

## AS PARTÍCULAS CONSTITUINTES DO NÚCLEO\*

José Maria Filardo Bassalo  
Instituto de Física da UFPA

AS PRIMEIRAS ANTIPARTÍCULAS. A descoberta do nêutron ensejou a que fossem realizadas várias experiências de reações nucleares e das quais resultaram evidências de novas partículas constituintes do núcleo. Assim, Enrico Fermi (Físico Ítalo-norte-americano, 1901-1954; Prêmio Nobel de Física de 1938) e colaboradores em 1934 (R01), iniciaram uma série de experiências para produzir novos elementos a partir do Urânio irradiado com nêutrons, elementos esses que passaram a ser denominados de *transurânicos*.

Em 1930 (R02), Wolfgang Pauli Junior (Físico austro-norte-americano, 1900-1958; Prêmio Nobel de Física, 1945) propôs uma hipótese para explicar o decaimento beta, cujo mecanismo negava o princípio da conservação da energia. Segundo Pauli, a não-conservação da energia observada por volta de 1920, na emissão de elétrons por átomos que sofriam desintegração beta, poderia ser contornada admitindo que a parcela de energia aparentemente perdida, no processo de emissão beta, seria conduzida por uma nova partícula, sem carga elétrica e de massa quase nula. Fermi, em 1934 (R03), formulou a teoria matemática do decaimento beta, segundo a qual o nêutron, por desintegração<sup>(1)</sup>, se transforma em um próton, emitindo um elétron - a partícula beta e a partícula proposta por Pauli. A essa partícula Fermi deu o nome de *neutrino*<sup>(2)</sup> (nêutron pequenino).

Com essa teoria em mente e acreditando que o Urânio, ao captar um nêutron, poderia ser transmutado em um novo elemento de maior peso, Fermi e seus colaboradores, conforme nos referimos acima, começaram a bombardear o isótopo do Urânio -  ${}_{92}\text{U}^{239}$ . Fermi não entendeu bem os seus resultados, pois além de obter a desintegração e a correspondente meia-vida do urânio, obteve também, uma mistura de outras meias-vidas, acreditando ter conseguido um novo elemento da tabela periódica chegando mesmo a chamá-lo de Urânio X. Mais tarde, em 1939 (R04), Otto Hahn (Físico-químico alemão, 1879 - 1968; Prêmio Nobel de Química, 1944) e Fritz Strassmann (Químico alemão, 1902 -

---

\* Este artigo é a terceira parte do trabalho "Crônica das Partículas Elementares". As duas primeiras partes desse trabalho foram publicadas nos volumes 2, nº 2 e 2, nº 3 dessa Revista.

) conseguiram obter os elementos alcalinos terrosos<sup>(3)</sup>, através da desintegração do urânio bombardeado com nêutron.

No entanto, quer as experiências de Fermi, quer as de Otto Hahn e Strassmann, só foram explicadas por Lise Meitner (Física sueco-austríaca, 1878-1968) e Otto Richard Frisch (Físico austro-germânico, 1904- ) em 1939 (R05), ao formularem a hipótese da *fissão nuclear*, cuja teoria seria desenvolvida nesse mesmo ano de 1939 (R06) por Bohr e Wheeler. A primeira fissão nuclear controlada - a *pilha atômica* - foi realizada por Fermi e Leo Szilard (Físico húngaro-norte-americano, 1898-1964) no dia 2 de dezembro de 1942, na Universidade de Chicago<sup>(4)</sup>, e o primeiro elemento transurânico - o *neptunio* ( $_{93}\text{Np}$ ) - foi obtido por Edwin Mattison McMillan (Físico norte-americano, 1907- ; Prêmio Nobel de Química, 1951) e Philip Hange Abelson (Físico-químico norte-americano, 1913- ), em 1940<sup>(5)</sup> (R07).

Depois dessa breve digressão com relação à fissão nuclear, voltemos ao neutrino. Conforme sugerira Pauli, essa partícula não deveria ter carga e sua massa deveria ser quase nula; portanto, de difícil detecção. No entanto, uma das características que ajudaram a identificação do neutrino foi o seu *spin*.

Com o propósito de poder explicar a tabela periódica dos elementos de Mendeleiev, Pauli, em 1925 (R08), acrescentou aos três números quânticos decorrentes da teoria atômica de Bohr-Sommerfeld<sup>(6)</sup>, um quarto número quântico. Assim, segundo Pauli, dois elétrons só poderiam coexistir em um mesmo sub-nível energético, se tivessem, pelo menos, um dos quatro números quânticos diferente. Com essa hipótese, hoje conhecida como o *Princípio da Exclusão de Pauli*, a estrutura atômica dos elementos ficou perfeitamente explicada. Nesse mesmo ano de 1925 (R09), George Eugene Uhlenbeck (Físico holandês-norte-americano, 1900- ) e Samuel Abraham Goudsmit (Físico holandês-norte-americano, 1902-1978) observaram que as raias espectrais finas do Sódio só poderiam ser explicadas se ao quarto número quântico eletrônico proposto por Pauli - a que chamaram de *spin* e interpretaram-no como um momento angular intrínseco - pudesse ser atribuído um dos valores:  $+1/2$  ou  $-1/2$ . Mais tarde, spins inteiros e outros semi-inteiros foram descobertos e serviram para caracterizar outras partículas. Por exemplo, prótons e nêutrons têm *spin*  $+1/2$  ou  $-1/2$ , e o *fóton* (radiação eletromagnética) tem *spin* 1. Assim, a lei de conservação do momento angular exigia que o antineutrino tivesse *spin*  $+1/2$  ou  $-1/2$  para poder permitir a desintegração do nêutron livre, conforme a teoria de Pauli-Fermi.

A comprovação experimental da existência do antineutrino foi feita em 1956 (R10) por Clyde Lonain Cowan (Físico norte-americano,

1919- ), Frederick Reines (Físico norte-americano, 1918- ) e colaboradores, porém de maneira indireta. Estabeleceram um sistema de detecção que, concentrado em uma reação particular<sup>(7)</sup> e da qual participasse um antineutrino, detetaria as cintilações causadas por partículas carregadas resultantes da reação referida acima.

A teoria matemática das interações fracas com emissão de neutrinos/antineutrinos levaria, nesse mesmo ano de 1956 (R11), Chen Ning Yang (Físico sino-norte-americano, 1922- ; Prêmio Nobel de Física, 1957) e Tsung-Dao Lee (Físico sino-norte-americano, 1926- ; Prêmio Nobel de Física, 1957) a formularem a teoria da não-conservação da paridade<sup>(8)</sup> nas interações fracas cuja comprovação experimental foi feita em 1957 (R12) por Chien-Shiung Wu (Física sino-norte-americana, 1915- ) e colaboradores do National Bureau of Standards. Observaram eles que a probabilidade de emissão de elétrons - emissão beta - de uma amostra radioativa de Cobalto<sup>(9)</sup> num campo magnético intenso e a baixa temperatura, não era a mesma em relação ao plano normal ao momento magnético nuclear do núcleo do Co, isto é, eles só saíam pelo mesmo lado do plano. A descoberta do neutrino/antineutrino associado ao elétron levou os físicos, no começo da década de 1960, a descobrirem que existe, também, neutrinos/antineutrinos associados ao  $\mu$ on<sup>(10)</sup> -  $\mu$ .

Como aconteceu com o neutrino/antineutrino, outras antipartículas subnucleares tiveram suas existências previstas teoricamente. Assim, Paul Adrien Maurice Dirac (Físico inglês, 1902- ; Prêmio Nobel de Física, 1933), ao fazer, em 1928 (R13), a teoria relativística<sup>(11)</sup> do elétron, demonstrou a possibilidade de existir na natureza uma partícula idêntica ao elétron, porém com carga elétrica positiva, a quem Dirac chamou de *antieletron*. A equação de Dirac indicava que poderia haver dois estados de energia para o elétron livre: um positivo e um negativo. Segundo Dirac, como a energia é sempre positiva ( $1/2 mv^2$ , classicamente, e  $mc^2$ , relativisticamente), imaginou existir um "oceano infinito" onde se encontravam densamente armazenados todos os estados possíveis de elétrons com energia negativa - os antieletrons -, os quais poderiam ser detetados por causa do princípio de exclusão de Pauli, segundo o qual a matéria se sobrepõe a qualquer matéria diferente; *anti-matéria*, no dizer de Dirac. Se, no entanto, um fóton (radiação gama, por exemplo) com energia maior do que a do dobro da energia de repouso do elétron ( $2m_0c^2$ ) colidir com esse "oceano", cujos "elétrons" têm energia negativa, ou seja,  $-m_0c^2$ , esses "elétrons" passarão a ter energia positiva e poderão ser detetados como se fossem elétrons normais. É claro que no "oceano" ficou um "vazio", um "buraco", uma "lacuna", que também poderia ser detetados<sup>(12)</sup> como uma partícula de carga positiva.

Inicialmente Dirac pensou que essas "lacunas" poderiam corresponder aos prótons, pois eram carregadas positivamente, porém, como sua massa não corresponderia à do próton, abandonou tal interpretação. Jacob Robert Oppenheimer (Físico norte-americano, 1904-1967) em 1930 (R14), ao mostrar que o antielêtron de Dirac não poderia ser o próton, permitiu a descoberta dessa nova partícula, descoberta essa feita em 1932 (R15), por Carl David Anderson (Físico norte-americano, 1905- ; Prêmio Nobel de Física, 1936) ao estudar a trajetória dos raios cósmicos<sup>(13)</sup> em uma câmara de Wilson. Normalmente, as partículas associadas aos raios cósmicos são de alta energia e sua passagem na câmara de Wilson é quase imperceptível. Devido a isto, Anderson inseriu normalmente à câmara, uma placa de chumbo com o intuito de freiar as partículas cósmicas. Ao examinar a trajetória dessas partículas que emergiam da placa de chumbo e atravessavam uma região de forte campo magnético, observou uma trajetória idêntica à do elétron, porém de curvatura oposta. Supondo tratar-se das antipartículas propostas teoricamente por Dirac, Anderson deu o nome de *pósitron*<sup>(14)</sup>.

A Mecânica Quântica Relativística das partículas de spin  $1/2$  - Teoria de Dirac -, e a descoberta do antielêtron (*pósitron*), ensejou a que os físicos experimentais fossem à procura de outras antipartículas, como por exemplo, o *antipróton* ( $\bar{p}$ ) e o *antinêutron* ( $\bar{n}$ ), cujas existências já eram previstas pela equação de Dirac. A descoberta dessas antipartículas só foi possível quando começaram a construir aceleradores mais potentes, uma vez que o antipróton e o antinêutron são partículas que têm massa 1836 vezes maior do que a do elétron, que por sua vez vale  $9,1 \times 10^{-28}$  g. Eventualmente, essas partículas poderiam ser produzidas por meio de raios cósmicos como foram os pósitrons. Porém, como os raios cósmicos com energia suficiente para produzir aquelas partículas são raros na atmosfera terrestre, somente com a construção, em 1953, do *Bévatron*<sup>(15)</sup> do Laboratório Lawrence de Radiação da Universidade da Califórnia, em Berkeley, e que acelerava prótons a uma energia cinética de 6,2 BeV<sup>(16)</sup>, foi possível detectar antipartículas pesadas. Assim, em 1955 (R16), Owen Chamberlain (físico norte-americano, 1920- ; Prêmio Nobel de Física, 1959), Emilio Gino Segrè (Físico ítalo-norte-americano, 1905- ; Prêmio Nobel de Física, 1959)<sup>(17)</sup> e colaboradores, produziram os primeiros antiprótons<sup>(18)</sup> bombardeando prótons altamente energéticos em átomos de cobre, numa reação nuclear do tipo:



Nessa reação, a energia cinética do próton colidente (- 6 BeV) é transformada na massa de repouso de um par próton/antipróton em adição à energia cinética das partículas finais, obedecendo, assim, à

Mecânica Relativística de Einstein segundo a qual existe uma equivalência entre massa e energia, conforme a expressão  $E = mc^2$ .

Logo depois, em 1956 (R17), Bruce Cork e colaboradores apresentaram provas experimentais da existência de *antiprótons* ao estudarem a colisão de antiprótons com a matéria. Mais tarde, como veremos mais adiante, outras antipartículas foram sendo descobertas, já que certas leis de conservação previam suas existências.

**OS PÍONS E OS MUONS.** Outras partículas que tiveram suas previsões teóricas feitas antes de sua descoberta foram as então chamadas *mésons*. A previsão teórica dessas partículas decorreu da necessidade de estudar a estabilidade do núcleo, já que o modelo proposto por Fermi em 1934, no qual a estabilidade nuclear decorria da troca de elétrons entre os nucleons (prótons e nêutrons) malogrou, devido à pequena massa do elétron e à impossibilidade de confiná-lo no interior do núcleo, conforme vimos anteriormente (vide nota 21 do capítulo 2).

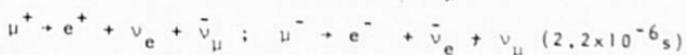
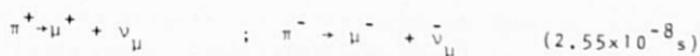
Em 1935, Yukawa, utilizando os métodos da teoria quântica de campos, sugeriu que os nucleons se ligassem ao núcleo atômico através de uma nova força da natureza, análoga aquela que prende o elétron ao átomo, porém de curto alcance e bastante forte. Yukawa admitiu que, assim como a interação eletromagnética entre partículas carregadas era consequência da troca de partículas sem massa - os *fótons*, a interação entre os nucleons, conhecida a partir daí como *interação forte*, decorria da troca de partículas que, diferentemente dos fótons, teriam massa intermediária entre a do próton e a do elétron, chegando inclusive a estimá-la em torno de 200 vezes a massa do elétron, massa essa necessária para garantir o curto alcance da força nuclear.

Em 1936 (R18), C.D. Anderson e Seth Henry Neddermeyer (Físico norte-americano, 1907- ) ao fazerem fotografias de raios cósmicos em uma câmara de Wilson, observaram uma trajetória menos curva do que a do elétron e mais curva do que a de um próton, indicando, assim, a presença de uma partícula de massa intermediária<sup>(19)</sup> entre a do próton e a do elétron, partícula essa que Anderson chamaria de *méson*, logo abreviada para *méson*<sup>(20)</sup>. Embora a massa dessa nova partícula fosse próxima da prevista por Yukawa, ela não interagia com núcleos atômicos<sup>(21)</sup>, indicando, portanto, que não se tratava das partículas previstas por Yukawa. Como o méson de Anderson era detectado ao nível do mar, R.E. Marshak e Hans Albrecht Bethe (Físico germano-norte-americano, 1906- ; Prêmio Nobel de Física, 1967), em 1947 (R19), sugeriram a hipótese de que existiriam duas espécies de mésons, o de Anderson e o de Yukawa, e que este último, por ter uma vi-

da-média efêmera, tornava sua detecção extremamente difícil.

No mesmo ano de 1947 (R20), Cesare Mansueto Giulio Lattes (Físico brasileiro, 1924- ), Cecil Frank Powell (Físico inglês, 1903-1969; Prêmio Nobel de Física, 1950) e colaboradores, pertencentes ao chamado Grupo de Bristol da Inglaterra, ao observarem ao microscópio rastros em emulsões nucleares fotográficas<sup>(22)</sup> expostas à incidência de raios cósmicos, em Chacaltaya nos Andes bolivianos, verificaram serem os mesmos compostos de um traço muito curto, seguido de um traço mais fino e longo, confirmando a hipótese de Marshak e Bethe. Segundo o Grupo de Bristol, quando os raios cósmicos (principalmente prótons e partículas alfa altamente energéticas<sup>(23)</sup>) penetram na atmosfera terrestre, colidem com núcleos de Oxigênio ou de Nitrogênio, e como os nucleons são envolvidos por uma nuvem mesônica (hipótese de Yukawa), há inicialmente a formação de mésons yukawianos (responsáveis pelo traço curto), mais tarde chamados de *mésons pi*. Como sua vida-média é curta, eles se desintegram nos mésons andersonianos, mais tarde chamados de *mésons mi*, que, por sua vez, se desintegram em elétrons. Apenas os mésons *mi* mais rápidos atingirão o nível do mar. No entanto, a fim de preservar o princípio da conservação da energia e do momento angular, foi necessário introduzir hipotéticos neutrinos (lembrar que nessa época - 1947 - os neutrinos não haviam ainda sido detectados, o que só ocorreu em 1956) nos dois mecanismos de desintegração, mecanismos esses que ficaram conhecidos como *chuveiro de mésons*<sup>(24)</sup>. Essa experiência do Grupo de Bristol permitiu que se estimasse a massa do méson *pi* em torno de 280 vezes a do elétron.

Somente em 1962 (R21), as experiências realizadas em Brookhaven em 1964 (R22:23), no CERN, conforme vimos anteriormente (vide nota 10), bem como o princípio da conservação de partículas leves<sup>(25)</sup>, mostraram que tais mecanismos de desintegração obedecem às seguintes reações:



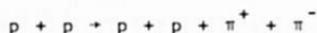
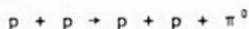
Em 1948 (R24), Eugene Gardner (Físico norte-americano, 1913-1950) e Lattes, produziram, artificialmente, os primeiros mésons carregados no Síncrociclotron de 380 Mev da Universidade de Berkeley, na Califórnia, bombardeando alvo de vários materiais com partículas alfa. Nessa experiência, eles observaram que, além de mésons *pi*, hoje denominados de *píons*, obtiveram, também, mésons *mi*, hoje denominados de *muons*.

A produção de mésons neutros foi observada por R.F. Bjorklund e colaboradores, em 1950 (R25), ao investigarem os raios gama emergentes de um alvo bombardeado por prótons de 345 Mev. Segundo eles, a quantidade dessa radiação gama era muito grande para poder ser explicada como radiação de Bremsstrahlung (radiação de frenagem) dos prótons ao serem freiados pelos núcleos do alvo, inferindo daí que houve a produção de um méson pi-neutro, seguida de sua desintegração com emissão de dois raios gama, com a vida-média de  $1,8 \times 10^{-16}$  s<sup>(26)</sup>. No mesmo ano de 1950 (R26), W.K.H. Panofsky e colaboradores, bombardearam, com mésons  $\pi^-$ , um recipiente contendo Hidrogênio e detetaram radiações gama, segundo a reação:



A análise da conservação da energia nessas reações permitiu-lhes calcular a massa do méson  $\pi^0$  em torno de 262 vezes a massa do elétron.

Hoje, depois da construção de aceleradores mais potentes, a produção de píons é feita bombardeando os núcleos atômicos de um alvo metálico com um feixe protônico saído de uma dessas máquinas, segundo três reações principais:



Esses píons decaem produzindo muons e seus respectivos neutrinos/antineutrinos, muons esses que, por sua vez, por decaimento, produzem elétrons/pósitrons e seus respectivos neutrinos/antineutrinos, conforme vimos anteriormente <sup>(27)</sup>.

- (1) A partir de 1950 (R27) esse mecanismo de desintegração das partículas elementares ficou conhecido com o nome de *Interação Universal de Fermi*, depois que Yang e Jayme Tiomno (Físico brasileiro, 1920- ) propuzeram aquela denominação. A partir de 1958, essa interação passou a ser conhecida com o nome de *interação fraca*.
- (2) Com a descoberta das antipartículas e da *Lei de Conservação de Partículas Leves*, foi observado que era emitido o antineutrino ao invés do neutrino no decaimento beta do nêutron, isto é, o nêutron se transforma em um próton, emitindo um elétron e um antineutrino associado ao elétron, sendo a massa do antineutrino menor do que  $5 \times 10^{-4}$  vezes a massa do elétron. A idéia de Fermi, na qual um nêutron livre é radioativo, foi confirmada por Arthur Hawley Snell (Físico canadense, 1911- ) e colaboradores do Oak Ridge National Laboratory, e independentemente por John Michael Robson (Físico inglês, 1920- ) e colaboradores do Chalk River Laboratory, ao calcularem, em 1950 (R28;29), a meia-vida do nêutron livre. O valor por eles obtido foi de 12 minutos. (Meia-vida de uma amostra radioativa é o intervalo de tempo necessário para que a amostra se reduza à metade de sua massa, por decaimento radioativo.)
- (3) Os alcalinos terrosos são os elementos químicos que têm dois elétrons fora das camadas eletrônicas fechadas (K,L,M...) e situam-se na coluna II da tabela periódica, ou seja  ${}^4\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{Mg}$ ,  ${}^{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{38}\text{Sr}$  e  ${}^{88}\text{Ra}$ .
- (4) A pilha atômica russa foi construída por Igor Vasilievich Kurchatov (Físico russo, 1903-1960), em 1946.
- (5) No mesmo ano de 1940 Glenn Theodore Seaborg (Físico norte-americano, 1912- ; Prêmio Nobel de Química, 1951), McMillan, Joseph William Kennedy (Físico norte-americano, 1917- ) e Arthur Charles Wahl (Físico norte-americano, 1917- ) produziram o segundo elemento transurânico, o *plutônio* ( ${}_{94}\text{Pt}$ ). No entanto, a publicação oficial de sua descoberta só foi feita em 1946 (R30), em vir-

tude da Segunda Guerra Mundial, à época da descoberta, encontrar-se em plena escalada. Seaborg e colaboradores produziram, mais tarde, outros elementos transurânicos: *Americcio* ( $_{95}\text{Am}$ ) e *Curio* ( $_{96}\text{Cm}$ ), em 1944 (R31); *Berkélio* ( $_{97}\text{Bk}$ ) e *Califórnio* ( $_{98}\text{Cf}$ ), em 1950 (R32;33) e o *Mendelêvio* ( $_{101}\text{Md}$ ), em 1955 (R34). Um grupo de físicos do Argonne National Laboratory, liderados por M.H. Studier, descobriram o *Einsteinio* ( $_{99}\text{E}$ ) e o *Férmio* ( $_{100}\text{Fm}$ ), em 1954 (R35). O elemento *Nobélio* ( $_{102}\text{No}$ ) foi descoberto por um grupo internacional, em 1957 (R36), e o elemento *Lawrencio* ( $_{103}\text{Lr}$ ), por Ghiorso e colaboradores, em 1961 (R37). Em 1964, físicos russos do Joint Institute for Nuclear Research, em Dubna, liderados por Georgii Nikolaevich Flerov (Físico russo, 1913- ) - o descobridor da *fissão espontânea* do Urânio, sem interferência externa -, descobriram o elemento 104 a quem deram o nome de *Kurchatôvio* ( $_{104}\text{Ku}$ ). Em 1969, um grupo de físicos da Universidade da Califórnia, Berkeley, liderados por Ghiorso, anunciaram a descoberta de alguns isótopos do elemento 104, a que deram o nome de *Rutherfordio* ( $_{104}\text{Rf}$ ). Até o momento, a denominação desse elemento ainda está em questão: na literatura ocidental, em relação ao Oceano Atlântico, usa-se o  $_{104}\text{Rf}$  e na oriental, o  $_{104}\text{Ku}$ . O grupo de Berkeley, liderado ainda por Ghiorso, reproduziu o *Hânio* ( $_{105}\text{Ha}$ ) em 1970, uma vez que o grupo de Dubna, liderado ainda por Flerov, havia anunciado em 1967 a produção de alguns elementos 105. Em junho de 1974, ainda Flerov e colaboradores do Joint Institute, anunciaram a descoberta do elemento 106. Em setembro de 1974, pesquisadores dos Laboratórios Lawrence e Livermore, anunciaram, também, a criação do elemento 106. Até o momento, esse elemento não recebeu denominação nem por parte dos americanos e nem por parte dos russos. A procura de novos elementos químicos tem mantido em intensa atividade os laboratórios de vários países do mundo, principalmente nos Estados Unidos (Califórnia e Flórida) e na Rússia (Dubna). Assim é que, em 1976, ainda o grupo de Dubna, liderado por Flerov, anunciou evidências para identificação do elemento 107. No mesmo ano de 1976 (R38), um grupo de físicos do Laboratório Nacional de Oak Ridge, da Universidade da Califórnia, em Davis, e da Universidade Estadual da Flórida, anunciaram evidências para identificação de vários elementos pesados compreendidos entre 105 e 129. No entanto, esses resultados vêm sendo bastante criticados por alguns grupos de físicos, uma vez que vários critérios básicos para identificação de um elemento químico, como por exemplo, o da observação e medição da emissão de partículas alfa de alta energia envolvidas no processo de produção do elemento, não vêm sendo satisfeitos, como apontaram Seaborg e colaboradores, em 1976 (R39). Recentemente, em fevereiro de 1978 (R40), pesquisadores do Laboratório Oak Ridge, liderados

por Gentry, depois de uma série de experiências, chegaram à conclusão de que "a evidência para elementos superpesados é inválida".

- (6) Os três números quânticos decorrentes da teoria de Bohr-Sommerfeld são:  $n$  - número quântico principal;  $\ell$  - número quântico orbital, e  $m$  - número quântico magnético.
- (7) Um fluxo de antineutrinos, produzido por nêutrons emergentes de um reator nuclear, colidia com prótons de um cintilador, produzindo nêutrons e pósitrons que, ao encontrarem elétrons livres do fluido cintilador, aniquilavam-se transformando-se em fótons (vide nota 14), responsáveis, portanto, pela cintilação. A primeira tentativa para estudar esse tipo de reação foi feita no Hanford Engineering Works, em 1953, e por Reines e Cowan, também em 1953 (R41).
- (8) A Lei de Conservação da Paridade foi proposta por Eugene Paul Wigner (Físico húngaro-norte-americano, 1902- ; Prêmio Nobel de Física, 1963) em 1930, ao aplicar os invariantes do grupo de reflexões às leis da Física. Segundo essa lei de conservação, nenhuma experiência física seria capaz de determinar, de maneira unívoca, a direita ou a esquerda. Antes de Lee e Yang, Mário Schemberg (Físico brasileiro, 1916- ) havia proposto uma teoria física que prescindisse da conservação da paridade, ao estudar, em 1941 (R42), o mecanismo de formação de estrelas supernovas, juntamente com George Gamow (Físico russo-norte-americano, 1904-1968). É interessante ressaltar que Louis Pasteur (Químico francês, 1822-1895) em 1848 observara que embora os compostos químicos orgânicos em sua totalidade pudessem existir em duas formas geometricamente simétricas (levógira e dextrógira), a natureza escolheu apenas uma delas - a levógira.
- (9) Na reação utilizada por Madame Wu e seus colaboradores, o cobalto radioativo  ${}_{27}\text{Co}^{60}$  sofria um decaimento beta, transformando-se no  ${}_{28}\text{Ni}^{60}$ , com emissão de um elétron e de um antineutrino associado ao elétron. É interessante referir que C.T.Chase, em 1930 (R43), observou uma quebra de paridade em uma experiência realizada com elétrons oriundos de uma substância radioativa. Porém, como essa simetria não mais se verificou ao serem usados elétrons oriundos de um filamento incandescente, essa experiência foi esquecida.
- (10) Físicos do Brookhaven National Laboratory e do Centre Européen de

Recherches Nucléaires (CERN), sendo que neste último, liderados por Roberto Aureliano Salmeron (Físico brasileiro, 1925- ) des- cobriram em 1962 (R21) e em 1964 (R22;23), respectivamente, que existem dois neutrinos/antineutrinos, um associado ao elétron e um outro associado ao muon. O tipo de experiência que levou a es- sa descoberta havia sido proposto, independentemente, por Ponte- corvo e Schwartz, em 1960 (R44;45).

- (11) A Teoria Especial da Relatividade, desenvolvida por Einstein em 1905 (R46), significa que "as leis da física são invariantes por uma transformação de Lorentz", ou seja, "as leis da física têm a mesma forma (covariante) em qualquer sistema referencial de inêr- cia". Segundo essa teoria a energia de repouso de uma partícula vale  $m_0 c^2$ , onde  $m_0$  é a massa de repouso da partícula. Pois bem, a teoria relativística do elétron proposta por Dirac, decorreu do fato de ter ele observado que a teoria do elétron proposta por Erwin Schrödinger (Físico austríaco, 1887-1961; Prêmio Nobel de Física, 1933) em 1926 (R47), não era covariante por uma transfor- mação de Lorentz. É importante chamar atenção para o fato de que a teoria de Dirac permite calcular o spin, o momento magnético orbital e os níveis de energia do elétron no átomo de Hidrogênio e em perfeito acordo com a experiência. Antes o spin havia sido introduzido "ad hoc" à velha teoria quântica por Pauli, em 1927 (R48) e por Darwin, também em 1927 (R49).
- (12) Oskar Benjamin Klein (Físico sueco, 1894- ) em 1929 (R50), idea- lizou a seguinte experiência: suponhamos que um elétron seja o- brigado a atravessar uma região onde existe um potencial retarda- dor, positivo, no caso. Pois bem, à medida que o potencial vai aumentando, a energia cinética do elétron vai diminuindo até que ele não possa mais atravessar a barreira e seja refletido. Se, no entanto, o potencial retardador for aumentando até atingir um va- lor maior do que o dobro da energia de repouso do elétron, en- tão, de acordo com a teoria de Dirac, o elétron passará a ser a- celerado e atravessará a barreira de potencial, emergindo da mes- ma com uma energia negativa. Este é o conhecido *paradoxo de Klein*, cuja solução foi dada por Dirac ao afirmar que é o antielétron que emergirá do potencial retardador.
- (13) A descoberta de uma radiação vinda do espaço exterior foi feita por Victor Francis Hess (Físico austro-norte-americano, 1883-1964; Prêmio Nobel de Física, 1936), em 1910 (R51), ao observar que e-

letroscópios carregados em balões atmosféricos eram descarregados. Mais tarde, o próprio Hess e Werner Kolhoerster (Físico austríaco, 1887-1945), faziam outras observações a respeito dessas radiações, tendo Millikan, em 1925, as denominado de raios cósmicos.

- (14) Os pósitrons são facilmente produzidos por uma reação chamada de produção de pares, na qual um fóton decai num elétron e num pósitron. A confirmação da existência dos pósitrons foi feita logo depois da descoberta de Anderson, em 1933 (R52), por Blackett e Occhialini. A reação inversa a de produção de pares, na qual um elétron e um pósitron ao colidirem, transformam-se em dois raios gama, é chamada de aniquilamento.
- (15) Veja no Apêndice deste trabalho a crônica da construção dos aceleradores e detectores de partículas.
- (16) O símbolo Bev significa um bilhão de elétron-volts ( $10^9$ ev) e é usado comumente nos Estados Unidos. Na Europa é usado o símbolo Gev (Giga elétron-volt). O *elétron-volt* significa a energia adquirida por um elétron quando acelerado pela diferença de potencial de um volt.
- (17) Segrè e C. Perrier produziram em 1937 (R53) o primeiro elemento químico artificial: o tecnécio ( $Z=43$ ). Antes, em 1925, Walter Karl Friederich Noddack (Químico alemão, 1893-1960) e Ida Eva Tacke Noddack (Química alemã, 1896- ) haviam anunciado a descoberta desse elemento, porém com o nome de *masúrio*. No entanto, mais tarde mostrou-se que houve um equívoco, pois Segrè observara que o tecnécio era instável. Em 1940 (R54), Segrè e colaboradores sintetizaram um outro elemento instável: o *astatíneo* ( $Z=85$ ), cujo nome deriva do vocábulo grego que significa instável.
- (18) Recentemente, pesquisadores do CERN conseguiram um feixe de anti-prótons por um período de 32 horas (veja *La Recherche*, 93, 894, outubro, 1978).
- (19) A primeira determinação experimental da massa de repouso do méson de Anderson foi feita em 1941 (R55), por Louis Leprince-Ringuet (Físico francês, 1901- ) e colaboradores, ao fotografarem, em uma câmara de Wilson, a colisão elástica entre um méson e um elétron em uma região onde havia um campo magnético.

- (20) Em 1937 (R56), J.C. Street e E.C. Stevenson fizeram uma observação análoga à de Anderson e Neddermeyer.
- (21) A não interação dos mésons de Anderson com núcleos foi observada, independentemente, por M. Conversi, E. Pancini, e O. Piccioni, e por E. Fermi, E. Teller e V.F. Weisskopf, em 1947 (R57;58).
- (22) Powell, em 1947, observou que a detecção de raios cósmicos altamente energéticos através de uma câmara de Wilson se tornava difícil, porque a absorção do gás, na câmara, é muito pequena. Além do mais, como a câmara só registrava eventos quando estava em expansão, muitos deles deixariam de ser registrados quando ela não estivesse mais se expandindo. Powell imaginou, então, um dispositivo em que se fotografava a partícula à medida que esta se deslocasse na câmara, atravessando sensíveis camadas de chapas fotográficas, as chamadas emulsões fotográficas, compostas de 80% de brometo de prata, com cerca de 1 mm de espessura. O empilhamento delas, além de ser facilmente transportável, permitia obter regiões sensíveis de, praticamente, qualquer dimensão.
- (23) O mecanismo principal de aceleração de raios cósmicos foi explicado por Fermi em 1949 (R59), como decorrente do choque de tais partículas com nuvens de plasma (gás de partículas carregadas e portador do campo magnético e elétrico) que se aproximam ou se afastam do feixe de raios cósmicos, acelerando ou desacelerando, respectivamente. Hoje, acredita-se que a principal fonte dessas partículas cósmicas sejam os pulsars que são estrelas constituídas principalmente por nêutrons. Os primeiros pulsars foram descobertos por Anthony Hewish (Astrônomo inglês, 1924- ; Prêmio Nobel de Física, 1974) e colaboradores, em 1968 (R60), na nebulosa de Caranguejo. Em abril de 1977, João Evangelista Steiner (Astrônomo brasileiro, 1950- ), anunciou a descoberta de um novo pulsar na constelação de Vela, o Vela X-1, usando um telescópio óptico de 50 cm. Todos os pulsars conhecidos, cerca de 150, foram descobertos com radiotelescópio. Outra possível fonte de raios cósmicos são os quasars, identificados pela primeira vez por Maarten Schmidt, em 1963 (R61), usando o radiotelescópio do Monte Palomar. Provavelmente, Martin Ryle (Astrônomo inglês, 1918- ; Prêmio Nobel de Física, 1974) e F.G. Smith, tenham feito, em 1948 (R62), a primeira observação sobre um quasar na constelação de Cassiopêia.
- (24) O primeiro "chuveiro" de partículas ("cascade shower") foi obser

vado por Blackett e Occhialini, em 1933. Ele é consequência da passagem de raios cósmicos altamente energéticos através de uma placa metálica inserida em uma câmara de Wilson, como no caso da experiência de Anderson.

- (25) A Lei de Conservação de Partículas Leves - *léptons* (ligeiro em grego)-é traduzida pela conservação de um número quântico -  $L$  -, chamado *número léptônico*. Os léptons (elêtron, muon-menos, os neutrinos associados ao elêtron e ao muon-menos e suas respectivas antipartículas) têm  $L = \pm 1$ , e as demais partículas têm  $L=0$ .
- (26) A possibilidade de que um méson  $\pi^0$  pudesse se desintegrar muito rapidamente em dois raios gama foi aventada por Oppenheimer, em 1947 (R63).
- (27) Enquanto a partícula  $\mu^-$  tem  $\mu^+$  como sua antipartícula, a antipartícula do  $\pi^+$  é o  $\pi^-$ . Na classificação atual das partículas elementares, os píons são *mésons*, enquanto que os muons são *léptons* e, embora exista o  $\pi^0$ , parece que ainda não foi descoberto o  $\mu^0$ .

## REFERENCIAS

- (R01) - Fermi, E., Amaldi, E., D'Agostino, O., Rasetti, F. and Segre, E.G., Proc. Roy. Soc. (Lond.), 146A, 483 (1934).
- (R02) - Pauli, Jr., W., *Group of Radioactivity of Tubingen*, December (unpublished) (1930).
- (R03) - Fermi, E., Z. Physik, 88, 161 (1934).
- (R04) - Hahn, O. and Strassmann, F., Naturwiss., 27, 11, 89 (1939).
- (R05) - Meitner, L. and Frisch, O.R., Nature, 143, 239 (1939).
- (R06) - Bohr, N. and Wheeler, J.A., Phys. Rev., 56, 426 (1939).
- (R07) - McMillan, E.M. and Abelson, P.H., Phys. Rev., 57, 1185 (1940).
- (R08) - Pauli, Jr., W., Zs. f. Phys., 31, 765 (1925).
- (R09) - Uhlenbeck, G.E. and Goudsmit, S.A., Naturwiss., 13, 953 (1925).
- (R10) - Cowan, C.L., Reines, F., Harrison, F.B., Kruse, H.W. and McGuire, A.D., Science, 124, 103 (1956).
- (R11) - Yang, C.N. and Lee, T.D., Phys. Rev., 104, 254 (1956).
- (R12) - Wu, C.-S., Ambler, E., Hayward, R.W., Hoppes, D.D., and Hudson, R.P., Phys. Rev., 105, 1413 (1957).
- (R13) - Dirac, P.A.M., Proc. Roy. Soc. (London), 117A, 610; 118A, 351 (1928).
- (R14) - Oppenheimer, J.R., Phys. Rev., 35, 939 (1930).
- (R15) - Anderson, C.D., Science, 76, 238; Proc. Roy. Soc. (London), 41A, 405 (1932).
- (R16) - Chamberlain, O., Segre, E., Wiegand, C.E. and Ypsilantis, T., Phys. Rev., 100, 947 (1955).
- (R17) - Cork, B., Lambertson, G.R., Piccioni, O. and Wenzel, W.A., Phys. Rev., 104, 1193 (1956).
- (R18) - Anderson, C.D. and Neddermeyer, S.H., Phys. Rev., 50, 263 (1936).
- (R19) - Marshak, R.E. and Bethe, H.A., Phys. Rev., 72, 399 (1947).
- (R20) - Lattes, C.M.G., Muirhead, H., Occhialini, G.P.S. and Powell, C.F., Nature, 159, 694; (see Muirhead), 160, 453, 486 (1947).
- (R21) - Danby, G., Gaillard, J.-M., Goulianos, K., Lederman, L.M., Mistry, N., Schwartz, M., and Steinberg, J., Phys. Rev. Lett., 9, 36 (1962).
- (R22) - Bernardini, G., Bienlein, J.K., von Dardel, G., Faissner, H., Ferrero, F., Gaillard, J.-M., Gerber, H.J., Hahn, B., Kaftanov, V., Krienen, F., Manfredotti, C., Reinharz, M. and Salmeron, R. A., Phys. Lett., 13, 86 (1964).
- (R23) - Bienlein, J.K., Bohm, A., von Dardel, G., Faissner, H., Ferrero, F., Gaillard, J.-M., Gerber, H.J., Hahn, B., Kaftanov, V., Krienen, F., Reinharz, M., Salmeron, R.A., Seiler, P.G., Staude, A., Stein, J. and Steiner, H.J., Phys. Lett., 13, 80 (1964).
- (R24) - Gardner, E. and Lattes, C.M.G., Science, 107, 270 (1948).

- (R25) - Bjorklund, R.F., Crandall, W.E., Moyer, B.J. and York, H.F., Phys. Rev., 77, 213 (1950).
- (R26) - Panofsky, W.K.H., Aamodt, R.L. and York, H.F., Phys. Rev., 78, 825 (1950).
- (R27) - Yang, C.N. and Tiomno, J., Phys. Rev., 79, 495 (1950).
- (R28) - Snell, A.H., Pleasonton, F. and McCord, R.V., Phys. Rev., 78, 310 (1950).
- (R29) - Robson, J.M., Phys. Rev., 78, 311 (1950).
- (R30) - Seaborg, G.T., McMillan, E.M., Kennedy, J.W., and Wahl, A.C., Phys. Rev., 69, 366 (1946).
- (R31) - Seaborg, G.T., James, Morgen., and Ghiorso, A., Nat. Nucl., Energy Serv., Papers numbers 22.1, 22.2 (1944).
- (R32) - Thompson, S.G., Ghiorso, A. and Seaborg, G.T., Phys. Rev., 80, 781 (1950).
- (R33) - Thompson, S.G., Street, Jr., K., Ghiorso, A. and Seaborg, G. T., Phys. Rev., 80, 790 (1950).
- (R34) - Ghiorso, A., Harvey, B.G., Choppin, G.R., Thompson, S. G., and Seaborg, G.T., Phys. Rev., 98, 1518 (1955).
- (R35) - Studier, M.H., Fields, P.R., Diamond, H., Mech, J.F., Friedman, A. M., Sellers, P.A., Pyle, G., Stevens, C.M., Magnusson, L. B. and Huizenga, J.R., Phys. Rev., 93, 142 (1954).
- (R36) - Fields, P.R., Friedman, A.M., Milsted, J., Atterling, H., Forsling, W., Holm, L.W. and Astrom, B., Phys. Rev., 107, 1460 (1957).
- (R37) - Ghiorso, A., Sikkeland, T., Larsh, A.E. and Latimer, R.M., Phys. Rev. Lett., 6, 473 (1961).
- (R38) - Gentry, R.V., Cahill, T.A., Fletcher, N.R., Kaufmann, H.C., Medsker, L.R., Nelson, J.W. and Flocchini, R.G., Phys. Rev. Lett., 27, 11 (1976).
- (R39) - Harvey, B.G., Herrmann, G., Hoft, R.W., Hoffman, D.C., Hyde, E.K., Katz, J.J., Keller, Jr., O.L., Lefort, M. and Seaborg, G.T., Science, 193, 1271 (1976).
- (R40) - Sparks, C.J., Raman, S., Ricci, E., Gentry, R.V., and Krause, M.O., Phys. Rev. Lett., 40, 507 (1978).
- (R41) - Reines, F. and Cowan, C.L., Phys. Rev., 92, 830 (1953).
- (R42) - Gamow, G. and Schenberg, M., Phys. Rev., 59, 539 (1941).
- (R43) - Chase, C.T., Phys. Rev., 36, 984, 1060 (1930).
- (R44) - Pontecorvo, B., Soviet Phys., JEPT, 10, 306 (1960).
- (R45) - Schwartz, M., Phys. Rev. Lett., 4, 306 (1960).
- (R46) - Einstein, A., Ann. der Phys., 17, 132 (1905).
- (R47) - Schrodinger, E., Ann. Physik, 79, 361, 489; 80, 437; 81, 109 (1926).
- (R48) - Pauli, Jr., W., Zs. f. Physik, 43, 601 (1927).
- (R49) - Darwin, C.G., Proc. Roy. Soc. (London), 116A, 227 (1927).

- (R50) - Klein, O., Zs. f. Phys., 53, 157 (1929).
- (R51) - Hess, V.F., Akad. Wiss. Wien. Sitz., 119, 145 (1910).
- (R52) - Blackett, P.M.S. and Occhialini, G.P.S., Proc. Roy. Soc. (London), 139A, 699 (1933).
- (R53) - Perrier, C. and Segre, E., Accad. Lincei., 25, 723 (1937).
- (R54) - Corson, D.R., Mackensie, K.R. and Segre, E., Phys. Rev., 58, 672 (1940).
- (R55) - Leprince-Ringuet, L., Gorodetsky, S., Nageotte, E. and Richerd-Foy, R., Phys. Rev., 59, 460 (1941).
- (R56) - Street, J.C. and Stevenson, E.C., Phys. Rev., 52, 1003 (1937).
- (R57) - Conversi, M., Pancini, E. and Piccioni, O., Phys. Rev., 71, 209 (1947).
- (R58) - Fermi, E., Teller, E. and Weisskopf, V.F., Phys. Rev., 71, 314 (1947).
- (R59) - Fermi, E., Phys. Rev., 75, 1169 (1949).
- (R60) - Hewish, A., Bell, S.T., Pilkington, J.D.H., Scott, P. F., and Collins, R.A., Nature, 217, 709 (1968).
- (R61) - Schmidt, M., Nature, 197, 1040 (1963).
- (R62) - Ryle, M. and Smith, F.G., Nature, 162, 462 (1948).
- (R63) - Oppenheimer, J.R., Phys. Rev., 71, 462 (1947).