objetivando explicar o resultado encontrado no SLAC, em 1969, sobre o espalhamento inelástico profundo (**interação forte**) entre elétron e próton, que tratamos quando descrevemos os trabalhos de Gross. Politzer encontrou um valor negativo (-) completamente estranho, já que a positividade dessa função era uma característica da Teoria Quântica de Campos. Além do mais, o cálculo realizado por Wilczek, a pedido de Gross, também era positivo. Quando Politzer falou a Coleman que havia encontrado o sinal (-), houve certa inquietação por parte de Coleman, já que, por esse ocasião, em 1972, aconteceu o Encontro de Física de Partículas Elementares, no *Centre de Physique de Particules de Marseille*, na França, onde vários especialistas em Teoria Quântica de Campos ministraram conferências, dentre eles, Symanzik e ‘t Hooft, e a dúvida sobre o sinal havia permanecido. Com efeito, por ocasião de sua fala, Symanzik corroborou a positividade da **função β** ; em seguida falou ‘t Hooft que disse (publicamente ou em conversa particular com Symanzik, como se vê na *Nobel Lecture* de Politzer), que havia encontrado o sinal (-). Como Coleman recebera a informação de Gross de que Wilczek havia encontrado o sinal (+), pediu a Politzer que revisse o seu cálculo. Assim, como Politzer era ambidestro e ligeiramente disléxico, refez cuidadosamente seus cálculos e voltou a encontrar o sinal (-). Ao comunicar esse resultado a Coleman, este lhe disse que seu cálculo estava realmente certo, pois Gross e Wilczek perceberam o erro, corrigiram o artigo e o enviaram para a *Physical Review Letters*. Em vista disso, Politzer preparou seu artigo e também enviou para a *Physical Review Letters*. É por essa razão que o artigo de Politzer apareceu depois (p. 1346) do artigo de Gross e Wilczek (p. 1343), no Volume **30** da PRL. Eu presumo que foi essa a razão que fez o *Comitê Nobel* incluir o nome de Politzer para o PNF2004.

Vejamos, hoje, como se explica o polêmico sinal (-). Em Teoria Quântica de Campos, a **função β** é assim definida: $\beta(g) = \partial g / \partial \ln(\mu)$, onde g é o parâmetro de acoplamento e μ é a escala de energia de um dado processo físico. Na QED, a β é expressa por: $\beta(\alpha) = (2\alpha^2)/(3\pi)$, sendo $\alpha = e^2/(4\pi)$, a **constante de estrutura fina**. Na QCD, temos: $\beta(\alpha_s) = - [11 - (2n_f)/3] \times (\alpha_s^2)/(2\pi^2)$, onde $\alpha_s = g^2/(4\pi)$ e n_f é o número de *sabores* (“flavours”) de quarks. Essa expressão de $\beta(\alpha_s)$ mostra que, quando $n_f \leq 16$, tem-se $\beta(\alpha_s) < 0$, indicando que as constantes de acoplamento decrescem com o aumento da escala de energia e , então, a **liberdade assintótica das interações fortes** [[en.wikipedia.org/wiki/Beta_function_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Beta_function_(physics))].



ANTERIOR

SEGUINTE