



SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



A Descoberta dos Bárions.

Em verbetes desta série, vimos que os **bárions** (nome cunhado em 1954) são Partículas Elementares de spin fracionário ($1/2$), sensíveis às interações eletromagnética, fraca e forte, obedecem à **Estatística de Fermi-Dirac** (1926) (portanto são **férmions**) e são reunidas em famílias [Núcleons, Lâmbdas (Λ), Sigmas (Σ), Xis (Ξ), Deltas (Δ), Ômegas (Ω), Charmosos, Bonitos]. Como naqueles verbetes também falamos da descoberta de dessas partículas, neste verbete vamos destacar outros aspectos dessa e de novas descobertas.

O primeiro **bárion** descoberto foi o **próton** (p). Vejamos como isso aconteceu. A existência de partículas carregadas positivamente havia sido evidenciada nas experiências realizadas pelo físico francês Jean Baptiste Perrin (1870-1942; PNF, 1926), em 1895 (*Comptes Rendus de l'Academie de Sciences de Paris* **121**, p. 1130), ao observar que os *raios canais* (“Kanalstrahlen”) observados pelo físico alemão Eugen Goldstein (1850-1931) em 1886, eram desviados em uma descarga elétrica, tomando o sentido contrário dos “raios catódicos”, estes também descobertos por Goldstein, em 1886 (sobre esses “raios”, vide verbete nesta série). Em 1897 (*Verhandlungen der Physikalische Gesellschaft zu Berlin* **16**, 165), o físico alemão Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928; PNF, 1911) estudou a deflexão dos *raios canais* em campos elétrico e magnético e, examinando a direção dessa deflexão, concluiu que tais “raios” eram partículas carregadas positivamente com a relação massa/carga (m/e) milhares de vezes maiores do que a mesma relação encontrada, também em 1897, pelo físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) dos “raios catódicos” (elétrons) (vide verbete nesta série). Wien observou ainda que, enquanto os “raios catódicos” apresentavam sempre aquela mesma relação, porém, para os *raios canais* essas relações em diferentes. Em vista disso, concluiu que tais “raios” eram átomos ou moléculas do gás dentro do “tubo de raios catódicos” que se tornavam positivos quando tinham seus elétrons arrancados pelos “raios catódicos” quando estes viajavam do catodo (-) para o anodo (+). Em vista disso, esses íons positivos eram atraídos pelo catodo (alguns deles passavam pelos buracos desse eletrodo) e repelidos pelo anodo.

Mais tarde, em 1907 (*Philosophical Magazine* **13**, p. 561), o físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) também determinou a relação (m/e) dos *raios canais*, denominados por ele, nessa ocasião, de *raios positivos*. De 1907 até 1913, Thomson continuou suas experiências com os *raios positivos* provenientes da descarga elétrica em gases (atômicos e moleculares) ionizados, como, por exemplo, o hidrogênio (H e H_2) e o oxigênio (O e O_2). É oportuno registrar que, em 1913 (*Proceedings of the Royal Society of London* **89**, p. 1), Thomson observou que os *raios positivos* do gás neônio (Ne) apresentavam dois valores para a relação (m/e). A partir daí, como vimos em verbete desta série, desenvolveu-se o conceito de **isótopo** de um elemento químico. [Edmund Taylor Whittaker, **A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories** (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1951) e Steven Weinberg, **The Discovery of Subatomic Particles** (Penguin Books, 1993).]

Conforme vimos em verbete desta série, o **núcleo atômico** foi descoberto pelo físico neozelandês-inglês Lord Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908), em 1911, estudando o espalhamento de partículas α e β pela matéria. Na continuação de suas experiências com esse tipo de espalhamento, Rutherford formulou a hipótese de que os núcleos de todos os elementos químicos eram formados de “núcleos do hidrogênio” (partícula H ou **elétron positivo**) e de elétrons. Por exemplo, em 1914 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A90**, p. 462), ele afirmou que a partícula α era constituída de quatro **elétrons positivos** (H) e dois elétrons (e), ou seja: $\text{He} = 4\text{H} + 2\text{e}$. Contudo, para saber se realmente os núcleos atômicos apresentavam essa constituição, era necessário parti-lo. Assim, em 1917, quando ainda se encontrava na *Universidade de Manchester*, Rutherford iniciou suas experiências que o levaram a “quebrar” o núcleo atômico. É oportuno registrar que, nessa essa ocasião, aconteceu a célebre resposta que ele deu ao Governo Inglês que lhe pediu para ir até Paris, ainda na vigência da *Primeira Guerra Mundial* (1914-1918), discutir com o físico francês Paul Langevin (1876-1946) sobre o desenvolvimento do **sonar**, para detectar os submarinos nazistas. Ao receber o convite, ele respondeu: *Agora não posso, vou mais tarde, pois se rompo o átomo isso será mais importante do que a vossa guerra.* (Weinberg, op. cit.)

Um primeiro resultado do rompimento do **núcleo atômico** aconteceu, em 1919 (*Philosophical Magazine* **37**, pgs. 537; 571; 581), quando Rutherford analisou as cintilações que partículas α de 5 MeV de energia, oriundas de uma fonte de rádio (Ra), provocavam em um anteparo de sulfeto de zinco (ZnS), depois que as mesmas atravessavam um cilindro contendo gases. Nessa análise, Rutherford observou que as cintilações eram provocadas quando no cilindro era colocado um dos seguintes tipos de gás: hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N). No caso do cilindro conter H, acreditava Rutherford que a α expulsava o núcleo desse elemento (H) e este iria, portanto, colidir com o anteparo de ZnS. No caso do gás nitrogênio, Rutherford acreditava, também, que a α transmutava esse elemento químico em oxigênio, e emitindo então a partícula H, segundo uma reação do tipo (em notação atual): ${}_2\text{He}^4 + {}_7\text{N}^{14} \rightarrow {}_8\text{O}^{17} + {}_1\text{H}^1$. O ${}_1\text{H}^1$ (núcleo do hidrogênio) seria então responsável pela cintilação. Em consequência dessa “primeira experiência alquímica”, ele escreveu, em um dos artigos (p. 581) citados acima, o seguinte (Weinberg, op. cit.): *Dos resultados obtidos até aqui é difícil evitar a conclusão de que átomos de longo alcance resultantes de colisões de partículas α com átomos de nitrogênio não são mais átomos de nitrogênio, mas, provavelmente átomos de hidrogênio, ou átomos de massa 2. Se este for o caso, devemos concluir que o átomo de nitrogênio é desintegrado sob intensas forças ocorridas em uma colisão próxima com uma veloz partícula α , e que o átomo de hidrogênio que é liberado forma uma parte constituinte do núcleo do nitrogênio ... O resultado como um todo sugere que, se partículas α - ou partículas similares - de energias similares fossem usadas em outras experiências, podemos esperar quebrar a estrutura nuclear de átomos mais leves.*

Como se viu acima, no terceiro artigo de 1919, Rutherford não fez referência sobre a descoberta do **próton**. Ele apenas falou na possibilidade de provocar rupturas do **núcleo atômico** de elementos mais leves. Somente em 1920 (*Nature* **106**, p. 357), por ocasião do *Cardiff Meeting da Associação Britânica para o Desenvolvimento da Ciência*, Rutherford propôs o nome de **próton** (que significa “primeiro”, em grego) ao **núcleo do hidrogênio** (${}_1\text{H}^1$) (Weinberg, op. cit.). Registre-se que, em 1925 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A107**, p. 349), o físico inglês Patrick Maynard Stuart Blackett (1897-1974; PNF, 1948) conseguiu fotografar pela primeira vez a trajetória do **próton** em uma **câmara de Wilson** (vide verbete nesta série), depois de examinar as fotografias de cerca de 400.000 rastros de partículas α atravessando esse dispositivo. [Lawrence Badash, **Ernest Rutherford – IV: Dicionário de Biografias Científicas, Volume III** (Contraponto, 2007).]

O segundo **bárion** descoberto foi o **nêutron** (n). A idéia da existência de uma partícula neutra – o **nêutron** - foi sugerida também por Rutherford em consequência de suas experiências

realizadas desde 1917 sobre o espalhamento de partículas α pela matéria. Essa idéia ele o expôs em sua *Bakerian Lecture* apresentada na *Royal Society*, em junho de 1920 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A97**, p. 374). Nessa *Lecture*, Rutherford afirmou que o isótopo ${}_8\text{O}^{17}$ que obtivera, em 1919, poderia ser o bem conhecido isótopo ${}_8\text{O}^{16}$, acrescido de uma partícula neutra com massa aproximadamente igual a do **próton** (${}_1\text{H}^1$), partícula essa que seria a composição de um **próton** e de um elétron girante que neutralizava a carga protônica. Desse modo, dessas suas experiências, Rutherford propôs o modelo segundo o qual os núcleos dos elementos químicos eram formados de **prótons** e de elétrons. Esse modelo, por exemplo, explicava porque o núcleo do hélio (${}_2\text{He}^4$), de peso atômico 4 e número atômico 2, tinha uma massa atômica que equivalia a massa de quatro **prótons**, enquanto a carga elétrica equivalia a de dois. Por sua vez, o oxigênio (${}_8\text{O}^{16}$), de peso atômico 16 e número atômico 8, seria constituído de 16 **prótons** e de 8 elétrons.

Esse modelo nuclear Rutherfordiano apresentava uma questão importante, qual seja, a de saber que tipo de força mantinha os elétrons presos aos **prótons**, para torná-los neutros. Já em 1921 (*Philosophical Magazine* **42**, p. 923), os físicos, o inglês Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935) (que havia sido aluno de Rutherford em Manchester) e o canadense Étienne Samuel Bieler (1895-1929), que trabalhavam no *Cavendish Laboratory* da *Universidade de Cambridge*, dirigido por Rutherford desde 1919, afirmaram que essa força não poderia ser a força Coulombiana (inverso do quadrado da distância) e sim, uma força de enorme intensidade. Logo depois, em 1923 (*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **21**, p. 686) e em 1924 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A105**, p. 434), Bieler propôs que a “força Coulombiana” no interior do núcleo atômico era do tipo $1/r^4$. Registre-se que, segundo o físico e historiador da ciência, o holandês-norte-americano Abraham Pais (1918-2000) [**Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World** (Clarendon Press/Oxford University Press, 1995)], a proposta de Chadwick-Bieler marca o início da **interação (força) forte**, que só foi formalizada pelo físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981; PNF, 1949), em 1935 (vide verbete nesta série). Ainda nesse livro, Pais registra que o nome **nêutron** já havia sido utilizado, em 1899.

Durante a década de 1920, Rutherford e seus colaboradores do *Cavendish Laboratory* usaram a idéia Rutherfordiana de que os **núcleos atômicos** eram compostos de **prótons** e elétrons para explicar as transmutações nucleares induzidas pelo bombardeamento de partículas α , conforme se pode ver nos trabalhos de Rutherford e Chadwick, realizados em 1921 (*Philosophical Magazine* **42**, p. 809), em 1922 (*Philosophical Magazine* **44**, p. 417) e em 1925 (*Philosophical Magazine* **50**, p. 889), e de Rutherford, em 1929 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A123**, p. 373). Note-se que, em 1930, Rutherford, Chadwick e o físico inglês Charles Drummond Ellis (1895-1980) publicaram o livro intitulado **Radiations from Radioactive Substances** (Cambridge University Press), no qual mostraram que a partícula α era composta de quatro **prótons** e de dois elétrons, com uma energia eletrostática Coulombiana de ligação de 27 MeV. Observe-se que, apesar desse modelo nuclear Rutherfordiano ser bastante utilizado, cálculos teóricos mostravam que o mesmo era inconsistente, pois essa energia eletrostática era insuficiente para manter o elétron confinado em dimensões nucleares ($\sim 10^{-15}$ m). Registre-se que essa energia de confinamento é calculada usando-se a Mecânica Relativista Einsteiniana (1905) e o Princípio da Incerteza de Heisenberg (1927) (vide verbete nesta série). Essa inconsistência deixou de existir quando se descobriu o **nêutron**, em 1932, como uma partícula do **núcleo atômico**. Vejamos com se deu essa descoberta.

Em suas experiências com o espalhamento de partículas α e β pela matéria, Rutherford usava um dispositivo para “contar” essas partículas espalhadas, dispositivo esse (*contador*) que havia sido inventado pelo físico alemão Hans (Johannes) Wilhelm Geiger (1882-1945), em 1908 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A81**, p. 174), na ocasião em que Geiger estudou aquele espalhamento em uma lâmina fina de metal [alumínio (Al) e ouro (Au)].

Conforme vimos acima, em 1920, Rutherford propôs a existência do **nêutron**. Contudo, a sua detecção não poderia ser realizada do mesmo modo como que foram detectados os **raios catódicos** (elétrons) e **canais (prótons)**, conforme registramos acima. Assim, Rutherford acreditava que uma descarga elétrica através do hidrogênio era capaz de produzir **nêutrons** com a emissão de radiação gama (γ). Ora, como Chadwick havia introduzido novos arranjos ópticos no **contador Geiger**, Rutherford incumbiu-lhe de detectar o **nêutron**. Logo em 1923, Chadwick tentou, sem sucesso, detectar a emissão aquela radiação usando, para isso, uma câmara de ionização e um contador-pontual. Contudo, as experiências que levaram a detecção de uma partícula neutra deveram-se a novos aperfeiçoamentos introduzidos nos contadores. Assim, em 1928 (*Zeitschrift für Physik* **29**, p. 839), Geiger e o físico alemão Erwin Wilhelm Mueller (1911-1977) aperfeiçoaram o **contador Geiger**. Dessa forma, o hoje famoso **contador Geiger-Mueller** (CG-M), aumentou enormemente a habilidade de detectar as radiações α e β . Esse contador elétrico era muito sensível, sendo mesmo capaz de reagir a uma única ionização. Porém, ele também apresentava limitações. Por exemplo, a ionização inicial em uma descarga elétrica completa não era integralmente entendida, e isso introduzia um elemento de incerteza no uso desse detector. Então, em 1929 (*Proceedings of the Royal Society* **A125**, p. 715), F. A. B. Ward, Charles Eryl Wynn-Williams (1903-1979) e H. M. Cave aperfeiçoaram o CG-M de tal modo que a chance de duas descargas coincidirem, exatamente, era muito pequena. Note-se que esse novo detector, que ficou conhecido como **escala de dois-contadores** (“scale of two-counters”), já havia sido trabalhado por Henrich Greinacher, em 1926-1927, por E. Ramelet, em 1928, e por G. Ortner e G. Setter, em 1929. Aliás, foi com esse detector que Chadwick descobriu o **nêutron**.

Conforme vimos em verbete desta série, antes de Chadwick descobrir essa partícula neutra, vários físicos passaram por ela sem “enxergá-la”. Com efeito, em 1930 (*Zeitschrift für Physik* **66**, p. 289), os físicos alemães Walther Wilhelm Georg Frank Bothe (1891-1957; PNF, 1954) e Herbert Z. Becker (1877-1955) ao bombardearem os elementos químicos leves [lítio (Li), berílio (Be), boro (B) etc.] com partículas α de 5.3 MeV emitidas pelo polônio (Po), observaram uma radiação penetrante desconhecida, a qual eles assumiram ser a radiação γ , uma vez que a mesma era capaz de penetrar facilmente através de vários centímetros de chumbo (Pb), e não era desviada por campos elétrico e magnético. Logo em seguida, H. C. Webster, sob a orientação de Chadwick, fez uma observação similar. Em 1931, Webster e Chadwick fizeram a conjectura de que essa radiação penetrante poderia ser uma partícula neutra, porém, não tinham nenhum respaldo experimental para essa conjectura. Um ano depois, em 1932 (*Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris* **194**, pgs. 273; 708; 876), o casal de físicos franceses Frédéric Joliot-Curie (1900-1958; PNQ, 1935) e Irène Joliot-Curie (1897-1956; PNQ, 1935) observou que a radiação emitida pelo Be bombardeado por α era muito mais penetrante do que pensavam, chegando mesmo a compará-la com os raios cósmicos (ver verbete nesta série). Desse modo, com a intenção de medir o coeficiente de absorção dessa “radiação”, esse casal de cientistas colocou absorventes de prata (Ag) e de Pb entre a suposta fonte dessa “radiação” e a câmara de ionização. Contudo, nenhum efeito foi observado. No entanto, quando era usado um absorvente rico em hidrogênio (água, parafina e celofane), a ionização apresentava maior intensidade. Concluíram, então, que os **prótons** eram expulsos dos absorventes por uma “nova espécie de radiação”, diferente da γ , devido a um efeito do tipo Compton (vide verbete nesta série). Desse modo, usando o formalismo desse efeito, o casal Joliot-Curie calculou o valor de 5.7 MeV para a energia de recuo do **próton**, correspondendo a uma energia inicial da radiação γ de 55 MeV. Contudo, esse resultando era surpreendente pois não havia evidência experimental de uma radiação de energia tão alta, uma vez que a máxima energia que se conhecia era da ordem de 10.6 MeV. Em virtude desse resultado, o casal Joliot-Curie chegou a questionar a validade do Princípio da Conservação da Energia nesses processos nucleares (Weinberg, op. cit.).

A interpretação dessa possível “nova radiação” da Natureza foi dada por Chadwick, ainda em 1932 (*Nature* **129**, p. 312; *Proceedings of the Royal Society* **A136**, pgs. 692; 735),

quando também estudou o espalhamento de partículas α pelo Be, em uma reação do tipo (em notação atual): ${}_2\text{He}^4 + {}_4\text{Be}^9 \rightarrow {}_6\text{C}^{12} + {}_0\text{n}^1$. Ao comparar as velocidades de recuo produzidas pela “radiação penetrante” ao atravessar um recipiente cheio de hidrogênio ou de nitrogênio, ele encontrou que essa “radiação” consistia de partículas neutras (as quais denominou de **nêutrons**) com a massa aproximada à do **próton**. É oportuno registrar que Chadwick também chegou a analisar a possibilidade de a “radiação penetrante” consistir de fótons γ (com uma reação do tipo, na linguagem atual: ${}_2\text{He}^4 + {}_4\text{Be}^9 \rightarrow {}_6\text{C}^{13} + \gamma$). No entanto, ao encontrar o valor de 14 Mev para a energia do fóton γ , ele concluiu que “toda a evidência é em favor do nêutron, a menos que a conservação da energia e do momento seja abandonada em algum ponto” (Weinberg, op. cit; Pais, op. cit.). Chadwick (que acreditava no modelo nuclear Rutherfordiano, isto é, que o **nêutron** seria uma composição do **próton** com o elétron), teve essa sua afirmativa reforçada ao fazer uma medida mais precisa da massa do **nêutron**, em uma experiência na qual estudou a colisão de partículas α com um alvo de boro (B), em uma reação nuclear do tipo (em notação atual): ${}_2\text{He}^4 + {}_5\text{B}^{11} \rightarrow {}_7\text{N}^{14} + {}_0\text{n}^1$. Registre-se que, em 1933 (*Proceedings of the Royal Society A142*, p. 1), Chadwick mostrou que a massa do **nêutron** era menor do que a massa do átomo de hidrogênio. [Para uma discussão matemática sobre as interpretações do casal Joliot-Curie e de Chadwick, ver: V. Acosta, C. L. Cowan e B. J. Graham, **Curso de Física Moderna** (Harla, 1975).]

Sobre a descoberta do **nêutron**, é interessante registrar três aspectos curiosos. O primeiro, deve-se ao físico italiano Ettore Majorana (1906-1938) que, ao ler o trabalho dos Joliot-Curie, exclamou: *Que tollice. Eles descobriram um próton neutro e não o reconheceram.* [Emílio Gino Segré, **Dos Raios-X aos Quarks** (Editora UnB, 1987).] O segundo, foi do próprio Frédéric Joliot-Curie que, ao conversar com Rutherford, disse-lhe que se tivesse lido a *Bakerian Lecture* que ele (Rutherford) houvera proferido em 1920, ele e sua mulher teriam descoberto o **nêutron** e não Chadwick (Pais, op. cit.). O terceiro aspecto curioso é o de que Chadwick anunciou primeiramente a sua descoberta no *Kapitza Club*, do *Cavendish Laboratory*, que havia sido criado pelo físico russo Piotr Leonidovich Kapitza (1894-1984; PNF, 1978), e que reunia um seleto grupo de pesquisadores que discutiam, informalmente, seus trabalhos. Alguns dias depois, no dia 10 de fevereiro de 1932, Chadwick enviou uma carta para a *Nature* anunciando a sua descoberta, que a publicou no dia 27 desse mesmo mês. (Weinberg, op. cit.)

Em seus artigos de 1932, Chadwick não especulou sobre o papel do **nêutron** no **núcleo atômico**. Esse papel, conforme vimos em verbete desta série, foi atribuído, ainda em 1932, pelos físicos, o alemão Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932) (*Zeitschrift für Physik 77*, p. 1), o russo Dimitrij Iwanenko (1904-1994) (*Nature 129*, p. 798) e o italiano Ettore Majorana (1906-1938), ao apresentarem a hipótese de que os **prótons** e os **nêutrons**, enquanto partículas constituintes do **núcleo atômico**, se comportavam como partículas únicas [**núcleons**, nome cunhado pelo físico dinamarquês Christian Möller (1904-1980), em 1941 (*Køngelige Danske Videnskabernes Selskab Matematisk-Fysiske Meddelanden 18*, p. 6)], que interagiam por intermédio de uma força atrativa capaz de superar a repulsão Coulombiana entre os **prótons**. Registre-se que essa “força atrativa” foi identificada como uma nova força na Natureza, a **força forte**, por Yukawa, em 1935, conforme registramos anteriormente.

Prossigamos com a descoberta de novos **bárions**. Conforme vimos em verbetes desta série, os físicos ingleses George Dixon Rochester (1908-2001) e Clifford Charles Butler (1922-1999), da *Universidade de Manchester*, na Inglaterra, a partir de 1947, e o grupo do físico francês Louis Leprince-Ringuet (1901-2000) da *École Polytechnique*, em Paris, no começo da década de 1950, estudaram a passagem de raios cósmicos em **câmaras de Wilson** colocadas em grandes altitudes. O resultado desses estudos foi a descoberta de novas partículas da Natureza, as chamadas **partículas V**, que receberam essa denominação por deixarem, naquelas câmaras, rastros em forma de V. Tais partículas, eram neutras e carregadas. As neutras, apresentavam os seguintes modos de decaimento: $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$ e $V_2^0 (\theta^0) \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. As partículas carregadas, por

sua vez, decaíam da seguinte maneira: $V_1^+ \rightarrow n + \pi^+(\mu^+)$ e $V_1^- \rightarrow n + \pi^-(\mu^-)$. Além dessas partículas, aquelas experiências mostraram a existência de uma outra partícula carregada negativamente (V_2^-), que decaía na partícula V_1^0 e mais o π^- , com a V_1^0 decaindo no processo indicado acima. Em virtude desse processo de decaimento em “cascata”, ela recebeu o nome de **cascata-menos**. Portanto: $V_2^- \equiv V_{\text{casca}}^- \rightarrow V_1^0 + \pi^-$. É oportuno registrar que, em 1949, uma nova partícula do tipo V foi descoberta pelo grupo do físico inglês Sir Cecil Frank Powell (1903-1969; PNF, 1950), da *Universidade de Bristol*, na Inglaterra, à qual deram o nome de *partícula tau* (τ), com o seguinte modo de decaimento: $\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^\pm + \pi^-$. Note-se que as partículas π^\pm (μ^\pm), hoje conhecidas como píons (múons), foram descobertas em 1947 (vide verbete nesta série).

O estudo em detalhes dessas novas partículas só foi possível depois de ser colocado em operação, em 1952, o *Cosmotron* de 3 GeV, do *Brookhaven National Laboratory* (BNL), nos Estados Unidos, e da instalação nesse mesmo laboratório, em 1953, da *câmara de bolhas*, que havia sido inventada pelo físico norte-americano Donald Arthur Glaser (n.1926; PNF, 1960), em 1952 (vide verbete nesta série). Essas partículas tipo V foram chamadas de **estranhas** em virtude de que eram produzidas por interação forte, entre píons (π^\pm) e núcleons (p, n) (vida média $\sim 10^{-23}$ s), e decaíam por interação fraca (vida média da ordem de 10^{-10} s). Hoje, essas partículas **estranhas** têm a seguinte nomenclatura e massa em unidades de MeV/c²: $V_{\text{casca}}^- = \Xi^-$ (~ 1321); $V_1^{\pm} = \Sigma^{\pm}$ (~ 1189); e $V_1^0 = \Lambda^0$ (~ 1115), que são também conhecidas como **hyperons** (nome dado por Leprince-Ringuet, em 1953). As demais partículas estranhas θ^0 e τ^{\pm} , são hoje conhecidas como os **káons** K^0 (~ 498) e K^{\pm} (~ 494) (ver verbete nesta série sobre esses mésons). É oportuno registrar que, em 1951, experiências realizadas por R. Armenteros, K. H. Barker, Butler, A. Chacon e A. H. Chapman (*Nature* **167**, p. 501); Armenteros, Barker, Butler e Chacon (*Philosophical Magazine* **42**, p. 1113); e R. W. Thompson, H. O. Cohn e R. S. Flum (*Physical Review* **83**, p. 175) mostraram que a partícula Λ^0 apresenta o seguinte modo de decaimento: $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$. Em 1952 (*Philosophical Magazine* **43**, p. 597), Armenteros, Barker, Butler, Chacon e C. M. York, confirmaram a descoberta da partícula V_{casca}^- , ocasião em que a denominaram de **cascata-menos** (Ξ^-), com o seguinte modo de decaimento: $\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$. Também nessa experiência eles confirmaram o mesmo decaimento observado em 1951: $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$. Registre-se que, em 1953, trabalhos independentes dos físicos, os norte-americanos York, Robert Benjamin Leighton (1919-1997) e E. K. Bjornerud (*Physical Review* **90**, p. 167); e os italianos A. Bonetti, R. Levi Setti, M. Panetti e G. Tomasini (*Nuovo Cimento* **10**, pgs. 345; 1736) confirmaram a descoberta da partícula $V_1^+ = \Sigma^+$, com os decaimentos: $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$ e $\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$. Também em 1953 (*Physical Review* **92**, p. 1089), os físicos norte-americanos Carl David Anderson (1905-1991; PNF, 1936), E. W. Cowan, Leighton e V. A. J. van Lint confirmaram a existência da partícula Ξ^- . É oportuno registrar que, em 1959 (*Physical Review Letters* **2**, p. 215), os físicos norte-americanos Luís Walter Alvarez (1911-1988; PNF, 1968), Philippe Eberhard, Myron Lindsay Good (1923-1999), William Graziano, Harold K. Ticho e Stanely G. Wojcicki confirmaram a existência da partícula Ξ^0 .

Uma segunda família de núcleons começou a ser descoberta, no começo da década de 1950, quando o físico ítalo-norte-americano Enrico Fermi (1901-1954; PNF, 1938) e sua equipe de pesquisadores [Herbert Lawrence Anderson (1914-1988), E. A. Long, A. Lundby, R. Martin, Darragh E. Nagle e G. B. Yodh] do *ciclotron* da *Universidade de Chicago*, estudaram o espalhamento elástico de píons de alta energia, por prótons de uma **câmara de bolhas** de hidrogênio líquido. Os primeiros resultados dessa pesquisa foram apresentados em 1952 (*Physical Review* **85**, pgs. 934; 935; 936). Em 1953, novos resultados sobre a descoberta das então denominadas de **ressonâncias bariônicas nucleônicas** foram encontrados por três grupos independentes de pesquisadores: R. L. Walker, D. C. Oakley e A. V. Tollestrup (*Physical Review* **89**, p. 1301); Anderson, Fermi, Martin e Nagle (*Physical Review* **91**, p. 155); e L. C. L. Yuan e Samuel J. Lindenbaum (*Physical Review* **92**, p. 1578). Ao analisaram a seção de choque total

daquele espalhamento em função das diversas energias de píons-mais (π^+), eles observaram um pico (“peak”) nesse espectro em torno de 180 MeV do feixe desses píons. Usando a largura desse pico e a Relação de Incerteza de Heisenberg ($\Delta E \Delta t \cong \hbar$), eles calcularam a vida-média (τ) dessa “partícula” em torno de 10^{-23} s. Segundo esses físicos, a reação nuclear devido ao espalhamento elástico foi a seguinte: $\pi^+ + p \rightarrow N_1^* \rightarrow \pi^+ + p$. Em vista disso, eles interpretaram esse resultado como sendo um estado excitado meta-estável do sistema $p-\pi$, seguido do decaimento por interação forte. Eis a razão da denominação dessa nova partícula de **ressonância bariônica nucleônica**.

É oportuno notar que a determinação das características de N_1^* não é muito simples. Ela é realizada por intermédio de um estudo matemático da seção de choque do espalhamento píon-núcleon, levando em conta as leis de conservação: momento angular total ($J = \ell + s$); spin isotópico (I); paridade (P = + ou -); massa (m); e carga elétrica (Q). A análise estatística desse espalhamento mostrou que a N_1^* apresentava as seguintes características: $J^P = 3/2^+$; $I = 3/2$; $Q = 2e$; e $m = 1236 \text{ MeV}/c^2$. Ora, como essa ressonância tem $I = 3/2$, a estrutura de multipletos de spin isotópico (vide verbete nesta série) indica que as **ressonâncias bariônicas nucleônicas** decorrentes do sistema píon-núcleon, formam um quadripleto ($M = 2 \times I + 1 = 2 \times 3/2 + 1 = 4$) composto de partículas com $I_Z = 3/2, 1/2, -1/2, -3/2$, de mesmo spin-paridade ($J^P = 3/2^+$), mesma massa ($1236 \text{ MeV}/c^2$) e com as seguintes respectivas cargas elétricas (em unidades da carga do elétron: e): + 2, + 1, 0, - 1. Hoje, esse quadripleto é denotado por: ($\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$), decorrentes das seguintes reações: $\pi^+ + p \rightarrow \Delta^{++} \rightarrow \pi^+ + p$; $\pi^+ + n \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^+ + n$; $\pi^0 + p \rightarrow \Delta^0 \rightarrow \pi^0 + p$ e $\pi^0 + n \rightarrow \Delta^- \rightarrow \pi^0 + n$. Observe-se que a partícula Δ^{++} teve sua descoberta confirmada em 1961 (*Physical Review Letters* **9**, p. 930), pelos físicos norte-americanos William Chinowsky, Gerson Goldhaber, Sulamith Goldhaber, Benjamin W. Lee (1935-1977) (de origem coreana) e Thomas O’Halloran ao analisarem a reação do tipo: $K^+ + p \rightarrow K^0 + \Delta^{++}$, na qual encontraram, para essa primeira **ressonância bariônica nucleônica**, os seguintes dados: $1236 \text{ MeV}/c^2$, $J^P = (3/2)^+$, $I = 3/2$ e com a hipercarga Y (vide verbete nesta série) unitária positiva. Note-se que, em 1963 (*Physical Review Letters* **10**, p. 262), A. N. Diddens, E. W. Jenkins, Thaddeus Francis Kycia (1933-1999) e K. F. Riley anunciaram a descoberta de mais **ressonâncias bariônicas nucleônicas** decorrentes do espalhamento píon-núcleon e próton-próton com energia do feixe incidente da ordem de BeV (= 1 GeV = 10^9 eV). Essas energias foram conseguidas com a construção, em 1953, do **Bevatron** do **Laboratório Lawrence de Radiação** (LLR) da **Universidade da Califórnia**, em Berkeley. Em notação atual, esses novos estados metaestáveis do **núcleon**, são as seguintes partículas: N^* [1520, $(3/2)^+$, 1/2], N^* [1690, $(5/2)^+$, 1/2], N^* [2190, $(7/2)^-$, 1/2], e Δ^* [1950, $(7/2)^+$, 3/2]. Nessa notação, o primeiro número representa a massa em MeV/c^2 ; o segundo é o spin-paridade (J^P); e o terceiro é o isospin I.

Conforme vimos em verbetes desta série, em 1928, o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933) propôs a sua famosa Equação Relativística do Elétron, cuja solução sugeria a possibilidade da existência de **antielétrons**, que são partículas que têm a mesma massa do elétron, porém de carga elétrica positiva. Também conforme vimos em verbetes desta série, o “antielétron” foi descoberto em 1932, por Carl Anderson, que lhe deu o nome de pósitron. Mais tarde, em 1955 (*Physical Review* **100**, p. 947), os físicos norte-americanos Owen Chamberlain (1920-2006; PNF, 1959), Emílio Gino Segré (1905-1989; PNF, 1959) (de origem italiana), Clyde E. Wiegand (1915-1996) e Thomas John Ypsilantis (1928-2000) anunciaram que haviam produzido os primeiros **antiprótons** (\bar{p}) com o **Bevatron** do LLR da **Universidade da Califórnia**, que acelerava prótons a uma energia de 6,2 BeV. Para isso, eles bombardearam prótons (**p**) altamente energéticos em átomos de cobre (Cu), em uma reação nuclear que apresenta o seguinte aspecto: $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$. Ainda em 1955 (*Nuovo Cimento* **1**, p. 492), os físicos italianos Edoardo Amaldi (1908-1989), C. Castagnoli, G. Cortini, C. Franzinetti e A. Manfredini registraram observações de

eventos envolvendo raios cósmicos, com energia suficiente para produzir \bar{p} . Em 1956 (*Nature* **177**, p. 11), Segré, Chamberlain, Wiegand e Ypsilantis sugeriram que o **antinêutron** (\bar{n}) poderia ser obtido em uma reação do tipo: $p + \bar{p} \rightarrow n + \bar{n}$. [É interessante salientar que o \bar{n} foi previsto pelo físico ítalo-russo Gleb Wataghin (1899-1986) (um dos fundadores da Física Brasileira), em 1935.] Em 1956 (*Physical Review* **104**, p. 1193), os físicos norte-americanos Bruce Cork, G. R. Lambertson, William A. Wenzel e o físico italiano Oreste Piccioni (1915-2002) anunciaram que haviam produzido \bar{n} ao estudarem a colisão de \bar{p} com a matéria. Por fim, em 1958 (*Physical Review* **110**, p. 994), L. E. Agnew, T. Elioff, W. B. Fowler, L. Gilly, R. Lander, L. Oswald, Wilson March Powell (1903-1974), Segrè, Herbert M. Steiner, H. White, Wiegand e Ypsilantis confirmaram a existência do \bar{n} . Observe-se que feixes de \bar{p} com a energia da ordem de BeV foram usados no bombardeamento de *câmaras de bolhas* de hidrogênio líquido, por grupos de pesquisa em Dubna [sob a liderança do físico russo Vladimir Iosifovich Veksler (1907-1966)], na Rússia, no *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN), em Genebra, e no BNL. Com isso, foram descobertos os **antihyperons**: $\bar{\Sigma}^-$, $\bar{\Xi}^-$ e $\bar{\Xi}^0$, na década de 1960.

A construção do *bevatron* do LLR permitiu a descoberta de novas **ressonâncias bariônicas**. Com efeito, em 1960 (*Physical Review Letters* **5**, p. 330), o grupo de pesquisadores (Margaret Alston, Eberhard, Good, Graziano, Ticho e Wojcicki) trabalhando nesse acelerador e liderado por Alvarez, anunciou a descoberta da primeira **ressonância bariônica estranha** (Y_1^*) ao observar o espalhamento entre káons (K) e prótons (p) na câmara de bolhas acoplada a esse acelerador, com uma reação nuclear do tipo: $K^- + p \rightarrow Y_1^* \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+ + \pi^-$. A evidência desse novo estado metaestável do p foi obtida com a análise do *diagrama* (“plot”) *de Dalitz* (ver verbete nesta série). Essa nova partícula, com as características: $m = 1385 \text{ MeV}/c^2$, $J^P = (3/2)^+$, $I = 1$ e com a hipercarga $Y = 0$. Tal ressonância recebeu a notação Y_1^* por ser a primeira **ressonância bariônica hiperônica**, uma vez que apresentava com produto final de seu decaimento o hyperon Λ^0 . Por outro lado, como $I = 1$, ela deveria fazer parte de um tripleto, que seria confirmado logo depois. Com efeito, a análise de outras reações daquele tipo de espalhamento mostrou que essas **ressonâncias bariônicas estranhas** (Y_1^*) assemelhavam-se a estados excitados de Σ^* e, portanto, constituíam o tripleto: Σ^{*+} , Σ^{*0} , Σ^{*-} .

No começo da década de 1960, os físicos do LLR, perceberam que, aumentando a energia do feixe de káons, haveria a possibilidade de produzir novas **ressonâncias bariônicas estranhas** mais pesadas, com $Y = -1$ e $I = 1/2$ e, portanto, do tipo Ξ^* . Em 1962, G. M. Pjerrou, D. J. Prowse, P. E. Schlein, W. E. Slater, D. H. Stork e Ticho (*Physical Review Letters* **9**, p. 114) e, independentemente, L. Bertanza, V. Brisson, P. L. Connolly, E. L. Hart, I. S. Mitra, G. C. Moneti, R. R. Rau, Nicholas P. Samios, I. O. Skillicorn, S. S. Yamamoto, Maurice Goldberg, I. Gray, J. Leitner, S. Lichtman e J. Westgard anunciaram que haviam descoberto a primeira **ressonância** do tipo Ξ^* com massa de $1530 \text{ MeV}/c^2$, e com o seguinte modo de decaimento: $\Xi^* \rightarrow \Xi + \pi$. É oportuno registrar que essa partícula foi confirmada, em 1963 (*Physical Review Letters* **11**, p. 167), em trabalhos realizados por Schlein, D. D. Carmony, Pejerrou, Slater, Stork e Ticho, nos quais observaram reações do tipo: $K^- + p \rightarrow \Xi^{*0} (\Xi^*) + K^0 (K^{*+})$. Da análise dessas reações, observaram que a partícula Ξ^* é caracterizada por: $1532 \text{ MeV}/c^2$, $J^P = (3/2)^+$, $I = 1/2$ e $Y = -1$.

Conforme vimos em verbetes desta série, o físico norte-americano Murray Gell-Mann (n.1929; PNF, 1969) anunciou, em 1962 (*Proceedings of the 1962 International Conference on High Energy Physics at CERN*, p. 805), a existência de uma nova **ressonância bariônica**, a **Ômega-menos** (Ω^-), com as seguintes características: $m \sim 1675 \text{ MeV}/c^2$, $J^P = (3/2)^+$, $Y = -2$ e $I = 0$. Registre-se que partícula prevista por Gell-Mann foi descoberta em 1964 (*Physical Review Letters* **12**, p. 204), por V. E. Barnes, Connolly, D. J. Crennell, B. B. Culwick, W. C. Delaney, W. B. Fowler, P. E. Hagerty, Hart, N. Norwitz, P. V. C. Hough, J. E. Jensen, J. K. Kopp, Kwan W. Lai,

Leitner, J. L. Lloyd, G. W. London, T. W. Morris, Y. Oren, Robert B. Palmer, A. G. Prodell, D. Radojick, D. C. Raham, C. Richardson, Samios, J. R. Sanford, R. P. Shutt, J. R. Smith, D. L. Stonehill, R. C. Strand, A. M. Thorndike, M. S. Webster, W. J. Willis e Yamamoto em uma reação do tipo: $K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^0$, com $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$, depois do exame de 97.000 fotografias, com a massa de $(1675 \pm 3) \text{ MeV}/c^2$, e a vida média em torno de $1,1 \times 10^{-10} \text{ s}$. Para uma descrição mais detalhada dessa descoberta, ver: W. B. Fowler e Nicholas P. Samios, *Scientific American* **211**, p. 36 (1964). Sobre a espectroscopia das **ressonâncias bariônicas (nucleônicas e hiperônicas)**, ver: Victor Frederick Weisskopf, *Science* **149**, p. 1181 (1965).

Com a formulação do **Modelo de Quarks (u,d,s)**, em 1964, por Gell-Mann e, independentemente, pelo físico russo-norte-americano George Zweig (n.1937) (vide verbete nesta série), foi possível construir a estrutura quarkônica dos **bárions [núcleons (p, n) e hyperons (Λ^0 , Σ^{+-0} , Ξ^{0-})]** e das **ressonâncias bariônicas [nucleônicas (Δ^{+++-0}) e hiperônicas (Σ^{*+-0} , Ξ^{*-0} , Ω^*)]**. Assim, segundo esse modelo, essa estrutura é dada por [José Maria Filardo Bassalo e Mauro Sérgio Dorsa Cattani, **Teoria de Grupos** (Livraria da Física, 2008)]:

$$\begin{aligned} & p(\text{uud}); n(\text{udd}); \Lambda^0(\text{uds}); \Sigma^+(\text{uus}), \Sigma^0(\text{uds}), \Sigma^-(\text{dds}); \Xi^-(\text{dss}), \Xi^0(\text{uss}); \\ & \Delta^+(\text{uuu}), \Delta^+[(1/\sqrt{3})(\text{uud} + \text{udu} + \text{duu})], \Delta^0[(1/\sqrt{3})(\text{udd} + \text{ddu} + \text{dud})], \Delta^-(\text{ddd}); \\ & (\Sigma^+)^*[(1/\sqrt{3})(\text{uus} + \text{usu} + \text{suu})], (\Sigma^-)^*[(1/\sqrt{3})(\text{dds} + \text{sdd} + \text{dsd})], \\ & (\Sigma^0)^*[(1/\sqrt{6})(\text{usd} + \text{dus} + \text{dsu} + \text{uds} + \text{sdu} + \text{sud})]; \\ & (\Xi^-)^*[(1/\sqrt{3})(\text{ssd} + \text{dss} + \text{sds})], (\Xi^0)^*[(1/\sqrt{3})(\text{uss} + \text{ssu} + \text{sus})]; \Omega^-(\text{sss}). \end{aligned}$$

Na conclusão deste verbete, é ainda oportuno registrar que com a proposta do **quark charme (c)**, em 1964, e a formulação da **Teoria do Charme** ou **Teoria GIM**, em 1970, baseada no SU(4) (vide verbete nesta série), foram previstos **bárions charmosos** construídos como extensão do octeto (8) e do decuplete (10) bariônicos do SU(3), os chamados 20-pletos do SU(4), assim constituídos [Maria Cristina Batoni Abdalla, **O Discreto Charme das Partículas Elementares** (EDUNESP, 2006)]:

$$\begin{aligned} & \Lambda_c^+(u\bar{d}c); \Sigma_c^0(d\bar{d}c), \Sigma_c^+(u\bar{d}c), \Sigma_c^{++}(u\bar{u}c); \\ & \Xi_c^0(d\bar{s}c), \Xi_c^+(u\bar{s}c), \Xi_{cc}^+(d\bar{c}c), \Xi_{cc}^{++}(u\bar{c}c); \Omega_c^0(ssc), \Omega_{cc}^+(s\bar{c}c), \Omega_{ccc}^{++}(c\bar{c}c). \end{aligned}$$

A partir da proposta do **quark c**, várias experiências foram realizadas no sentido de encontrar **partículas charmosas**, isto é, partículas que contém esse quark em sua estrutura quarkônica, constituindo-se, então, na chamada **Física do Charme**, que está completamente consolidada com várias dessas partículas descobertas. Em verbete anterior, vimos a descoberta dos **mésons charmosos**, cujo primeiro deles, o ψ/J (ou J/ψ) ($c\bar{c}$), foi descoberto em 1974. Logo em 1975 (*Physical Review Letters* **34**, p. 1125), E. G. Cazzoli, A. M. Cnops, Connolly, R. I. Louttit, M. J. Murtagh, Palmer, Samios, T. T. Tso e H. H. Williams anunciaram que haviam encontrado evidências da existência de dois **bárions charmosos** [$\Sigma_c^{++}(u\bar{u}c)$ e $\Lambda_c^+(u\bar{d}c)$], com o seguinte decaimento: $\Sigma_c^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ + \pi^+$, oriundos da interação de um feixe de neutrinos ($\bar{\nu}$) com a matéria. Em 1976 (*Physical Review Letters* **37**, p. 882), B. Knapp, W. Lee, P. Leung, S. D. Smith, A. Wijangco, J. Knauer, D. E. Yount, J. Bronstein, R. Coleman, G. Gladding, M. Goodman, M. Gormley, R. Messner, T. O'Halloran, J. Sarracino, A. Wattenberg, M. Binkley, I. Gaines e J. Peoples anunciaram que haviam identificado dois **bárions charmosos**: $\Lambda_c^+(u\bar{d}c)$, com a massa de $2260 \text{ MeV}/c^2$ e $\Xi_{cc}^{++}(u\bar{c}c)$, com $2480 \text{ MeV}/c^2$. Por sua vez, em 1979 (*Physics Letters* **B84**, p. 150), C. Angelini, P. Bagnala, G. Baroni, J. H. Bartley, G. H. Bertrand-Coremans, V. Bisi, A. Breslin, E. H. S. Burhop, F. Carena, R. Casali, G. Ciapetti, Marcello Conversi (1917-1988), D. H. Davis, S. Diliberto, M. L. Ferrer, C. Franzinetti, D. Gamba, L. Godfrey, D. Keane, E. Lamanna, A. Marzari, F. Marzano, A. Montwill, R. Morganti, A. Nappi, C. Palazzi-Cerina, R. Pazzi, S. Petretra, G. M. Pierazzini, L. Riccati, G. Romano,

A. Romero, J. Sacton, R. Santonico, R. Sever, F. R. Stannard, P. Tolun, D. N. Tovee, P. Vilain, J. H. Wickens e C. Wilquet observaram o seguinte modo de decaimento do **bárion charmoso** Λ_c^+ : $\Lambda_c^+ \rightarrow p + K^- + \pi^+$, com $\tau \sim (7,3 \pm 0,1) \times 10^{-13} \text{ s e } m = (2,290 \pm 0,015) \text{ GeV}/c^2$.

Em 1983 (*Physics Letters* **B122**, p. 455), S. F. Biagi, M. Bourquin, A. J. Britten, R. M. Brown, H. J. Burckhart, A. A. Carter, Ch. Doré, P. Extermann, M. Gailloud, C. N. P. Gee, W. M. Gibson, J. C. Gordon, R. J. Gray, P. Igo-Kemenes, P. Jacot-Guillarmod, W. C. Louis, T. Modis, P. Muhlemann, Ph. Rosselet, B. J. Saunders, P. Schirato, H. W. Siebert, V. J. Smith, K. P. Streit, J. J. Thresher, S. N. Tovey e R. Weill (*WA62 CERN-Collaboration*) anunciaram a descoberta do **bárion charmoso** Ω_c^0 (SSC), de massa igual a $(2740 \pm 20) \text{ MeV}/c^2$, com o seguinte decaimento: $\Omega_c^0 \rightarrow \Xi^- + K^+ + 2\pi^+$. Na produção dessa partícula, eles usaram um feixe de Σ^- , com o momento linear de 135 GeV/c. Em 1987 (*Physical Review Letters* **59**, p. 1530), por P. Coteus, Binkley, F. Bossi, J. Butler, J. P. Cumalat, M. DiCorato, M. Diesburg, J. Enagonio, J. Filaseta, P. L. Frabetti, Gaines, P. Garbincius, Gormley, J. Haggerty, D. J. Harding, T. Kroc, R. Ladbury, P. Lebrun, P. F. Manfredi, Peoples, A. Sala, C. Shipbaugh, J. Slaughter e J. Wiss (*E400 Collaboration*) relataram que haviam observado o **bárion charmoso** Ξ_c^+ (usc) ao estudarem o decaimento: $\Xi_c^+ \rightarrow \Lambda^0 + K^+ + 2\pi^+$, por intermédio de um feixe de nêutrons. Em 1989 (*Physics Letters* **B233**, p. 522), esse mesmo modo de decaimento foi observado por S. Barlag, H. Becker, T. Böhringer, M. Bosman, V. Castillo, V. Chabaud, C. Damerell, C. Daum, H. Dietl, A. Gillman, R. Gilmore, T. Gooch, L. Görlich, P. Gras, Z. Hajduk, E. Higon, D. P. Kelsey, R. Klanner, S. Kwan, B. Lücking, G. Lütjens, G. Lutz, J. Malos, W. Männer, E. Neugebauer, H. Palka, M. Pepé, J. Richardson, K. Rybicki, H. J. Seebrunner, U. Stierlin, H. G. Tiecke, G. Waltermann, S. Watts, P. Weilhammer, F. Wickens, L. W. Wiggers, M. Witek e T. Zeluddziewicz (*ACCMOR Collaboration*), por intermédio do qual mediram a vida média da partícula Ξ_c^+ .

Na década de 1990, novas experiências confirmaram a existência dos **bárions charmosos** acima referidos, bem como a de outros como Σ_c^0 (ddc) e Σ_c^{++} (uuc), produzidos em 1996 (*Physics Letters* **B379**, p. 292), pela FERMILAB E791 *Collaboration*, da qual participaram os físicos brasileiros Sandra Amato (n.1963), João Carlos Costa dos Anjos (n.1944), Ignácio Alfonso de Bediaga e Hickman (n.1954), Hendly da Silva Carvalho (n.1966), Isaías Costa (n.1957), Carla Gobel (n.1969), João Ramos Torres de Mello Neto (n.1960), Jussara Marques de Miranda (n.1962), Alberto Correa dos Reis (n.1958) e Alberto Franco de Sá Santoro (n.1941). [José Maria Filardo Bassalo, **Nascimentos da Física: 1991-2000** (Fundação Minerva, 2008).]

No fechamento deste verbete, é oportuno registrar que **bárions bonitos** (“bottom baryons”), isto é, **bárions** com a presença do **quark** b em sua estrutura quarkônica (por exemplo: Λ_b , Ξ_b , Σ_b e Ω_b) estão sendo procurados nos maiores aceleradores do mundo. Porém, conforme comenta (em alguns e-mails de agosto de 2008) o físico brasileiro José Guilherme Rocha Lima (n.1967), a observação exclusiva de **estados bariônicos** contendo **quarks** b não é nada fácil, pois, geralmente, entre os produtos do decaimento existem partículas neutras e/ou de muito baixa energia, que não são detectáveis. Como resultado, a reconstrução dos **bárions** originais é incompleta, e não se tem certeza de qual **bárion** foi produzido em uma colisão específica. Por sua vez, a produção de um **bárion** (e não de um méson) é confirmada pela presença no estado final de um hyperon (Λ , Σ) muito bem reconstruído, e com vértices secundários bem definidos. Contudo, sem a certeza de qual **bárion bonito** foi produzido, resta apenas o estudo de uma mistura (“b-baryon admixture”), composta de quantidades relativas estimadas de Λ_b , Ξ_b , Σ_b e Ω_b . Apesar dessas dificuldades, é oportuno registrar que já foram descobertos alguns **bárions bonitos**, como, por exemplo: Λ_b^0 , em 1991 (*Nuovo Cimento* **A104**, p. 1787) e Ξ_b^- , em 2007 (*Physical Review Letters* **99**, 052001). Por sua vez, o Ω_b , com a massa de $(6,165 \pm 0,016) \text{ GeV}/c^2$ e spin $\frac{1}{2}$, foi descoberto pela *Colaboração D0* do FERMILAB, em agosto de 2008

(www-d0.fnal.gov/Run2Physics/WWW/results/final/B/B08G/).

Mais informações sobre os **bárions bonitos**, ver o *site*: pdg.lbl.gov/2005/listings/bxxxcomb.html#baryonsbottom.

Por fim, ainda segundo Lima, existe uma grande dificuldade em detectar os **bárions top**, isto é, **bárions** com a presença do *quark* t em sua estrutura quarkônica, pois, pelo fato desse *quark* ser muito massivo e instável, ele não se junta aos demais *quarks* para formar quaisquer estados ligados (nem mésons e nem **bárions**), uma vez que ele decai antes de produzir tais estados. Aproveito a oportunidade para agradecer ao meu amigo Guilherme Lima a ajuda na preparação deste verbete.

-



ANTERIOR

SEGUINTE