



SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



A Investigação Experimental das Partículas Elementares, Charpak e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 1992.

De um modo geral, em uma **investigação experimental** existem três aspectos principais a considerar: o **feixe de partículas incidentes**, as **partículas-alvo** e os **detectores**. O **feixe de partículas incidentes** pode ser: NATURAL – **raios cósmicos**, cuja intensidade ao nível do mar é da ordem de 2×10^{-2} partículas/ (cm².s) e com energia da ordem de 10^{11} GeV, por partícula; e **materiais radioativos**; e ARTIFICIAL, por intermédio de instrumentos denominados de **aceleradores**.

Em verbetes desta série, vimos como os **raios cósmicos** (de uso bastante limitado, pois além de serem incontroláveis, é rara a incidência deles com alta energia na superfície terrestre), foram importantes na descoberta de várias partículas elementares [pósitron (e^+), múons (μ^\pm), píons ($\pi^{\pm,0}$) e as primeiras partículas estranhas ($\Lambda^{0\pm}$]]. Vimos, também, que a partícula α [núcleo do hélio (He)], emitida pelo polônio (Po), que é um **material radioativo**, foi importante na descoberta do núcleo atômico (1911) e do próton (p) (1919). Nestas duas descobertas, decorrentes das experiências realizadas pelo físico e químico neozelandês-inglês Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1909), foram usadas como **partículas-alvo**, respectivamente, os átomos de ouro (Au) e de nitrogênio (N). Neste verbete, trataremos dos **aceleradores** e dos **detectores**. Para isso, usaremos os seguintes textos: Robert Gourian, **Elementos de Física Nuclear: Partículas e Aceleradores** (Editorial Inova Limitada, 1967); José Maria Filardo Bassalo, **Crônicas da Física, Tomos 1 e 4** (EDUFPA, 1987 e 1994); Emilio Segré, **Dos Raios X aos Quarks: Físicos Modernos e suas Descobertas** (EDUnB, 1987); Abraham Pais, **Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World** (Clarendon Press and Oxford University Press, 1995); Val Logsdon Fitch and Jonathan L. Rosner; e David M. Brink, **Twentieth Century Physics II** (Institute of Physics Publishing and American Institute of Physics Press, 1995).

Os **aceleradores** podem ser de dois tipos: **lineares** e **circulares**. Nos primeiros, as partículas carregadas são aceleradas linearmente; no segundo, circularmente. Iniciemos pelos **lineares**. De certa maneira, o primeiro **acelerador linear** – **linac** - foi a **câmara de vácuo** inventada pelo físico inglês William Crookes (1832-1919), em 1875, uma vez que a tensão elétrica aplicada entre o catodo e anodo da mesma acelerava os então chamados **raios catódicos** emitidos pelo catodo aquecido. Em verbetes desta série, vimos que as experiências realizadas, em 1897, pelo físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906), mostraram que aqueles “raios” nada mais eram do que elétrons. Além do mais, o próprio Thomson, em 1899, mostrou que as partículas emitidas pelos metais incandescentes, emissão essa observada pelo inventor norte-americano Thomas Alva Edison (1847-1931), em 1883, e conhecida como **efeito termiônico** ou **efeito Edison**, eram também elétrons.

A descoberta das primeiras partículas carregadas [elétron: 1897; partículas α (${}_2\text{He}^4$): 1908; e próton: 1919], levou os físicos a desenvolver dispositivos no sentido de acelerá-las

linearmente. As primeiras tentativas de construir esses dispositivos foram por intermédio de fontes de alta voltagem. Assim, com esse objetivo, os físicos norte-americanos Gregory Breit (1899-1981) e Merle Antony Tuve (1901-1982), no *Departamento de Magnetismo Terrestre*, do *Carnegie Institution*, em Washington DC, entre 1926 e 1930, projetaram e construíram **tubos aceleradores** de raios-X de alta voltagem, usando **bobinas Tesla**. Por exemplo, em 1928 (*Nature* **121**, p. 535), eles desenvolveram um desses tubos que atingia uma energia de pico em torno de 5 MeV (1 MeV = 10^6 eV). Ainda em 1928 (*Physical Review* **32**, p. 850), os físicos norte-americanos Charles Christian Lauritsen (1892-1968) e R. D. Bennett, no *Califórnia Institute of Technology* (CALTECH) também construíram tubos de raios-X de alta voltagem. Na Alemanha, contudo, em 1930 (*Naturwissenschaften* **18**, p. 16), os físicos alemães A. Brasch e F. Lange usaram uma outra fonte de alta voltagem: a eletricidade atmosférica. Ora, como a idéia de produzir altas voltagens não funcionava satisfatoriamente por causa da natureza pulsada do potencial e do valor flutuante do pico de voltagem, novos tipos de dispositivos para acelerar partículas foram então projetados e desenvolvidos. Um desses tipos, o **gerador eletrostático**, cujo princípio básico é o do transporte de cargas elétricas por intermédio de uma correia, surgiu no começo da década de 1930. Vejamos como.

A ideia de usar o transporte de cargas elétricas por intermédio de uma correia para construir **geradores eletrostáticos** já era conhecida desde o Século 19. Com efeito, essa proposta foi apresentada pelos físicos, o italiano Augusto Righi (1850-1920), em sua Tese de Graduação (hoje, Trabalho de Conclusão de Curso) na *Escola de Engenharia da Escola Técnica de Bolonha*, em 1872; e o escocês William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907), em 1890. No Século 20, essa ideia voltou a ser discutida pelo físico russo B. N. Urgimov, em 1925. Contudo, foi o físico norte-americano Robert Jemison van de Graaff (1901-1967) quem começou, em 1929, a desenvolver o projeto de construção de um **gerador eletrostático**, que hoje leva seu nome – **gerador de van de Graff** –, quando ainda era bolsista (“fellow”) de pesquisa na *Universidade de Princeton*. Esse seu projeto foi concluído em 1931 (*Physical Review* **38**, p. 1919), operando com a energia máxima de 1,5 MeV, e que poderia ser usado para acelerar prótons, partículas α e íons.

É oportuno destacar que, no Brasil, foram instalados três **geradores de van de Graff**. O primeiro, em 1954, pelo físico brasileiro Oscar Sala (n.1922), na *Universidade de São Paulo* (USP), com uma energia máxima de 3,8 MeV; o segundo, em 1972, pelo físico brasileiro Alceu Pinho Filho (n.1933), na *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro*, com 2 MeV de energia máxima; e o terceiro (*pelletron*), ainda em 1972, e também por Sala, na USP, com a energia máxima de 8 MeV.

Voltemos aos **linacs**. Na Inglaterra, em 1930 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A129**, p. 477), os físicos, o inglês Sir John Douglas Cockcroft (1897-1967; PNF, 1951) e o irlandês Ernest Thomas Sinton Walton (1903-1995; PNF, 1951) descreveram o aparelho que inventaram, o **multiplicador de voltagens** – hoje conhecido como **acelerador linear de Cockcroft-Walton** (ALC-W) –, com o qual aceleraram prótons (p), oriundos da ionização de átomos de hidrogênio (${}^1_1\text{H}^1 = \text{p}$), a uma energia de 300 keV. A ideia desse tipo de acelerador já havia sido apresentada, em 1920, pelo físico suíço Heinrich Greinacher (1880-1974) que, mais tarde, em 1926 (*Zeitschrift für Physik* **36**, p. 364), desenvolveu métodos para detectar partículas carregadas [contador proporcional e o contador de centelha (“spark”), dos quais falaremos mais adiante]. É oportuno destacar que Greinacher já havia se destacado como um grande físico experimental. Por exemplo, em 1912, ele apresentou uma descrição matemática do aparelho que havia inventado: o **magnetron**; e, em 1914, inventou o **multiplicador Greinacher** – que nada mais é do que um circuito retificador de voltagens duplas (en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Greinacher).

Cockcroft e Walton, de posse do acelerador que haviam construído, se voltaram para estudar o núcleo atômico com prótons acelerados por esse dispositivo. A ideia deles era a de usar o **efeito túnel**, de 1928 (vide verbete nesta série), no sentido inverso, ou seja, vencer a barreira de

potencial nuclear com partículas aceleradas. Assim, em 1932 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A136**; **A137**, pgs. 619; 229), anunciaram que haviam realizado, no *Cavendish Laboratory*, na Inglaterra, a primeira reação nuclear com aceleradores artificiais, ao enviarem um feixe de prótons (p) acelerados com uma diferença de potencial de 770 kV (= 17 MeV) contra um alvo de lítio (Li), que, por sua vez, desintegrou-se em duas α , em uma reação do tipo: ${}_1\text{P}^1 + {}_3\text{Li}^7 = 2\ {}_2\text{He}^4 + 17\text{ MeV}$. Registre-se que essa primeira reação nuclear artificial foi estudada pelos físicos norte-americanos Ernest Orlando Lawrence (1901-1958), Milton Stanley Livingston (1905-1986) e Milton Grandison White (1910-1978), ainda em 1932 (*Physical Review* **42**, p. 150), na *Universidade da Califórnia*, para o seguinte intervalo de energia do próton: 100-700 keV. Para maiores detalhes do ALC-W ver as *Nobel Lectures*, de Cockcroft e Walton (**Nobel e-Museum**, 11 de Dezembro de 1951). É interessante observar que, em 1963, o físico brasileiro Argus Fagundes Orique Moreira (n.1922) construiu no *Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas* (CBPF), no Rio de Janeiro, um **acelerador linear de Cockcroft-Walton** de 2 MeV.

Vejamos, agora, outros tipos de **linacs**. Em 1924 (*Arkiv für Matematik, Astronomie och Fysik* **18**, No. 30), o físico sueco Gustaf Adolf Ising (1883-1960) propôs a primeira ideia de acelerar partículas carregadas através de um tubo contendo um arranjo linear de eletrodos. Usando essa proposta, em 1928 (*Archiv für Elektrotechnik* **21**, p. 387), o físico norueguês Rolf Wideröe (1902-1996) descreveu a construção de um **acelerador ressonante** e que se destinava a acelerar partículas carregadas. Essa máquina de Wideröe era extremamente simples: as tensões altas usadas nos **tubos aceleradores**, vistos acima, eram substituídas por tensões mais baixas (gerada por condensadores), transportando as partículas carregadas através de campos elétricos fracos, mas obrigando-as a percorrer várias vezes o mesmo trajeto para adquirir mais energia. Para isso, Wideröe idealizou um tubo metálico contendo uma associação em série de condensadores e de mesmo potencial. Assim, para que a partícula carregada fosse “empurrada” ao longo desse **tubo acelerador**, era necessário coincidir o tempo gasto pela partícula para atravessar uma região entre os polos opostos dos condensadores e o tempo de inversão da polaridade do condensador. Naquela época, contudo, não havia dispositivos de radiofrequência que pudesse realizar a coincidência referida acima para então acelerar partículas leves e carregadas (p.e.: elétrons e prótons). Por isso, Wideröe só conseguiu acelerar íons pesados de metais alcalinos: sódio (Na) e potássio (K). Registre-se que, com um tipo de **tubo acelerador de Wideröe**, em 1931 (*Physical Review* **38**, p. 2021), David H. Sloan e Lawrence conseguiram acelerar íons de mercúrio (Hg) até 3 MeV.

Com o desenvolvimento do **radar** (vide verbete nesta série), que envolve radiofrequências altas, o físico norte-americano Luís Walter Alvarez (1911-1988; PNF, 1968) e sua equipe da *Universidade da Califórnia*, em Berkeley [Hugh Bradner, Jack V. Franck, H. Gordon, J. Donald Gow, L. C. Marchall, Frank Oppenheimer, Wolfgang Kurt Hermann Panofsky (1919-2007), C. Richman e J. R. Woodyard] começaram, em 1946, a projetar um **tubo acelerador de Wideröe** com o objetivo de acelerar prótons. Assim, logo em 1947, eles construíram o primeiro **linac de próton** que era, basicamente, formado de cilindros longos axiais, cujas paredes eram feitas de material bom condutor [p.e.: cobre (Cu)]. Esse dispositivo resultou de uma audaciosa injeção de uma onda eletromagnética de alta frequência (200 Mc/s) entre as paredes desses cilindros, cujas oscilações da mesma entre essas paredes geraram campos elétricos lineares e estacionários, e que eram modulados de acordo com aquela frequência, isto é, em cada ponto do eixo dos cilindros (conhecidos como **ressoadores**), a tensão variava periodicamente com o tempo. Registre-se que, em 1955 (*Review of Scientific Instruments* **26**, p. 111), aqueles físicos descreveram a construção desse primeiro **linac de próton**.

As ideias iniciais para a construção do primeiro **linac de elétron** foram apresentadas pelo físico norte-americano William Webster Hansen (1909-1949), em meados da década de 1930, na *Universidade de Stanford*. Contudo, sua construção só se tornou possível com o desenvolvimento do **magnetron** (dispositivo eletrônico capaz de produzir micro-ondas de grande

potência) e do **klystron** (tubo de modulação de velocidade para feixe de elétrons que cria ou amplifica correntes de frequência ultra-elevada). Assim, em 1947, foi construído o **Stanford Mark I**, que era um tubo de 12 pés de comprimento no qual **magnetrons** produziram um feixe de elétrons de 6 MeV de energia. Logo depois, em 1948, surgiu o **Stanford Mark II** e, com ele, foi gerado um feixe de elétrons de 35 MeV, desta vez, por intermédio de **klystrons**. Ainda em 1948 (*Reports on Progress in Physics* **12**, p. 102), D. W. Fry e Walkinshaw apresentaram um resumo sobre a construção desses **linacs de elétrons**. O sucesso dos **Mark I e II** levou o grupo de Stanford, em 1949, ao projeto do **Stanford Mark III**, constituído de 30 **Mark II** em linha, para gerar um feixe de elétrons de 1 GeV (= 10^3 MeV). Tal dispositivo foi completado em 1952 e sua descrição foi apresentada em 1955 (*Review of Scientific Instruments* **26**, p. 134), por M. Chodorow, Edward Leonard Ginzton (1915-1998), Hansen (que falecera em 1949), R. L. Kyhl, R. B. Neal e Panofsky.

É oportuno registrar que o **Mark III** foi importante nas experiências realizadas pelos físicos norte-americanos Robert L. Hofstadter (1915-1990; PNF, 1961), H. R. Fechter e J. A. McIntyre, em 1953 (*Physical Review* **91**; **92**, p. 422; 978), nas quais estudaram o espalhamento de elétrons por prótons, usando um alvo de polietileno [polímero de gás etileno (C_2H_4)]. Também é oportuno registrar que o sucesso do **Mark III** levou o grupo de Stanford, agora sob a liderança de Panofsky, a criar, em 1956, o SLAC (“Stanford Linear Accelerator Center”), para construir um **linac de elétron** de 3 km de comprimento destinado a acelerar elétrons na ordem de GeV. Assim, em 1966, ele atingiu a energia de 17 GeV; em 1967, de 20 GeV; e em 1986, de 50 GeV. Aliás, é ainda interessante registrar que, em 1970, o físico brasileiro José Goldemberg (n.1928), instalou na USP um **linac de elétron** de 75 MeV, que fora doado pela *Universidade de Stanford*; e, em 1971, Argus Moreira construiu um **linac de elétron** de 30 MeV no CBPF.

Passemos, agora, a examinar o desenvolvimento dos **aceleradores circulares**. Em 1929, depois de ler o artigo de Wideröe, de 1928, Lawrence teve a ideia de substituir as trajetórias retilíneas do modelo de Wideröe, por trajetórias circulares. Assim, Lawrence e seu aluno, o físico norte-americano Niels Edlef Edlefsen (1893-1971), descreveram os dois primeiros protótipos construídos por Edlefsen, em 1930 (*Science* **72**, p. 376), os quais se baseiam no fato de que uma partícula de massa m e carga elétrica q , ao penetrar com velocidade v , normalmente às linhas de força de um campo magnético constante B , descreve uma circunferência de raio $r = m v / (q B)$ e com uma velocidade angular dada pela expressão $\omega = q B / m$, independente de v e de r . Registre-se que essas expressões são válidas no sistema MKS. De posse desses protótipos, Lawrence e Livingston passaram a construir o primeiro **acelerador circular** – o **ciclotron**, cujos três primeiros modelos foram apresentados em 1931 (*Physical Review* **37**; **38**, p. 1707; 834) e 1932 (*Physical Review* **40**, p. 19). O primeiro desses modelos foi o tema da Tese de Doutorado de Livingston; o terceiro tinha 11 polegadas de diâmetro e produziu prótons de 1,22 MeV.

Nesse tipo de acelerador, uma fonte de íons é colocada no centro de duas caixas na forma de D, uma defronte da outra (com um intervalo entre elas), e normais a um campo magnético uniforme B . Devido à presença desse campo, o íon (de carga q) descreverá uma circunferência, segundo falamos acima. No entanto, quando o mesmo descreve metade dessa circunferência, recebe uma energia $q V$, onde V é a diferença de potencial devida a um campo elétrico oscilante de frequência $\nu = \omega / (2\pi)$ (onde ω é a frequência angular do íon), situado entre os dois D e normal ao campo magnético. Desse modo, toda a vez que o íon atravessa o intervalo entre os dois D, ele é acelerado pelo campo elétrico e sua trajetória tem a forma de uma espiral que se inicia na fonte do íon, em consequência de aceleração múltipla. Depois que o íon adquire a energia estabelecida, ele é defletido em um canal e dirigido para o alvo que se deseja bombardear.

Muito embora os primeiros **ciclotrons** funcionassem bem com prótons, eles apresentavam dificuldades em acelerar elétrons, pois a pequena massa (cerca de $1/1.835$ da massa do próton) dessas partículas aumentava à medida que sua velocidade crescia, conforme indica a Relatividade Restrita Einsteiniana (vide verbete nesta série); conseqüentemente, a sua

frequência defasava em relação à frequência do campo elétrico oscilante. A primeira tentativa para contornar essa dificuldade foi apresentada pelo físico norte-americano Donald William Kerst (1911-1993), em 1940 (*Physical Review* **58**, p. 841), ao construir o primeiro **betatron**, que acelerava elétrons, oriundos de um núcleo radioativo, com a energia da ordem de 2,5 MeV, em uma trajetória circular fixa, uma vez que o aumento relativístico de suas massas era compensado pela variação do campo magnético (ver expressão acima) produzido por um indutor. É interessante registrar que o nome **betatron** foi dado em virtude de ser o elétron oriundo de fontes radioativas chamado de **partícula beta**. Registre-se, também, que o físico brasileiro Marcelo Damy de Souza Santos (n.1914) instalou na USP, em 1951, o primeiro **betatron** brasileiro de 22 MeV.

Como o **betatron** apresentava uma limitação de energia devido ao efeito relativístico do aumento de massa do elétron, os físicos, o russo Vladimir Iosifovich Veksler (1907-1966), em 1944 (*Comptes Rendus de l'Academie de Sciences USSR* **44**, p. 393) e, independentemente, o norte-americano Edwin Mattison McMillan (1907-1991; PNQ, 1951), em 1945 (*Physical Review* **63**, p. 143), propuseram o princípio do **sincrociclotron**, segundo o qual a frequência do campo elétrico oscilante em um **ciclotron** era sincronizado com a frequência da partícula acelerada em uma dada órbita. Esse princípio, conhecido como **estabilizador de fase**, permitiu a construção de aceleradores cada vez mais potentes. O primeiro **sincrociclotron**, com o diâmetro de 184 polegadas, foi construído em 1947 (*Physical Review* **71**, p. 449), na *Universidade da Califórnia*, em Berkeley, sob a coordenação de McMillan e Lawrence [com a participação de W. M. Brobeck, K. R. Mackensie, Robert Serber (1909-1997), D. C. Sewell, K. M. Simpson e R. L. Thornton] e utilizado na aceleração de dêuterons (190 MeV) e de partículas α (380 MeV).

Apesar dessa inovação no **ciclotron**, que resultou no **sincrociclotron**, conforme vimos acima, a aceleração de elétrons a velocidades relativísticas também era um problema para esse novo acelerador. Daí surgiu a necessidade de um outro dispositivo, no qual o campo elétrico oscilante fosse mantido constante e o campo magnético é que passasse a variar com o tempo, dispositivo esse que se denominou, mais tarde, de **sincrotron**. Para o desenvolvimento desse novo **acelerador circular** e, principalmente, para a redução de seus custos, foi importante o desenvolvimento do princípio conhecido como **focagem forte** ("strong focusing"). Uma primeira ideia desse princípio foi discutida pelo físico inglês Llewellyn Hilleth Thomas (1903-1992), em 1938. Mais tarde, em 1949, o engenheiro elétrico grego Nicholas C. Christofilos (1917-1972) voltou a falar da **focagem forte**. Note-se que Christofilos, embora nunca tenha publicado essa sua ideia, ele obteve uma patente da mesma em 26 de fevereiro de 1956 (*US Patent No. 2.736.799*). Registre-se que, em 1952 (*Physical Review* **86**, p. 582), os físicos norte-americanos F. C. Shoemaker, R. J. Britton e B. C. Carlson examinaram a possibilidade da construção de um acelerador de ultra-alta energia, usando o referido conceito de **focagem forte**, cujo objetivo fundamental é o de manter juntas as partículas aceleradas em um **ciclotron**, durante um enorme número de revoluções e cujas órbitas são contidas em regiões relativamente pequenas, resultando daí sua grande vantagem prática. Por fim, em 1953 (*Physical Review* **88**, p. 197; 1190), os físicos norte-americanos John Paul Blewett (1910-2000) (de origem canadense) e, independentemente, Ernest David Courant (n.1920), Linvingston e Hartland S. Snyder (1913-1962) mostraram como o conceito da **focagem forte** poderia ser usado em um novo tipo de acelerador: o **sincrotron**.

O primeiro **sincrotron** usando o princípio da **focagem forte**, conseguido com uma sucessão de campos magnéticos variáveis e alternados, ou seja, com gradientes de campo magnético alternado, foi construído, em 1954, sob a coordenação do físico norte-americano Robert Rathbun Wilson (1914-2000), na *Universidade de Cornell*, produzindo elétrons de 1,1 GeV. Usando ainda aquele princípio, foi construído, em 1959, no *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN) (criado em 1952 e iniciado seu funcionamento em 1954), o **sincrotron de próton** (PS) de 28 GeV e, em 1960, o **acelerador de prótons** ou **Alternating Gradient Synchrotron** (AGS), no *Brookhaven National Laboratory* (BNL), de 33 GeV. Registre-se que foi também de Wilson a coordenação da construção do **Electric Synchrotron** (ES), no *Fermi National Accelerator*

Laboratory (hoje, FERMILAB), em 1967, com a energia de 200 MeV. Outros aceleradores desse tipo foram então fabricados em vários laboratórios do mundo (por exemplo, França, Rússia e Japão), como se pode ver nos textos indicados no início deste verbete.

Sobre esses **aceleradores circulares sincrônicos**, é oportuno acrescentar que a primeira tentativa de se construir um deles no Brasil, aconteceu em 1952, no CBPF, para prótons de 450 MeV. Contudo, essa tentativa foi frustrada em virtude da crise política que levou ao suicídio do Presidente Getúlio Dornelles Vargas (1883-1954), em 24 de agosto de 1954. A segunda tentativa de o Brasil possuir um grande acelerador de partículas ocorreu com a visita do Presidente francês General Charles (André Marie Joseph) de Gaulle (1890-1970), em outubro de 1964, que ofereceu um acelerador para ser instalado na *Universidade de Brasília*. Essa tentativa também foi frustrada, desta vez pela ação da Ditadura Militar que foi instituída no março em 1964, e que culminou com a demissão de mais de 200 professores daquela Universidade, em 1965. Sobre essa crise, ver o livro do físico brasileiro Roberto Aureliano Salmeron (n.1922) intitulado: **A Universidade Interrompida: Brasília 1964-1965** (EDUnB, 1999; 2007). Por fim, em janeiro de 1987, uma equipe liderada pelo físico brasileiro Cylon Eudócio Tricot Gonçalves da Silva (n.1946) (com a participação de A. Ricardo Rodrigues e Aldo F. Craievich), iniciou a construção do *Laboratório Nacional de Luz Síncrotron* (LNLS), na *Universidade Estadual de Campinas* (UNICAMP), com o objetivo de acelerar elétrons com a energia no intervalo 2-3 GeV. Registre-se que, em 27 de maio de 1997, foi obtido o primeiro feixe de elétrons com 120 mA de corrente, tendo sua inauguração ocorrida em julho de 1997. Para maiores detalhes sobre o LNLS, ver: José Antônio Brum e Rogério Meneghini, **O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron [São Paulo Perspectivas 16 (4), Outubro-Dezembro de 2002]**.

Vejamos, agora, os **aneis de colisão** (“storage rings”). Todos os aceleradores vistos até agora são **máquinas de alvos-fixos**, ou seja, o acelerador envia um feixe de partículas com uma dada energia (energia de laboratório: E_L) para um alvo em repouso de energia $E_0 = m_0c^2$. No entanto, quando E_L é grande comparada com E_0 , uma boa parte daquela energia é desperdiçada. Assim, a energia importante não é a E_L , mas a energia do centro de massa (E_{CM}) do sistema projétil-alvo. Por exemplo, para o caso de um próton relativístico atingindo um próton fixo, tem-se: $E_{CM} = \sqrt{2m_0c^2 E_L}$. Assim, se um próton é acelerado com 1.000 GeV, contra um próton em repouso, que tem $E_0 = 0,938$ MeV, então $E_{CM} \approx 43$ GeV! (Segrè, op. cit.). Ora, como o custo das máquinas aceleradoras é proporcional à energia do laboratório (em média: 1dólar = 1 eV), era evidente que havia necessidade de se conseguir diminuir tais custos. Pensando nessa dificuldade, físicos experimentais idealizaram um tipo de acelerador em que partículas (ou partícula e sua antipartícula), aceleradas em sentido contrário, colidissem em determinados pontos de suas trajetórias. A primeira ideia desse tipo de acelerador foi discutida por Kerst, em 1955, em uma conferência do *Midwest Universities Research Association* (MURA) (Fitch and Rosner, op. cit.). Essa ideia só se tornou pública, em 1956, quando Kerst e os físicos norte-americanos F. T. Cole, Horace T. Crane (n.1907), L. W. Jones, L. J. Laslett, A. M. Sessler, Keith R. Symon, K. M. Terwilliger, N. V. Nilsen e o japonês T. Okhawa (*Physical Review* **102**, p. 590) e, independentemente, o também físico norte-americano Gerard Kitchen O’Neill (1900-1992) (*Physical Review* **103**, p. 1418), discutiram a proposta da construção daquele tipo de acelerador. É oportuno registrar que, nesse tipo de acelerador, a colisão de dois feixes de prótons de 22 GeV, produz no CM a energia de 44 GeV. Note-se que essa ordem de energia, conforme vimos anteriormente, só era conseguida com um próton acelerado com 1.000 GeV colidindo com um próton fixo.

Tendo em vista a ideia de um novo tipo de acelerador, O’Neill, do *Departamento de Física da Universidade de Princeton*, foi conversar com Panofsky, então Diretor do SLAC, para que as duas Universidades (*Princeton* e *Stanford*), estudassem a possibilidade de construir um **colisor pósitron-elétron** (e^+e^-). Em consequência dessa conversa, O’Neill e mais os físicos

norte-americanos Burton Richter (n.1931; PNF, 1976), W. Carl Barber e D. Gittelman iniciaram, em 1959, na *Universidade de Stanford*, a construção do primeiro **anel de colisão pósitron-elétron** [*Stanford Positron Electron Asymmetric Ring* (SPEAR)], cujas primeiras experiências foram concluídas em 1965, com seus resultados apresentados por aqueles físicos, em 1966 (*Physical Review Letters* **16**, p. 1127). Depois, seguiram-se outros **aneis de colisão** como, por exemplo, em 1967, em Orsay, na França, e em Novosibirsk, na então União Soviética; em 1969, o ADONE do *Frascati National Laboratory* (FrNL), na Itália; e em 1974, o DORIS (“Doppel Ring Speicher”), em Hambourg, na Alemanha. Registre-se que a primeira colisão próton-antipróton ($p\bar{p}$) foi realizada no *Intersecting Storage Rings/Super Proton Synchrotron* (ISR/SPS), no CERN, em agosto de 1981. Para maiores detalhes sobre novos **aneis de colisão**, ver os textos indicados no início deste verbete.

Dando sequência a este verbete, falaremos agora sobre os **detectores** usados na descoberta de Partículas Elementares. Eles podem ser, basicamente, de dois tipos: **visuais** e **eletrônicos**. Dentre os vários tipos **visuais**, a **câmara de névoa** (ou **câmara de Wilson**) (1911) e a **câmara de bolha** (1952), já foram analisadas em verbetes nesta série. Vejamos, agora, outros tipos desses **detectores**. Em 1910 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A83**, p. 432), o físico japonês S. Kinoshita, que trabalhava com Rutherford, no *Cavendish Laboratory*, examinando a passagem de partículas carregadas (p.e.: α) através de uma **emulsão fotográfica nuclear**, observou que elas deixavam em seu rastro uma coleção de grãos de emulsão, cujo exame desses grãos [brometo de prata (AgBr)] permitia estudar a dinâmica das reações que ocorria na emulsão. Muito mais tarde, em 1937 (*Nature* **140**, p. 585), as físicas austríacas Marietta Blaum (1894-1970) e Martha Wambacher (1903-1954) também usaram essa técnica de **emulsões** para estudar os traços deixados por raios cósmicos (sobre esses raios, ver verbete nesta série). Logo depois, em 1939 (*Nature* **144**, p. 115), os físicos ingleses Sir Cecil Frank Powell (1903-1969; PNF, 1950) e Geoffrey E. F. Fertel, na *Universidade de Bristol*, na Inglaterra, também usaram **emulsões** para estudar o espalhamento próton-nêutron. Aliás, conforme vimos em verbetes desta série, foi o aperfeiçoamento dessa técnica que levou à descoberta dos **mésons primários** (hoje, **píons**), em 1947. Registre-se que essa técnica funciona assim. Quando uma partícula carregada atravessa uma emulsão, os grãos de AgBr alteram-se, permitindo desse modo, depois da revelação do filme, obter-se a trajetória dessa partícula. Como a imagem em uma película fotográfica não é bem definida, usa-se uma pilha delas, e o rastro (alteração daqueles grãos) deixado pela partícula ao atravessar essa pilha é então observado por intermédio de um minucioso exame microscópico.

Um outro tipo de **detector visual** é a **câmara de faíscas** (“spark chamber”), no qual a passagem de uma partícula carregada através de duas placas metálicas colocadas em um meio gasoso e muito próximas uma da outra, faz saltar uma faísca (centelha) entre essas placas. A associação de vários pares dessas placas permite a determinação da trajetória da referida partícula. Esse dispositivo foi usado, em 1959 (*Nuovo Cimento* **11**, p. 113), pelos físicos japoneses Shuji Fukui (n.1923) e S. Miyamoto. É interessante registrar que, com esse novo equipamento, foi possível contornar uma grande deficiência da **câmara de bolhas** (inventada em 1952), pois, enquanto esta registrava traços de uma ou duas partículas por segundo, a câmara de Fukui e Miyamoto conseguia um registro de traços cem vezes maior. Contudo, esse dispositivo ainda era insuficiente para detectar eventos relacionados com interações de altas energias, que necessitavam de alguns milhões de fotografias por experimento. Daí, portanto, a necessidade de desenvolver novos detectores que usassem a eletrônica, os chamados **detectores eletrônicos**.

Os principais **detectores eletrônicos** são os **cintiladores**, nos quais a partícula carregada ao atravessar o material cintilante sólido (cristais ou plásticos) ou líquido, provoca a emissão de fótons que, por sua vez, se converterão em elétrons devido ao **efeito foto-elétrico** (sobre esse efeito, ver verbete nesta série). Esses elétrons produzem uma corrente elétrica que é então **visualizada**. É oportuno destacar que a primeira ideia de amplificar pequenas correntes deve-se ao inventor norte-americano Joseph Slepian (1891-1969), em 1919 (*US Patent No.*

1.450.265), sem muito sucesso. Mais tarde, em 1936 (*Proceedings of the Institute of Radio Engineers* **24**, p. 351), os engenheiros eletrônicos norte-americanos Vladimir Kosma Zworykin (1889-1982) (de origem russa), G. A. Morton e L. Mather desenvolveram um dispositivo para amplificar foto-elétrons, usando focagem eletrostática e magnética. Esse dispositivo foi melhorado por Zworykin e J. A. Rajchman, em 1939 (*Proceedings of the Institute of Radio Engineers* **27**, p. 558).

Com a descoberta (1934) e explicação (1937) do **efeito Vavilov-Cherenkov**, novos tipos de **detectores** foram desenvolvidos. Diferentemente dos primeiros **cintiladores**, nos **contadores Cherenkov**, os fótons (radiação eletromagnética) emitidos pelo material cintilante (sólido, líquido ou gasoso) decorrem daquele efeito. Conforme vimos em verbete desta série, quando uma partícula carregada passa por um material de índice de refração (n) com uma velocidade constante (v) maior que a velocidade de fase (c/n) da luz nesse material, há emissão da chamada **radiação de Vavilov-Cherenkov**. Por outro lado, em 1947 (*Natur und Technik*, July), H. Kallmann começou a usar outros cristais orgânicos [p.e.: antraceno ($C_{14}H_{16}$) e naftaleno ($C_{10}H_8$)], que melhoraram bastante os **detectores eletrônicos** (também conhecidos como **fotomultiplicadores**) por serem transparentes à sua própria radiação fluorescente.

Na década de 1960, um novo tipo de **detector eletrônico** entrou em cena: o **contador multifios**. Tais dispositivos [que são baseados no mesmo princípio do **contador Geiger-Mueller** (vide verbete nesta série)] foram construídos graças aos trabalhos do físico franco-polonês Georges Charpak (n.1924), em virtude dos quais ganhou o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 1992. Nascido na Polônia, Charpak emigrou para a França aos sete anos de idade. Durante a *Segunda Guerra Mundial* (1939-1945) ele participou da “Resistência Francesa” e, em 1943, foi preso pelo “Estado Francês Nazista”, sediado em Vichy. Em 1944, foi deportado para o “Campo de Concentração Nazista”, em Dachau, e lá ficou até ser libertado com o fim daquela Guerra, em 1945. De 1945 a 1948, Charpak estudou na *École de Mines*, de onde saiu Bacharel em Ciências e Engenheiro de Minas, em 1948. Nesse mesmo ano entrou para o corpo de pesquisadores do *Conseil Nationale pour la Recherche Scientifique* (CNRS) (fundado em 1939) e, depois de trabalhar no *Laboratório de Química Nuclear do Collège de France*, dirigido pelo físico francês Frederic Joliot-Curie (1900-1958; PNQ, 1935), Charpak obteve nesse famoso Colégio o título de Doutor em Física, em 1955. Em 1959, juntou-se ao “staff” do CERN.

Em 1960 (*Nuovo Cimento* **17**, p. 288), Charpak, o físico norte-americano Leon Max Lederman (n.1922; PNF, 1988), Sens e Zichichi descreveram um método para aprisionar múons em campos magnéticos e sua aplicação para determinar o momento de dipolo elétrico dessas partículas. Em 1961 (*Physical Review Letters* **6**, p. 128), Charpak, F. J. M. Farley, Richard Lawrence Garwin (n.1928), T. Muller, J. C. Sens, Valentine Louis Teledgi (n.1922) e Antonino Zichichi (n.1929) apresentaram o resultado da primeira medida exata do momento magnético anômalo do múon (μ). Em 1962 (*Physics Letters* **1**, p. 16), Charpak, Farley, Garwin, Muller, Sens e Zichichi anunciaram que haviam medido a **razão giromagnética** g do múon. Registre-se que g mede a relação entre o momento angular total (J) e o momento magnético (m) de uma determinada partícula. Em 1962 e 1963 (*Nuclear Instruments and Methods* **15**; **20**; **24**, p. 318; 482; 501), Charpak (isoladamente e com a colaboração de J. Favier e L. Massonnet) descreveu um novo tipo de **cintilador não-fotográfico**. Em 1968 (*Nuclear Instruments and Methods* **62**; **65**, p. 262; 217), Charpak, R. Bouclier, T. Bressani, Favier e C. Zupancic construíram a **câmara proporcional de multifios** (CPM) (“multiwire proportional chamber” – MWPC). Melhoramentos a esse dispositivo foram apresentados, em 1970, por Charpak, R. Rham e H. Steiner (*Nuclear Instruments and Methods* **80**, p. 13), e por Charpak, Bouclier, Z. Dimocovski, H. G. Fischer, F. Sauli, C. Coignet e G. Flugge (*Nuclear Instruments and Methods* **88**, p. 149).

Basicamente, a COM/MWPC é composta de fios carregados, distantes de 1,2 mm, encordoados e dispostos em camadas cruzadas, e contidos em um recipiente cheio de gás. Uma

voltagem é então aplicada aos fios de tal modo que os fios centrais são carregados positivamente, enquanto os externos ficam negativamente carregados. Desse modo, se uma partícula carregada entra nesse detector, ela ioniza os átomos do gás e os íons resultantes se dirigem, em turbilhão (“drift”), para os fios centrais, disparando um sinal. Como os fios são arrumados em camadas cruzadas, é possível obter uma figura tridimensional dos traços deixados pelos íons. Portanto, quando a CPM é acoplada a computadores, há possibilidades de registrar cerca de um milhão desses traços por segundo, número típico que ocorre em colisões envolvendo partículas com alta energia. Em vista disso, a CPM foi usada na descoberta das partículas, a $\psi^{\prime}J$, em 1974, em três **aneis de colisão** (e^+e^-): SPEAR do SLAC; ADONE do FrNL, em Frascati; DORIS, em Hamburg, e no **acelerador de prótons**, o AGS do BNL; e as W^{\pm}, Z^0 , em 1983, no SPS, do CERN. Sobre essas descobertas, ver verbetes nesta série.

A partir de 1970, Charpak trabalhou no desenvolvimento de novos **detectores**, como, por exemplo, a **câmara de turbilhão** (CT) (“drift chamber”) e a **câmara de projeção temporal** (CPT) (“time projection chamber”), conforme se pode ver nos seguintes artigos: em 1972 (*Nuclear Instruments and Methods* **100**, p. 157), Charpak, A. Breskin e F. Piuz descreveram a CT, que opera em pressões muito baixas, da ordem de um milímetro de mercúrio (1 mmHg); em 1973, Breskin, Charpak e K. Geissler (*Nuclear Instruments and Methods* **107**, p. 361), e Breskin e Charpak (*Nuclear Instruments and Methods* **108**, p. 427), descreveram a CPT. Ainda em 1973 (*Nuclear Instruments and Methods* **113**, p. 381), Charpak e Sauli descreveram um novo processo de impressão bidimensional de alta precisão para as CPM. Em 1974 (*Nuclear Instruments and Methods* **115**, p. 235), Bouclier, Charpak, E. Chesi, L. Dumps, Fischer, H. J. Hilke, P. G. Innocent, G. Maurin, A. Minten, L. Naumann, Piuz, J. C. Santiard e O. Ullaland apresentaram uma nova CPM contendo 50.000 fios. Também em 1974 (*Nuclear Instruments and Methods* **119**, p. 1; 7; 9), Breskin, Charpak, Sauli e Santiard; Breskin, Charpak e Sauli; e Breskin, Charpak, B. Gabioud, Sauli, N. Trautner, W. Duinker e G. Schultz descreveram, respectivamente, novas CT: bidimensionais; de baixa pressão para partículas ionizantes bem pesadas; e de alta precisão. Novas CPM e CT [p.e.: a **câmara de turbilhão esférica** (CTE) (“spherical drift chamber”) e a **câmara de turbilhão de multiestágios** (CTM)] foram descritas por Charpak, ainda em 1974 (*Institute of Electrical and Electronic Engineers: Transactions in Nuclear Sciences* **NS21**, p. 38).

A partir de 1974, além de sua participação na detecção de partículas, Charpak esteve envolvido em pesquisas em Medicina, Biologia e Indústria. Em 1974, por exemplo, usou a CTE para estudar proteínas usando a difração de raios-X. Entre 1979 e 1989, utilizou a CTM na pesquisa biológica, principalmente relacionada com a detecção de imagens da distribuição de moléculas marcadas com elementos radioativos. Em 1999 (*Journal of Nuclear Medicine* **40**, p. 868), Charpak, B. Basse-Cathalinat, N. Barthe, P. H. Coulon, D. Ducasson e C. Hennion relataram várias experiências que haviam realizado em Medicina. Para maiores detalhes do trabalho de Charpak ver sua *Nobel Lecture* (**Nobel e-Museum**, 08 de Dezembro de 1992), seu artigo de 1993 (*Review of Modern Physics* **65**, p. 591), no qual ele fala de seus trabalhos para o desenvolvimento da CMP/MWPC, e no livro que ele editou, em 1995, intitulado: **Research on Particle Imaging Dectors** (World Scientific, Singapore).

Na década de 1990, Charpak continuou investigando novos tipos de **detectores**. Com efeito, logo em 1990 (*Large Hadron Collider* **3**, p. 384), ele e os físicos russos V. Peskov e D. Scigocki descreveram um **detector gasoso** com fotocátodos sólidos. No ano seguinte, em 1991 (*Nuclear Instruments and Methods* **A306**, p. 439), Charpak, Lederman e Y. Giomataris desenvolveram o **detector OI-P** (“optical impact-parameter”). Nossos resultados obtidos com esse novo tipo de detector foram apresentados, em 1993, por Charpak, R. Chipaux, J. Derre, Giomataris, C. Joseph, C. Kochowski, Sotiris Loucatos, J. P. Perroud, P. Rebourgeard, M. Steininger, M. T. Tran e M. C. S. Williams (*Nuclear Instruments and Methods* **A332**, p. 91) e, independentemente, por Daniel M. Kaplan, M. Apolinski, W. Luebke e S. W. L. Kwan (*Nuclear Instruments and Methods* **A330**, p. 33). Por fim, em 2000 (*Nuclear Instruments and Methods* **A449**, p. 314), Charpak, Derre,

Giomataris, Rebourgeard, H. Zaccane e Perroud desenvolveram um método de detectar sinais rápidos e elétrons isolados com o **fotodetector micromegas**.

Concluindo este verbete, é interessante registrar que existem outros tipos de **detectores** auxiliando a busca de novas partículas, usando novos materiais (p.e.: semicondutores, fibras ópticas e chapas xerográficas), diferentes dos registrados neste verbete. Existem ainda os “**calorímetros**”, que são dispositivos que medem a energia da radiação decorrente de algumas reações envolvendo as Partículas Elementares. Para maiores informações sobre os **detectores**, ver: en.wikipedia.org/wiki/Particle_detector.



ANTERIOR

SEGUINTE