

A Descoberta do Quark Top

José Maria Filardo Bassalo

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF

Rua Dr. Xavier Sigaud, 150

22.290-180 Rio de Janeiro/RJ, Brazil

Departamento de Física

Universidade Federal do Pará

66075-900 - Belém, PA - Brasil

ABSTRACT

Resumo - Neste trabalho vamos fazer um pequeno resumo histórico sobre as partículas elementares, principalmente a Teoria de Quarks, para poder mostrar a importância da descoberta do quark top.

No dia 26 de abril de 1994 os dois maiores grupos de colaboração (DZERO e CDF) do *Laboratório FERMI - Fermilab* (Batavia, Illinois, Estados Unidos) anunciaram que o acelerador de partículas – O TEVATRON – desse Laboratório, havia produzido e detectado 12 *quarks* do tipo *top* (um dos constituintes fundamentais da matéria), em duas experiências realizadas por 749 cientistas (354 do DZERO e 395 do CDF), dentre os quais se encontram 6 brasileiros (G.A. Alves (carioca), J.G. Rocha Lima (paraense), A. Kós A. Maciel (carioca), V. Oguri (carioca), A. Santoro (amazonense) e M. Souza (gaúcho)) do *Lafex* do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF, situado no Rio de Janeiro. Neste artigo, procurarei mostrar qual o significado dessa grande descoberta. (Aproveito a oportunidade para agradecer ao meu amigo o jornalista Lúcio Flávio Pinto, pela referência ao meu nome em seu *Jornal Pessoal 124*, o único paraense a registrar essa importante descoberta).

A procura da substância primordial da matéria – a *arché* (princípio, em grego) – que compõe o Universo, começou há mais de 25 séculos atrás com os gregos jônicos, os chamados *pré-socráticos*, isto é, aqueles que antecederam ao filósofo Sócrates de Atenas (c.470-399). Alguns deles, como os filósofos Leucipo de Mileto (c.460-c.370) e seu discípulo Demócrito de Abdera (c.470-c.380) apresentaram a visão “monoteísta” para a *arché*, já que consideravam que todas as coisas do Universo são formadas por um único tipo de partícula – o *átomo* (indivisível, em grego) –, eterno e imperecível, que se movimentava no vazio. Por sua vez, para o filósofo Empédocles de Akragas (atual Agrigento) (c.490-c.430) os componentes fundamentais do Universo eram em número de quatro: *água, ar, terra e fogo*. Essa visão pluralista também foi defendida pelo filósofo Aristóteles de Estagira (384-322).

As concepções una e/ou plural sobre os constituintes fundamentais do Universo continuaram a ser defendidas e divulgadas pelos cientistas durante a Idade Média e Renascença. Por exemplo, enquanto o médico e alquimista suíco-alemão Paracelso (1493-1541) defendia os elementos de Empédocles, os astrônomos, o polônes Nicolau Copérnico (1473-1543) e o italiano Galileu Galilei (1564-1642), defendiam a hipótese atomística de Demócrito e Leucipo, ao falarem em átomos de calor e luz. Porém, a idéia de que o átomo era uma parte real, porém invisível e indivisível da matéria, foi apresentada pela primeira vez pelo filósofo francês Pierre Gassendi (1592-1655), em 1647, ao fazer a distinção entre *átomo* e *molécula*, sendo esta uma reunião de átomos. Esse atomismo real foi aceito e complementado pelo físico inglês Robert Boyle (1627-1691) ao apresentar, em 1661, a tese de que todos os corpos eram constituídos por *elementos químicos*.

Muito embora a idéia de elemento químico considerasse o átomo como uma partícula indivisível, porém real da matéria, o atomismo científico só começou no final do século 18 e começo do século 19 com os químicos, os franceses Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), em 1789, e Joseph-Louis Proust (1754-1826), em 1799, o inglês John Dalton (1766-1844), em 1808, o também francês, Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850), em 1809, e o italiano Amedeo Avogadro (1776-1856), em 1811, que desenvolveram trabalhos nos quais procuravam relacionar massas e volumes dos compostos químicos, constituídos de átomos e moléculas. Esses trabalhos foram completados pelos químicos, o italiano Stanislao Canizarro (1826-1910), em 1858, e o russo Dmitri Ivanovich Mendeleiev (1834-1907), em 1869, ao apresentarem uma tabela dos pesos atômicos e moleculares, relacionada com as propriedades físico-químicas de diversos elementos químicos.

Foi ainda no século 19 que a indivisibilidade do átomo começou a ser questionada. Na tentativa de explicar o elemento boyleano, o físico francês André-Marie Ampère (1775-1836) propôs, em 1814, que o átomo era constituído de partículas subatômicas. Contudo, a primeira evidência experimental sobre a estrutura do átomo foi conseguida pelo físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867) ao observar, em 1833, que a passagem da corrente elétrica em soluções químicas era capaz de separar os seus metais. Esse fenômeno ficou conhecido como *eletrólise*. Essa evidência sobre a estrutura atômica foi corroborada com a *teoria iônica* desenvolvida pelo químico sueco Svante August Arrhenius (1859-1927; PNQ, 1903), em 1884, segundo a qual os *íons* (*cautions* (+), *anions* (-)) da solução eletrolítica, nada mais eram do que **átomos carregados de eletricidade**.

O significado do *átomo carregado de eletricidade* começou a ser entendido com as experiências realizadas pelo físico inglês Sir Joseph John Thompson (1856-1940; PNF, 1906), em 1897, nas quais demonstrou que os *raios catódicos* (que haviam sido descobertos nas experiências dos físicos alemães Julius Plücker (1801-1868), em 1858, e Eugen Goldstein (1850-1931), em 1876) eram formados de *elétrons*, partículas essas que haviam sido propostas pelo físico irlandês George Johnstone Stoney (1826-1911), em 1891, como as que possuíam a menor quantidade de eletricidade. A existência dos elétrons como constituintes fundamentais da matéria foi confirmada pelo físico húngaro-alemão Philipp Eduard Anton von Lenard (1862-1947; PNF, 1905) e também por Thompson, ao observarem, em 1899, que essas partículas carregadas negativamente, eram emitidas por superfícies metálicas, quando aquecidas, ou quando iluminadas com radiação ultra-violeta.

A idéia de que o átomo possuía uma estrutura constituída de partículas carregadas, foi considerada a partir da segunda metade do século 19. Com efeito, em 1862, o físico alemão Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) propôs que o átomo consistia de uma parte central maciça que atraía partículas carregadas e imponderáveis, através de uma força elétrica, analogamente ao sistema planetário. Novos modelos atômicos (tipo *planetário*) foram desenvolvidos pelos físicos, o holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902) em 1897; o inglês Joseph J. Larmor (1857-1942), ainda em 1897; o francês Jean-Baptiste Perrin (1870-1942; PNF, 1926), em 1901; e o japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950), em 1904. Antes, em 1903, Thomson havia proposto um modelo diferente para o átomo, segundo o qual este era composto de uma carga positiva distribuída uniformemente em uma esfera de raio de $\sim 10^{-8} \text{ cm}$, "embebida" de elétrons que vibravam em seu interior, tornando-se neutra.

A rivalidade entre esses modelos atômicos foi resolvida em consequência das experiências realizadas pelos físicos, os ingleses Sir Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908) e Sir Ernest Ernest Marsden (1889-1970) e o alemão Hans Geiger (1882-1945), em 1908, sobre espalhamento de partículas alfa (α) pela matéria. Em 1911, o próprio Rutherford analisando o resultado dessas experiências propôs que o *átomo* se comportava como um verdadeiro sistema planetário em miniatura, formado de uma parte central positiva, à qual denominou de *núcleo*, envolvido por uma nuvem de elétrons girando circularmente, e conhecida como *eletrosfera*. Dificuldades em conciliar esse modelo com as leis clássicas da Mecânica e da Eletrodinâmica levaram o físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962; PNF, 1922), em 1913, a formular o *modelo atômico quântico* que, por sua vez, foi completado pelos físicos, o inglês William Wilson (1875-1965), o japonês Jun Ishiwara (1881-1947) e o alemão Arnold Sommerfeld (1868-1951), em trabalhos distintos realizados em 1915.

Descoberto o *núcleo atômico* por Rutherford, uma nova questão foi colocada. Será que o mesmo é composto de outras partículas? A resposta a essa pergunta foi dada pelo próprio Rutherford ao realizar, em 1919, uma célebre experiência na qual analisou as cintilações que as partículas α (o núcleo do Hélio: ${}_2\text{He}^4$) provocavam em um anteparo de sulfeto de zinco (ZnS), depois que as mesmas atravessavam um cilindro contendo Nitrogênio (N). Acreditava Rutherford que a partícula α arrancava um núcleo de Hidrogênio (H) ao núcleo do N, transmutando-o no Oxigênio (O), segundo a reação: ${}_2\text{He}^4 + {}_7\text{N}^{14} \rightarrow {}_8\text{O}^{17} + {}_1\text{H}^1$. Ao apresentar, em 1920, o resultado dessa experiência a seus pares, Rutherford propôs o nome de *próton* (que significa *primeiro*, em grego) ao núcleo ${}_1\text{H}^1$, bem como defendeu a idéia de o isótopo ${}_8\text{O}^{17}$ que obtivera, poderia ser o bem conhecido isótopo ${}_8\text{O}^{16}$, acrescido de uma partícula neutra. Portanto, para Rutherford, o *núcleo atômico* era constituído de partículas carregadas positivamente (*próton - p*) e de partículas neutras. Essas idéias foram confirmadas pelos físicos ingleses, Patrick Blackett (1897-1974; PNF, 1948) ao fotografar pela primeira vez, em 1925, a trajetória de um próton em uma *câmara de névoa* (que havia sido inventada pelo físico norte-americano Charles Wilson (1869-1959; PNF, 1927, em 1911)), e Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935), em 1932, ao descobrir a partícula neutra rutherfordiana (à qual denominou de *nêutron - n*) numa reação do tipo: ${}_2\text{He}^4 + {}_5\text{B}^{11} \rightarrow {}_7\text{N}^{14} + {}_0\text{n}^1$.

O conhecimento de que o núcleo atômico era constituído de prótons e nêutrons, colocava em cheque a sua estabilidade, pois os prótons deveriam sofrer a repulsão coulombiana, já que são partículas carregadas positivamente. Para contornar essa dificuldade, os físicos, o russo D. Iwanenko, o alemão Werner Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932) e o italiano Ettore Majorana (1906-1938) propuseram independentemente, também em 1932, a hipótese de aquelas partículas se comportavam como partículas únicas - os *nucleons*, que interagiam por intermédio de uma força atrativa capaz de superar a força repulsiva coulombiana entre os prótons. Em vista disso, em 1934, Heisenberg sugeriu que essa força atrativa decorria da troca de elétrons (e^-) e de neutrinos (ν) entre os nucleons. (Os neutrinos haviam sido previstos teoricamente pelo físico Wolfgang Pauli (1900-1958; PNF, 1945), em 1930, e considerados pelo físico ítalo-norte-americano Enrico Fermi (1901-1954; PNF, 1938) ao formular, também em 1934, a sua teoria da *força fraca*, como responsável pelo decaimento β : $n + p + e^- + \nu$). Contudo, o cálculo detalhado dessa força mostrou que ela não era capaz de manter os nucleons juntos. Para contornar esse problema, em 1935, o físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981; PNF, 1949) propôs a idéia de que essa força atrativa (a *força nuclear*, depois conhecida como *força forte*) entre os nucleons decorria da troca de partículas entre si, porém a massa das mesmas deveria ser da ordem de $200 m_e$ (m_e =massa do elétron). Como a massa dessas novas partículas situava-se entre as massas do elétron e do próton, elas ficaram conhecidas como *mésons*. No início, essa proposta de Yukawa foi recebida com um certo ceticismo por parte da comunidade científica. No entanto, em 1937, os físicos norte-americanos Carl Anderson (1905-1991; PNF, 1936) e Seth Neddermeyer (1907-1988) descobriram nos raios cósmicos partículas fortemente ionizantes e com massa aproximadamente igual a prevista por Yukawa. (É oportuno registrar que antes, em 1932, Anderson havia descoberto o *pósitron*, partícula idêntica ao elétron, porém de carga positiva (e^+), prevista teoricamente pelo físico inglês Paul Dirac (1902-1984; PNF, 1933), em 1928).

A descoberta do méson ensejou uma série de trabalhos (realizados entre 1937 e 1947),

no sentido de saber se, realmente, tratava-se da partícula yukawiana. Com efeito, ao realizarem experiências com mésons andersonianos carregados, os físicos italianos Marcello Conversi (1917-1992), Ettore Pancini (? - 1981) e Oreste Piccioni (1915-) observaram em 1947 que tais partículas não sofriam interação (força) forte e, conseqüentemente, não poderiam ser as partículas propostas por Yukawa. Ainda nesse mesmo ano de 1947, os físicos, os ingleses Sir Cecil Frank Powell (1903-1969; PNF, 1950) e H. Muirhead, o brasileiro César Lattes (1924-) e o italiano Giuseppe Occhialini (1905-1993) após examinarem ao microscópio *emulsões nucleares* expostas à incidência de raios cósmicos, em Pic du Midi (Pirineus) e em Chacaltaya, nos Andes bolivianos, concluíram que a colisão desses raios com núcleos de O e de N da atmosfera terrestre produzia dois tipos de mésons, inicialmente chamados de *mésons primários* e *mésons secundários*, e posteriormente, de *méson π* (hoje, *píon*) e *méson μ* (hoje, *muon*), com massas $\sim 273m_e$ e $\sim 210m_e$, respectivamente, e que eram, justamente, os mésons previstos por Yukawa e o detectado por Anderson. Em 1948, Lattes e os físicos Eugene Gardner (1913-1950), John Burfening e Walter Barras produziram artificialmente os primeiros mésons π^+ e π^- no *sincrociclotron* da Universidade da Califórnia, em Berkeley.

Ainda em 1947, os físicos ingleses George Rochester (1908-) e Clifford Butler (1922-), da Universidade de Manchester, na Inglaterra, ao realizarem experiências relacionadas com a penetração de raios cósmicos em *câmaras de névoa* em grandes altitudes, observaram em tais câmaras, trajetórias em forma de V provenientes de uma origem comum e interpretaram-nas como rastros deixados por partículas carregadas decorrentes da desintegração de uma partícula neutra, desconhecida, à qual deram o nome de *partícula V* (mais tarde denominada de *lâmbda* (Δ^0)), devido à forma da trajetória por eles observada. Novas experiências realizadas por Rochester e Butler, ainda em 1947, evidenciaram a presença de novas partículas tipo V, desta vez, carregadas ($V^{+,-}$). O estudo em detalhes dessas novas partículas só foi possível ser feito depois da construção do *Cosmotron* de 3 GeV (1 GeV = 10^9 eV, sendo 1 eV a energia de um elétron sob a diferença de potencial de 1 Volt), do *Brookhaven National Laboratory* - BNL e da instalação, no mesmo, de uma *câmara de bolhas* (que havia sido inventada pelo físico norte-americano Donald Glaser (1926- ; PNF, 1960), em 1952), no período de 1952-1953, para poder produzir e observar suas interações com outras partículas. Essas partículas foram chamadas de *estranhas* por que eram produzidas por força forte, entre píons e nucleons, e se desintegravam por força fraca.

Analogamente ao que Mendeleiev houvera feito, em 1869, com os elementos químicos, isto é, classificando-os, o físico francês Louis Leprince-Ringuet (1901-) tentou uma primeira classificação das partículas elementares. Desse modo, em 1953, considerou que as partículas com massas intermediárias entre o nêutron (n) e o dêuteron (${}_1H^2$), deveriam ser chamadas de *hyperons* (*super*, em grego), e as com massa maior que a dos mésons π e menor que a do próton (p), deveriam receber o nome de *mésons K* (*kaons*). Por sua vez, em 1958, o físico russo L.B. Okun denominou as partículas que são sensíveis à força forte de *hádrons* (*grande*, em grego) que, por sua vez, são compostos de dois grupos: *mésons* (píons, kaons) de spin inteiro, e *bárions* (nucleons, hyperons) de spin fracionário. Com a descoberta do neutrino associado ao muon (ν_μ), em 1962, em experiências realizadas sob a liderança dos físicos norte-americanos Leon Lederman (1922- ; PNF, 1988), Jack Steinberger (1921- ; PNF, 1988) e Melvin Schwartz

(1932- ; PNF, 1988), o elétron (e^-) e o muon (μ) e seus respectivos neutrinos (ν_e, ν_μ) foram denominados de *léptons* (*fino*, em grego), como sendo as partículas sensíveis à força fraca. Mais tarde, os físicos, o norte-americano Steven Weinberg (1933- ; PNF, 1979), em 1967, e o paquistanês Abdus Salam (1926- ; PNF, 1979), em 1968, desenvolveram a famosa *Teoria Eletrofraca* (hoje, conhecida com *Modelo Padrão*), segundo a qual os léptons são reunidos nos dupletos (e, ν_e) e (μ, ν_μ).

Com o objetivo de melhor compreender as partículas elementares, o físico japonês Shoichi Sakata utilizou a álgebra do grupo SU(3) no sentido de classificá-las. Assim, em 1956, escolhendo o próton (p), o nêutron (n) e a lâmbda (Δ^0) e suas respectivas antipartículas ($\bar{p}, \bar{n}, \bar{\Delta}^0$) como representações irredutíveis daquele grupo, Sakata conseguiu identificar as partículas até então conhecidas em função dessas três, como, por exemplo: $\pi^+ = p\bar{n}$, $K^+ = p\bar{\Delta}^0$ e $\Sigma^+ = p\bar{n}\Delta^0$. Além disso, esse modelo previa um bárion do tipo ($pn\bar{\Delta}^0$).

Apesar do sucesso do *modelo de Sakata*, haviam algumas dificuldades com o mesmo, principalmente porque o bárion previsto não foi detectado. Desse modo, outras teorias foram tentadas com o objetivo de entender as partículas elementares. Assim, em 1959, o físico italiano Tullio Regge resolveu a equação de Schrödinger com momento angular total J complexo. Esta solução levou ao que se denominou de Polos de Regge. Mais tarde Chew e Frautschi observaram que as partículas com maior momento angular total (J) (que é a soma do momento angular orbital ℓ e do spin S) eram mais pesadas, deduzindo, então, uma relação entre J e a massa m da partícula. Ao traçar um diagrama de J versus m , verificou que as partículas *reais* ocupavam pontos nesse diagrama correspondentes a valores inteiros ou semi-inteiros de J , pontos esses que foram denominados, posteriormente, de *pólos de Regge* e, as curvas que ligavam “estados” de uma mesma partícula foram denominadas de *trajetórias de Regge*. Embora algumas “trajetórias” houvessem sido traçadas com partículas então conhecidas, outras “trajetórias” de Regge não foram encontradas. Mais tarde, em 1962, Geoffrey Chew e S.C. Frautschi desenvolveram uma nova teoria segundo a qual, cada partícula hadrônica era constituída de uma combinação de todas as outras e cuja comunicação entre elas era feita pela força forte. Dentro desse esquema “democrático” de classificação de hádrons – nenhuma partícula é fundamental –, a diferença de massa entre elas era determinada pela dinâmica da força forte, daí esse modelo haver recebido o nome de *dinâmica “bootstrap”*. Para esses físicos, os *léptons* eram “aristocratas”, pois não se enquadravam nesse esquema “democrático”.

Antes, em 1961, a álgebra do SU(3) foi retomada para explicar as partículas elementares. Com efeito, os físicos, o norte-americano Murray Gell-Mann (1929- ; PNF, 1969) e, independentemente, o israelense Yuval Ne’eman (1925-) ao analisarem as dificuldades do modelo de Sakata, observaram que as mesmas seriam contornadas se tomassem uma outra representação irredutível do SU(3), um octeto ao invés do tripleto considerado por Sakata. Nessa ocasião, já era conhecido o octeto bariônico ($n, p, \Delta^0, \sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Xi^0, \Xi^-$) caracterizado por $J^P = \frac{1}{2}^+$, em que P representa a paridade. Esse *modelo do octeto* (inicialmente, chamado por Gell-Mann de *via octupla* (“eight-fold way”)) teve um espetacular sucesso, já que a previsão que fizera da partícula Ω^- foi confirmada com a descoberta da mesma, em 1964, por uma equipe de 34 físicos.

Apesar do enorme sucesso do modelo do octeto, este apresentava sérias dificuldades, principalmente porque as massas dos octetos mesônicos ($K^+, K^0, K^-, \bar{K}^0, \pi^+, \pi^0, \pi^-, \eta^0$),

caracterizado por $J^P = 0^-$, e $(K^{*+}, K^{*0}, K^{*-}, \bar{K}^{*0}, \rho^+, \rho^0, \rho^-, \omega^0)$, caracterizado por $J^P = 1^-$, não se enquadravam naquele modelo.

As dificuldades apontadas acima levaram Gell-Mann (ao acatar uma 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, consideravam um novo tripleto (diferente do de Sakata), constituído por novas partículas denominadas de **quark** por Gell-Mann e de **aces**, por Zweig. (O nome *quark* foi tirado do livro *Finnegan's Wake*, de 1939, do escritor irlandês James Joyce (1882-1941) e da seguinte estrofe: *Three quarks for Muster Mark*). Segundo esse *modelo de quarks*, estes apresentavam três *sabores* ("flavours"): *up* (*u*), *down* (*d*), *strange* (*s*) e suas respectivas anti-partículas $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$, com as respectivas cargas elétricas: $+\frac{2}{3}e, -\frac{1}{3}e, -\frac{1}{3}e; -\frac{2}{3}e, +\frac{1}{3}e, +\frac{1}{3}e$. Ainda segundo esse modelo, os bárions são formados de três quarks (por exemplo: $p = (ud)u, n = (ud)d, \Omega^- = (sss)$), e os mésons por um quark e um anti-quark (por exemplo: $\pi^+ = u\bar{d}, K^+ = u\bar{s}$).

Esse modelo de quarks apresentava duas grandes dificuldades: a primeira, relacionava-se com sua carga elétrica, que era uma fração da carga (*e*) do elétron (esta considerada como a menor carga existente no Universo); a segunda, dizia respeito à violação do *princípio da exclusão de Pauli*, formulado em 1925, afirmando que mais de duas partículas idênticas e com spin fracionário, não podiam ficar juntas. Ora, segundo o modelo de quarks, três hádrons eram formados de quarks iguais ($\Delta^{++} = (uuu), \Delta^- = (ddd)$ e $\Omega^- = (sss)$), porém, os quarks são partículas que têm spin fracionário $\frac{1}{2}$. 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 Δ^{++} 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 π , que têm estrutura quarkônica dupla, poderia apresentar, por exemplo, a seguinte estrutura: $\pi^+ = (u(\text{vermelho}), \bar{d}(\text{cyan}))$.

A descoberta do ν_μ em 1962 (e sua confirmação em 1964) e a adoção da *cor*, também 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. Prendtiki; B.J. Bjorken e Sheldon Lee Glashow (1932- ; 1979); Z. Maki e Y. 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. Illiopoulos e L. Maiani desenvolveram a *teoria do charme* (conhecida com *teoria GIM*) para estudar as propriedades de simetria nas interações (forças) fracas entre léptons e a matéria hadrônica.

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

mente, 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".

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 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 ($\sim 6000m_e$) e de spin-paridade $J^P = 1^-$, que foi chamada de ψ 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 interação (força) forte, isto é, eram hadrônicas. Contudo, como sua elevada massa não permitia enquadrá-las no modelo de quarks de Gell-Mann-Zweig, os físicos T. Appelquist e Politzer; E. Eichten, K. Gottfried, T. Kinoshita, J. Kogut, K.D. Lane e T.M. Yan; S. Okubo, V.S. Mathur e S. Borchardt, independentemente, propuseram um modelo baseado na teoria *GIM*, segundo o qual essas partículas seriam estados ligados do quark c e de seu \bar{c} , isto é: $\frac{\psi}{J} = c\bar{c}$. Esse estado ligado - denominado por Appelquist e Politzer de *charmonium* - apresentava o novo número quântico total de charme $C=0$.

O modelo de quarks de Gell-Mann-Zweig (1964) despertou um grande interesse por parte dos físicos experimentais que passaram, 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 esses *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.

Novas experiências realizadas com o objetivo de detectar quark, demonstraram que esta partícula não aparece isoladamente e que sua presença em uma determinada reação é comprovada por experiências do tipo *Drell-Yan-Lederman*. (Essa experiência foi realizada por Lederman, em 1968. Nela, basicamente, um feixe de prótons e de alta energia é dirigido a um alvo fixo. No interior deste, a alta energia do próton produz um fóton que, por sua vez, produz um par de μ e $\bar{\mu}$ que é, finalmente, detectado. Em 1972, o físico Sidney Drell e seu estudante Tung Mo Yan interpretaram essa experiência, da seguinte maneira: um quark do próton incidente encontra um anti-quark do alvo, havendo então um aniquilamento traduzido pelo fóton produtor do par de muons). Desse modo, a partir de 1975, foram desenvolvidos modelos teóricos que supõem que os quarks estão presos por *potenciais de confinamento*, que aumentam com a distância. (É oportuno destacar que

os físicos brasileiros Normando Celso Fernandes (1936-) e Mauro Sérgio Dorsa Cattani (1942-), apresentaram em 1982 a hipótese da existência de novas partículas – os *gentileons* – que seriam os *quarks*, com a vantagem de que o *confinamento* surge naturalmente do modelo que levou a essa hipótese).

A suposta simetria quadrangular universal (4 quarks: u, d, s, c ; 4 léptons: e, ν_e, μ, ν_μ) foi rompida com a descoberta de uma nova partícula em uma experiência realizada em outubro de 1975, por uma equipe de 34 pesquisadores da Universidade de Stanford (dos quais participaram Richter e Martin L. Perl), na qual foi estudada a colisão elétron-pósitron ($e^- - e^+$), com a produção anômala de elétrons e de muons, produção essa que decorria do decaimento de uma nova partícula, inicialmente denominada de U , inicial da palavra *unknown* (*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* (τ), inicial da palavra *τριτων* (*triton*, terceiro em grego). Essa partícula tem massa de $\sim 3500m_e$ e seu spin vale $\frac{1}{2}$.

Como a teoria eletrofraca de Salam-Weinberg indicava que os léptons devem ser reunidos em dupletos, então esse novo lépton τ deveria formar também um novo duplet ($\tau - \nu_\tau$). Em vista disso, a idéia de que a Natureza é regida por uma simetria universal fez com que os físicos reforçassem a idéia (apresentada desde 1974 com a descoberta do quark c) de que deveriam existir mais dois “sabores” de quarks: *verdade* (*truth*, em inglês) e *beleza* (*beauty*, em inglês), uma vez que a existência de seis (6) léptons, sugeria a existência de também seis (6) quarks. Em 1977, Lederman denominou-os de *quark b* (de *bottom*, fundo em inglês), com carga de $+\frac{2}{3}e$, e *quark t* (de *top*, topo em inglês), de carga $-\frac{1}{3}e$.

A descoberta do quark b foi feita por Lederman e mais 14 físicos do FERMILAB, numa experiência do tipo: $p + \text{núcleo (Cu, Pb)} \rightarrow \mu^- + \mu^+ + \text{“anything”}$, sendo esse “algo mais” uma partícula de massa $\sim 20000m_e$, à qual Lederman chamou de partícula *Upsilon v*, formada do par *bottom-antibottom*, isto é: $v = b\bar{b}$.

Com relação ao quark t , as evidências de sua existência ocorreram com estudos feitos com as partículas W^\pm e Z^0 (mediadoras das forças fracas). Os W^\pm e Z^0 foram descobertos em 1983, no CERN – Centre Européen de Recherche Nucléaires, por pesquisadores liderados pelo físico italiano Carlo Rubbia (1934- ; PNF, 1984) e pelo engenheiro holandês Simon van der Meer (1925- ; PNF, 1984).

No FERMILAB, evidências da existência dessa partícula aconteceram durante a tomada de dados de 1992/1994 em dois experimentos. Estes experimentos (DZERO e CDF) parecem confirmar a existência do *quark t*, com uma massa $\sim 350000m_e$, e muito mais maciço que os demais quarks até então conhecidos, já que as massas dos quarks u, d, s, c e b , valem, respectivamente: $m_u \sim 8m_e$, $m_d \sim 14m_e$, $m_s \sim 300m_e$, $m_c \sim 3000m_e$ e $m_b \sim 10000m_e$. Nessa experiência, foi estudada a colisão de um estado ligado $t\bar{t}$, e os seguintes decaimentos: $t\bar{t} \rightarrow e\bar{e}\nu\bar{\nu}, e\mu\nu\bar{\nu}, \mu\mu\nu\bar{\nu}$ e $t\bar{t} \rightarrow e + \nu + \text{“jatos”}, \mu + \nu + \text{“jatos”}$.

O leitor interessado em mais detalhes sobre a Crônica das Partículas Elementares, deverá consultar essa pequena Bibliografia:

- ASIMOV, I. 1984. *The History of Physics*. Walker and Company, N.Y.
- BASSALO, J.M.F. *Crônicas da Física*. Tomo 1 (1987); Tomo 2 (1990); Tomo 3 (1992); Tomo 4 (1994, no prelo), GEU/UFPA.
- FEINBERG, G. 1978. *What is the World Made of?* Anchor Press.
- HAWKING, S. 1994. *O Fim da Física*. Gradiva, Portugal.
- 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.
- ROSMORDUC, J. 1983. *De Tales a Einstein*. Editorial Caminho, 4. Portugal.
- SALAM, A. 1991. IN: *Em Busca da Unificação*. Gradiva, Portugal.
- SALEMA, I. 1994. *Público*, 29 de Abril, pg. 29, Portugal.
- SEGRÉ, E. 1987. *Ros Raios-X aos Quarks*. Editora da Universidade de Brasília.
- THUILLIER, P. 1994. *De Arquimedes a Einstein*. Jorge Zahar Editor.
- TREFIL, J.S. 1980. *From Atoms to Quarks*. Charles Scribner's Sons.
- YANG, C.N. 1962. *Elementary Particles: A Short History of Some Discoveries in Atomic Physics*. Princeton University Press.
- FERMILAB-PUB-94/097-E/CDF/PUB/TOP/PUBLIC/2561.
- PHYSICAL REVIEW LETTERS, 72 (14), 4 April 1994, pg. 2138.