

# A interação eletrofraca e a bioquímica quiral\*

(The electroweak interaction and the chiral biochemistry)

José Maria Filardo Bassalo

*Departamento de Física, Universidade Federal do Pará  
66075-900, Belém, PA, Brasil*

Mauro Sérgio Dorsa Cattani

*Instituto de Física, Universidade de São Paulo  
Caixa Postal 66318, 05389-970, São Paulo, Brasil*

Trabalho recebido em 10 de março de 1995

## Resumo

Neste trabalho vamos mostrar como evoluiu historicamente o conceito de força eletrofraca e como esta explica a quiralidade dos átomos e moléculas.

## Abstract

In this work we show as the concept of electroweak force evolved historically and as this explains the chirality of atoms and molecules.

Em 1844, experiências realizadas pelo químico alemão Eilhardt Mitscherlich (1794- 1863) demonstraram que enquanto os cristais de sal de ácido tartárico comercial ( $C_4H_6O_6$  - ácido obtido dos **tártaros** - depósitos que se formam na fermentação da uva) apresentavam atividade óptica, isto é, giravam o plano de polarização da luz que os atravessava, o mesmo não acontecia com os cristais do ácido racêmico (da palavra latina **racemus**, que significa uva), ácido até então desconhecido e que havia sido descoberto, também nos tártaros (daí esse ácido ser ainda conhecido como paratartárico) dos processos industriais vinícolas na região de Alsácia<sup>[1]</sup>. Tais resultados se constituíam num enigma, uma vez que esses ácidos além de apresentarem composições químicas idênticas tinham a mesma estrutura, isto é, eram isômeros<sup>[2]</sup>.

Esse enigma foi resolvido pelo químico francês Louis Pasteur (1822-1895) ao estudar, entre 1848 e 1850,<sup>[3]</sup> cristais desses ácidos, principalmente o racêmico, com

o auxílio de um microscópio. Com efeito, ao observar os cristais do ácido racêmico, Pasteur verificou haver dois tipos deles, sendo um a imagem em espelho (especular) do outro. Esse famoso cientista obteve tais cristais a partir de uma solução que não girava o plano de polarização da luz que incidia sobre os mesmos e, imediatamente, imaginou ser a mistura dos dois tipos de cristais a explicação da inatividade óptica observada. Com a ajuda de pinças, separou, cuidadosamente, os cristais em dois montículos e, ao passar novamente a luz polarizada através dos mesmos, percebeu que um deles girava o plano de polarização da luz em sentido horário e o outro em sentido anti-horário<sup>[4]</sup>. Observou ainda ser uma das duas formas do ácido racêmico idêntica ao ácido tartárico. Em vista disso, classificou as moléculas que compunham os cristais estudados em dois tipos: **mão-direita (levógira)** e **mão-esquerda (dextrógira)**<sup>[5]</sup>.

No prosseguimento de suas pesquisas com o ácido

\*Este artigo é em homenagem ao centenário de morte de Pasteur.

racêmico, Pasteur observou, em dezembro de 1857, que na fermentação do paratartarato de amônia, o polarímetro utilizado indicava haver um aumento da atividade óptica dos cristais de mão esquerda, sendo que os de mão direita foram atacados durante a fermentação. Em vista disso, Pasteur ligou essa ação discriminatória com a necessidade nutricional dos microorganismos vivos e, desse modo, descobriu um novo método (biológico ou fisiológico) para separar os cristais do ácido racêmico. Mais tarde, em 1860<sup>[6]</sup>, Pasteur mostrou que um microorganismo específico, o fungo **penicillium glaucum**, metabolizava seletivamente os cristais de mão direita de uma solução de paratartarato de amônia. Com base nessas experiências, Pasteur reforçou sua teoria da assimetria molecular, pela qual as propriedades biológicas das substâncias químicas não dependiam somente da natureza dos átomos que constituem suas moléculas, mas, também, da maneira como esses átomos se arranjam no espaço. Por outro lado, as relações observadas por Pasteur entre a assimetria molecular e os microorganismos, convenceram-no de que a química da vida apresentava uma preferência pela quiralidade de certas moléculas, e que, portanto, havia uma distinção clara entre matéria viva e matéria morta. Essa convicção o levou a apresentar perante a Academia Francesa de Ciências sua célebre conjectura: - "O Universo é dissimétrico"<sup>[7]</sup>.

Com o decorrer dos anos a conjectura de Pasteur mostrou-se ser verdadeira e, neste século, o desenvolvimento da ciência tem revelado que essa assimetria do Universo ocorre em todos os níveis, do microscópico ao macroscópico, sobretudo no que se refere à química da vida. Com efeito, formas enantioméricas de moléculas foram encontradas em muitas substâncias orgânicas e inorgânicas e, principalmente, em todas as moléculas cruciais para o desenvolvimento da vida, como as moléculas de DNA (ácido desoxirribonucléico) e RNA (ácido ribonucléico), as quais carregam a informação genética, bem como nas proteínas que são responsáveis pela estrutura e regulação química das células vivas. Com relação a essas formas enantioméricas, existem aspectos interessantes que é oportuno relatar. Por exemplo, apenas os D - enantiômeros de açúcar

estão presentes nos ácidos nucléicos DNA e RNA. Por outro lado, embora existam centenas de aminoácidos na Natureza, apenas cerca de 20 deles compõem as proteínas<sup>[8]</sup>. Contudo, embora esses aminoácidos existam nas formas enantioméricas L e D (com exceção da Glicina), apenas os L - aminoácidos são encontrados nas proteínas<sup>[9]</sup>.

Vimos acima, haver preferência da bioquímica terrestre por certas formas enantioméricas de moléculas sobre suas correspondentes imagens especulares. Contudo, esse fato intrigou os cientistas por algum tempo, uma vez que as reações químicas são consequência da interação (força) eletromagnética entre os átomos, e esta é um tipo de interação que conserva a paridade<sup>[10]</sup>, ou seja, qualquer processo resultante dessa interação e sua imagem especular tem a mesma probabilidade de ocorrer. Em vista disso, era de se esperar que o mundo fosse habitado por igual número de enantiômeros, tipos L e D<sup>[11]</sup>.

Essa questão intrigante começou a ser compreendida a partir da década de 1930. Vejamos como. Para entender o decaimento  $\beta$ <sup>[12]</sup> o físico italo-norte-americano Enrico Fermi (1901-1954; PNF, 1938), em 1934, tomando como modelo a Eletrodinâmica Quântica (**Quantum Electrodynamics - QED**) (que havia sido formulada pelo físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933), em 1927<sup>[13]</sup>), sugeriu que nesse tipo de decaimento um nêutron ( $n$ ) se transformava em um próton ( $p$ ), emitindo um elétron ( $e^-$ ) e um neutrino ( $\nu$ )<sup>[14]</sup>, por intermédio de um processo físico mais tarde denominado de **força fraca** ou interação de Fermi. Ainda na década de 1930, houve uma nova tentativa de aplicar a QED no sentido de explicar a interação (força) fraca. Desta vez, em 1938, o físico sueco Oskar Benjamin Klein (1897-1977) sugeriu que bósons<sup>[15]</sup> vetoriais carregados e massivos, aos quais denominou de  $W$ , seriam mediadores dessa interação. Portanto, para esse físico, o decaimento  $\beta$  seria dado por:  $n \rightarrow p + W^-$ , com  $W^- \rightarrow e^- + \nu$ , sendo a constante de acoplamento para tais processos, o mesmo da força eletromagnética, isto é, a **constante de estrutura fina**  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$  (no sistema CGS)<sup>[16]</sup>.

A interação de Fermi foi novamente utilizada na

década de 1940 para poder entender resultados intrigantes observados em experiências envolvendo raios cósmicos, realizadas em 1947, pelo Grupo de Bristol<sup>[17]</sup>. Nessas experiências, ficou evidenciado que os mésons  $\pi$  e  $\mu$  eram partículas distintas. Em vista disso, físicos teóricos e experimentais passaram a realizar trabalhos no sentido de confirmar essa evidência, bem como a de verificar se o méson  $\mu$  sofria uma interação análoga à interação fraca de Fermi, isto é:  $\mu^- + p \rightarrow n + \nu$ , segundo a proposta do físico italo-inglês-russo Bruno M. Pontecorvo (1913-1993), feita também em 1947. Para poder explicar esses dois tipos de interação de Fermi envolvendo quatro partículas ( $e^- + p \rightarrow n + \nu$ ;  $\mu^- + p \rightarrow n + \nu$ ), entre 1948 e 1950, foi formulada a chamada **Interação Universal de Fermi - IUF** baseada na QED<sup>[18]</sup>. Contudo, essa teoria só foi realmente universalizada com a descoberta da não-conservação da paridade nas interações fracas, por Lee e Yang, em 1956<sup>[19]</sup> e sua inclusão na mesma, graças à **Teoria V - A** desenvolvida pelos físicos norte-americanos Richard Philips Feynman (1918-1988; PNF, 1965) e Murray Gell-Mann (1929- ; PNF, 1969), em 1958<sup>[20]</sup>.

A teoria V - A vista acima, apresentou desdobramentos importantes. Por exemplo, nessa teoria, Feynman e Gell-Mann sugeriram que essa interação poderia ser devida à troca de bósons virtuais ( $W^\pm$ ) com spin 1. Ideias semelhantes a essa foram apresentadas, ainda em 1958, pelos físicos norte-americanos Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNF, 1965) e Sheldon Lee Glashow (1932- ; PNF, 1979), e pelo físico brasileiro José Leite Lopes (1918- ). Nesses trabalhos, há a proposta de que os bósons vetoriais carregados  $W^\pm$  e os fótons  $\gamma$  (também bósons vetoriais descarregados e mediadores da interação eletromagnética) deveriam pertencer à mesma família e, em consequência, as constantes de acoplamento dessas duas interações (fraca e eletromagnética) deveriam ser iguais. Leite Lopes propôs ainda a possibilidade de existirem interações fracas entre correntes neutras, devidas a bósons vetoriais neutros, com massa próxima à dos carregados, estimada por ele em  $\simeq 60 m_p$ .<sup>[21]</sup>

A unificação das forças eletromagnética e fraca, implícita nos trabalhos de Klein, Leite Lopes, Schwinger e

Glashow foi finalmente formalizada em 1967, pelo físico norte-americano Steven Weinberg (1933- ; PNF, 1979) e, independentemente, em 1968, pelo físico paquistanês Abdus Salam (1926- ; PNF, 1979) - a hoje famosa **Teoria Eletrofraca**. Segundo essa teoria, a **força eletrofraca** é mediada por quatro **quanta**: o fóton ( $\gamma$ ), partícula não-massiva e mediadora da interação eletromagnética, e os bósons vetoriais massivos ( $W^\pm, Z^0$ ) (este último nome foi dado Weinberg), de massas respectivas: 75 e 95  $m_p$ . Essa unificação é baseada em uma **teoria de gauge** proposta por Yang e R. L. Mills em 1954 e, independentemente, por R. Shaw, em 1955, através de um mecanismo chamado de quebra espontânea de simetria, associada com o **mecanismo de Higgs**<sup>[22]</sup>. Nessa teoria de Salam-Weinberg, inicialmente as partículas  $W^\pm, Z^0$  e  $\gamma$  têm massa nula e estão sujeitas à simetria 'gauge'. No entanto, por intermédio do mecanismo de Higgs (do qual participam o **dubleto Higgs** ( $H^+, H^0$ ) e seu antidubleto ( $H^-, \bar{H}^0$ )), há a quebra espontânea dessa simetria, ocasião em que o fóton permanece com massa nula, mas os  $W^\pm$  adquirem massas por incorporação dos bósons  $H^\pm$ , ao passo que  $Z^0$  adquire massa de uma parte dos bósons neutros ( $H^0, \bar{H}^0$ ), ficando a outra parte como uma partícula a ser detectada - o famoso **bóson de Higgs** (de spin 0) -, cuja massa não é prevista por essa teoria e que, até o presente momento (Setembro de 1995), ainda não foi detectada<sup>[23]</sup>.

Muito embora uma partícula em repouso (por exemplo, um elétron) seja esfericamente simétrica ou aquiral, o mesmo não acontece quando aquela se encontra em movimento, conforme a teoria de Salam-Weinberg vista acima. Segundo esta teoria, como a força eletrofraca não conserva a paridade, ela é capaz de distinguir entre direita e esquerda através das chamadas "correntes carregadas fracas" (que envolve as partículas  $W^\pm$ ) e "correntes neutras fracas" (que envolve as partículas  $Z^0$ ). No entanto, enquanto fenômenos envolvendo as correntes carregadas fracas já eram conhecidos à época daquela teoria, como é o caso do decaimento  $\beta$ <sup>[24]</sup>, o mesmo não acontecia com fenômenos envolvendo correntes neutras fracas, pois destas não havia evidência experimental nenhuma. Em vista disso, especulava-se

que no átomo se poderia detectar a força fraca com corrente neutra, uma vez que o núcleo carregado positivamente, além de uma força eletromagnética, poderia exercer sobre um elétron da eletrosfera uma força fraca. Este seria um tipo de fenômeno envolvendo corrente neutra fraca, pois tanto o núcleo quanto o elétron permaneceriam com a mesma carga elétrica, após trocaram a partícula neutra  $Z^0$  [25].

Como o alcance da força fraca é muito curto, isto é:  $r \approx 2 \times 10^{-18}$  m (cerca de  $10^{-7}$  das dimensões atômicas)<sup>[26]</sup>, poderia ocorrer a troca de um méson  $Z^0$  entre os nucleons e os elétrons da última camada eletrônica que está em contacto com o núcleo. Com o aparecimento das primeiras evidências da corrente neutra fraca, em 1973<sup>[27]</sup>, os físicos franceses Marie-Anne Bouchiat e Claude C. Bouchiat, em 1974<sup>[28]</sup>, começaram a analisar, sob o ponto de vista teórico, os efeitos da corrente neutra fraca em átomos. Desse modo, de acordo com a previsão desses pesquisadores, ocorreria uma pequena violação da paridade na absorção de luz pelos átomos, principalmente os pesados, pois demonstraram que aqueles efeitos seriam proporcionais a  $Z^5$ <sup>[29]</sup> onde  $Z$  é o número de prótons do núcleo. Em vista disso, várias experiências foram idealizadas com o objetivo de observar a quebra de paridade utilizando átomos pesados. Entretanto, como esses efeitos eram muito pequenos, as dificuldades experimentais eram enormes, razão pela qual somente vários anos mais tarde ocorreu a comprovação de tais efeitos<sup>[30]</sup>. Essas experiências, muito refinadas e precisas, apesar de serem realizadas em baixas energias, comprovaram, também, a teoria de unificação das interações eletromagnética e fraca, uma vez que tal unificação havia sido observada apenas nos grandes aceleradores onde estão em jogo altas energias. Aliás, é oportuno registrar que a quiralidade do átomo de Hidrogênio em consequência da força eletrofraca, foi apresentada de maneira pictórica em um interessante trabalho realizado por Hegstrom et al., em 1988<sup>[31]</sup>. Por outro lado, muitos trabalhos foram realizados no sentido de estudar o efeito da corrente neutra fraca em moléculas<sup>[32]</sup>. Assim, alguns cálculos mostram que devido à interação fraca a energia de uma molécula numa configuração

levógira é diferente da energia da mesma configuração dextrógira. Por exemplo, alguns L - aminoácidos e D - açúcares teriam energias menores que as suas respectivas formas dextrógiras e levógiras. De acordo com esses cálculos, as diferenças de energia são extremamente pequenas, estando entre  $10^{-17}$  kT e  $10^{-14}$  kT, onde  $k$  é a constante de Boltzmann e  $T = 300$  K (K = graus kelvin)<sup>[33]</sup>.

Como dissemos logo no início deste artigo, as proteínas são compostas somente de L - aminoácidos e os ácidos nucleicos contêm somente D - açúcares. Em vista disso, muitos mecanismos foram propostos, sem muito sucesso, para explicar essa seleção natural dos L - aminoácidos e D - açúcares<sup>[34]</sup>. Por outro lado, para explicar essa mesma seleção natural, modelos teóricos de reações químicas também foram propostos onde estão presentes reações de auto-catálise e inibição mútua, surgindo, contudo, efeitos não-lineares na dinâmica química dessas reações<sup>[35]</sup>. No entanto, para explicar essas dificuldades, Kondepudi e Nelson, em 1984<sup>[36]</sup>, consideraram o efeito das correntes neutras fracas num esquema (teórico) de reações químicas (fora do equilíbrio termodinâmico) onde aparecem aqueles efeitos não-lineares. Desses trabalhos, ficou claro que a pequena diferença de energia entre os enantiômeros, devido a interação fraca, é suficiente para quebrar a simetria quiral da sequência de reações racêmicas. Registre-se, também, que no trabalho de Hegstrom e Kondepudi citado na nota (1), eles demonstraram que se as reações químicas ocorrem em um sistema onde as perturbações são pequenas<sup>[37]</sup>, a produção do enantiômero de menor energia seria amplificada, pois as forças fracas favoreceriam esse mesmo enantiômero. Assim, a vida quiralmente assimétrica, tal como a conhecemos, poderia se desenvolver em tais sistemas químicos. É interessante observar que a explicação da bioquímica da vida por intermédio da força eletrofraca, levou Salam à seguinte frase: "Existe uma certeza cada vez maior de que a força eletrofraca é a verdadeira força da vida e que Deus criou a partícula  $Z^0$  para fornecer a quiralidade às moléculas da vida"<sup>[38]</sup>. Contudo, e na conclusão deste artigo, devemos ressaltar que as reações químicas propostas por Kondepudi e Nelson nunca foram, até o

presente momento, reproduzidas em laboratório, e que a transição da química racêmica para a bioquímica homóquiral é um dos maiores problemas enfrentados pela biofísica atual.

#### Notas e referências bibliográficas

1. ASIMOV, I. 1974. *Os Gênios da Humanidade*. Bloch Editores, S. A.; GELSON, G. L. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 10. Charles Scribner's Sons; HEGSTROM, R. A. and KONDEPUDI, D. K. 1990. *Scientific American*, January: 98; NICOLLE, J. M. R. 1988. *Encyclopaedia Britannica*. Macropaedia, Volume 25. The University of Chicago; *Os Cientistas*, Volume 2. Abril Cultural, 1972.
2. Hoje, os isômeros chamam-se de **enantiômeros**, conforme veremos mais adiante.
3. PASTEUR, L. 1848. *Ann. de Chim. et de Phys.*, 23: 267; 24: 442; 1850. *Ann. de Chim. et de Phys.*, 28: 56.
4. Nessa época, a rotação do plano de polarização da luz era facilmente mensurável, graças ao prisma de Nicol (dois cristais de espató-da-Islandia colados com bálsamo-do-canadá), que havia sido inventado pelo físico escocês William Nicol (1768-1851), em 1828. (ASIMOV, op. cit.)
5. Hoje, essas moléculas conhecidas como **quirais** (da palavra grega *kheir*, que significa mão) são denominadas de **enantiômeras** e são de dois tipos: **L - enantiômera** (L de levógira) e **D - enantiômera** (D de dextrógira). Essas moléculas possuem a propriedade de que não pode haver superposição entre sua representação estrutural e a respectiva imagem especular. Aliás, registre-se que o nome **quiralidade** foi dado pelo físico escocês William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907), em 1884. (SINGH, J. 1992. *Abdus Salam: A Biography*, Penguin Books.)
6. PASTEUR, L. 1860. *Comp. rend.*, 51: 298.
7. HEGSTROM and KONDEPUDI, op. cit.
8. Esses 20 aminoácidos são os seguintes: Alanina, Serina, Acido aspártico, Valina, Treonina, Arginina, Acido glutâmico, Leucina, Cisteína, Histidina, Lisina, Isoleucina, Tirosina, Asparagina, Metionina, Prolina, Triptofano, Fenilalanina, Glutamina e Glicina. Para maiores detalhes sobre esses aminoácidos, inclusive a sua estrutura molecular, veja-se: GRIBBIN, J. 1989. **A Procura da Dupla Hélice: A Física Quântica e a Vida**. Editorial Presença.
9. É oportuno registrar que graças à quiralidade das moléculas enantioméricas, foi possível explicar o famoso caso da **talidomida** - um composto usado para cura do enjoo matinal das gestantes -, ou seja, de que seu uso provocou o nascimento de milhares de crianças deformadas, na Alemanha e na Inglaterra, entre 1959 e 1962. Infelizmente, somente estudos posteriores vieram explicar essa desgraça quando foi demonstrado que enquanto a forma D - enantiomérica dessa droga curava o enjoo, a L - enantiomérica provocava os defeitos nos fetos. A compreensão da sensibilidade enantiomérica da talidomida permite que a mesma seja usada hoje, com sucesso, na cura da lepra. Essa mesma sensibilidade explica, também, outros casos interessantes. Por exemplo, o composto **limonena** ( $C_{10}H_{16}$ ), em suas duas formas enantioméricas (L e D), é responsável pelos gostos (ácido e açucarado) dos frutos cítricos (limão e laranja, respectivamente), bem como é bastante utilizado na indústria dos perfumes. Por outro lado, a eficácia da penicilina (descoberta em 1928) contra as bactérias resulta do fato de que estas, excepcionalmente, utilizam D - aminoácidos na construção das suas paredes celulares, e a **penicilina** contém um grupo de também L - aminoácidos e interfere com a síntese das paredes celulares das bactérias. (SALAM, A. 1991. IN: **Em Busca da Unificação**. Gradiva; *ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA*. Micropaedia, Volumes 7 e 11. University of Chicago, 1988; HEGSTROM and KONDEPUDI, op. cit.)
10. A paridade é um tipo de simetria proposta pelo físico húngaro-norte-americano Eugene Paul Wigner (1902- ; PNF, 1963), em 1927, ao aplicar

- os invariantes do Grupo de Reflexões à equação de Schrodinger, e significa trocar  $\vec{r}$  por  $-\vec{r}$  nessa equação. (CARUSO, F. e PIMENTEL, B. 1995. **Simetria e Física das Partículas**, LISHEP 95.)
11. HEGSTROM and KONDEPUDI, op cit.
  12. Desde 1900, era conhecido que um determinado núcleo A emitia a partícula  $\beta$  (elétron) e se transformava em um outro núcleo B. No entanto, na década de 1920 desenvolveu-se uma questão polêmica relacionada à energia dessas partículas, uma vez que era observado experimentalmente que a conservação da energia não era satisfeita no balanço energético envolvendo o elétron e os núcleos A e B. Em vista disso, o físico austríaco Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945) postulou, em 1930, a existência de uma partícula neutra que era emitida junto com o elétron pelo núcleo radioativo. (BASSALO, J. M. F. 1994. **Crônicas da Física**, Tomo 4. EDUFPA. Neste livro, encontram-se as referências não indicadas neste artigo.)
  13. O desenvolvimento posterior da QED mostrou que a força entre cargas elétricas (por exemplo, elétron e próton, no átomo de Hidrogênio) se dá pela troca de fótons  $\gamma$  (o quantum do campo eletromagnético) virtuais entre elas. (BASSALO, op. cit.)
  14. Assim, segundo Fermi, o decaimento  $\beta$  é dado por:  $n \rightarrow p + e^- + \nu$ . Mais tarde, mostrou-se que o neutrino (nome dado por Fermi) envolvido nesse tipo de decaimento é o antineutrino eletrônico ( $\bar{\nu}_e$ ). (BASSALO, op. cit.)
  15. Os bósons são partículas que possuem spin inteiro e obedecem à estatística de Bose-Einstein. Esta foi desenvolvida, em 1924, em trabalhos distintos realizados pelos físicos, o indiano Satyendra Nath Bose (1894-1974) e o germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921). (WHITTAKER, E. 1953. **A History of the Theories of Aether and Electricity: The Modern Theories** Thomas Nelson and Sons Ltd.)
  16. Essa igualdade indicava uma unificação entre as forças fraca e eletromagnética. Em virtude do curto-alcance da força fraca, Klein chegou a prever que  $m_W \simeq 100m_p$  ( $m_p$  = massa do próton  $\simeq 1 \text{ GeV}/c^2$ ). Essa questão da unificação voltou a ser discutida mais tarde, conforme veremos mais adiante.
  17. O Grupo de Bristol (constituído pelos físicos, os ingleses Sir Cecil Frank Powell (1903- 1969; PNF, 1950) e Hugh Muirhead, o brasileiro (César Mansuetto Guilio Lattes (1924- ) e o italiano Giuseppe Pablo (Peppillo (?) Stanislaw (Sommerfeld (?) Occhialini (1907- 1993)), após examinar ao microscópio emulsões nucleares expostas a incidência de raios cósmicos, em Pic du Midi (Pirineus, França) e em Chacaltaya nos Andes bolivianos, concluiu que a colisão desses raios com núcleos de Oxigênio e Nitrogênio da atmosfera terrestre produzia dois tipos de mésons, inicialmente chamados de **mésons primários** e **mésons secundários** e, posteriormente, de **méson  $\pi$**  (hoje, **píon**) e **méson  $\mu$**  (hoje, muon). Esse grupo de cientistas do **H. H. Wills Physical Laboratory** da Universidade de Bristol, Inglaterra, confirmou a experiência realizada pelo físico italiano Marcello Conversi (1917-1988), Ettore Pancini ( )-1981) e Oreste Piccioni (1915- ), ainda em 1947. (BROWN, L. M. and HODDESON, L. (Editors) 1986. **The Birth of Particle Physics**. Cambridge University Press.)
  18. Nessa IUF, a idéia fundamental foi a de considerar as quatro partículas envolvidas como tendo spin  $\frac{1}{2}$ , segundo os trabalhos dos físicos, o sueco Klein, em 1948; o italiano G. Puppi, ainda em 1948; o norte-americano John Archibald Wheeler (1911- ) e o brasileiro Jayme Tiomno (1920- ), também em 1948; os sino-norte-americanos Tsung-Dao Lee (1926- ; PNF, 1957) e Chen Ning Yang (1922- ; PNF, 1957), em 1949; e Tiomno e Yang, em 1950. Aliás, foi neste último trabalho que foi cunhado o termo **Interação Universal de Fermi**. (BASSALO, op. cit.)
  19. A violação da paridade nas interações fracas sugerida teoricamente por Lee e Yang foi observada

- logo em 1957 em três experiências distintas. A mais conhecida delas foi realizada por C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes e R. P. Hudson ao examinarem a distribuição de elétrons emitidos por decaimento  $\beta$  numa reação do tipo:  ${}_{27}\text{Co}^{60} \rightarrow {}_{28}\text{Ni}^{60} + e^- + \bar{\nu}_e$ . O resultado dessa experiência foi a constatação de uma assimetria naquela distribuição (em relação ao spin do núcleo) indicando que a paridade não era conservada. As outras duas experiências relacionavam-se com o decaimento de pions e de muons e foram realizadas, respectivamente, por L. M. Lederman, R. L. Garwin e M. Weinrich, e por J. I. Friedman e V. L. Teledgi. (BASSALO, op. cit.)
20. É oportuno registrar que Tiomno, em 1955, propôs que as possíveis formas da IUF podiam ser de dois tipos: V - A (Vector - Axial) e S + P - T (Scalar + Pseudoscalar - Tensor), com conservação de paridade. No entanto, em 1958, no **California Institute of Technology - CALTECH**, Feynman e Gell-Mann ao discutirem com H. Jensen, A. H. Wapstra e F. Boehm experiências envolvendo interação fraca chegaram à conclusão de que as mesmas seriam explicadas por uma teoria V - A com violação da paridade. (BASSALO, op. cit.)
21. LEITE LÓPES, J. 1977. **Introducción a la Electrodinámica Quántica**. Editorial Trillas; LEITE LOPES, J. et ESCOUBÉS, B. 1995. **Sources et évolution de la physique quantique**. Masson, Paris.
22. A teoria de Yang-Mills-Shaw (YMS) apresentava uma grande dificuldade, já que era não-renormalizável para bósons massivos e, portanto, não poderia descrever as interações fracas, pois estas são mediadas por bósons massivos, conforme já vimos. (Não-renormalizável significava que os infinitos aparecidos no cálculo de alguns parâmetros físicos não poderiam ser compensados, como acontecia na QED renormalizada, graças aos trabalhos independentes de Feynman, Schwinger, e do físico japonês Sin-Itiro Tomonaga (1979-1979; PNF, 1965), realizados em 1947-1948.) Uma primeira tentativa para tratar bósons massivos com a teoria de YMS foi realizada, em 1964, em trabalhos independentes de P. W. Higgs, de F. Englert e R. Brout, e de G. S. Guralnik, C. R. Hagen e T. W. B. Kibble. Assim, utilizando o conceito de **quebra espontânea de simetria** considerado por G. Goldstone, em 1961, aqueles trabalhos demonstraram que bósons não-massivos tornam-se massivos quando há quebra da simetria 'gauge'. Contudo, esse mecanismo - que ficou conhecido na literatura mundial como **mecanismo de Higgs** - não perdia o caráter de renormalizabilidade daqueles bósons. Essa renormalizabilidade foi demonstrada rigorosamente, em 1972, em trabalhos independentes de Benjamin W. Lee; de Lee e J. Zinn-Justin; de G. W. 't Hooft e M. Veltman e dos físicos argentinos Carlos Guido Bollini (1926- ) e Juan José Giambiagi (1925- ). (BASSALO, op. cit.; SALAM, op. cit.)
23. As partículas  $W^\pm$  e  $Z^0$  foram descobertas em 1983 em experiências realizadas no **Centre Européen de Recherches Nucléaires - CERN**, sob a liderança do físico italiano Carlo Rubbia (1934- ; PNF, 1984) e do engenheiro holandês Simon van der Meer (1925- ; PNF, 1984), com as massas respectivas da ordem de 80 e 90  $m_p$ , respectivamente, ao estudarem a colisão próton (p)-antipróton ( $\bar{p}$ ), no **Supersynchrotron proton antiproton - Sp $\bar{p}$ P**, daquele laboratório. (BASSALO, op. cit.; SALAM, op. cit.)
24. A posterior análise do decaimento  $\beta$  por intermédio da teoria de Salam-Weinberg indicou que apenas elétrons de mão-esquerda e antineutrinos eletrônicos de mão-direita estão presentes nesse tipo de decaimento, uma vez que segundo essa teoria, somente esses tipos de partículas quirais "sentem" a presença de W. O mesmo não ocorre para os elétrons de mão-direita e os antineutrinos eletrônicos de mão-esquerda que não "sentem" a presença de W. Porque a Natureza escolhe esses tipos de partículas quirais, ainda é um problema em aberto. Esclareça-se que uma partícula em movimento e dotada de spin é dita de **mão-esquerda** quando o polegar da mão esquerda aponta na

direção de seu movimento e o sentido dos dedos dobrados indica a rotação spinorial dessa mesma partícula, isto é, quando o seu spin ( $\vec{s}$ ) aponta na direção contrária ao de seu momento linear ( $\vec{p}$ ). Uma analogia com a mão direita confere o significado da partícula de **mão-direita**. (HEGSTROM and KONDEPUDI, op. cit.)

25. Os primeiros trabalhos feitos no sentido de calcular a força fraca entre elétrons e núcleos em átomos e moléculas já haviam sido realizados por Ya. B. Zeldovich, em 1959 (*Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, **36**: 964) e por F. Curtis-Michel, em 1965 (*Phys. Rev.*, **138B**: 408). Neste último trabalho, o autor apresenta a forma do potencial da força fraca, com violação de paridade, em baixas-energias:

$$V_{v.p.} = \frac{G_F}{4\sqrt{2}m_e} (\vec{\sigma}_e \cdot \vec{p} \delta^3(\vec{r}) + \delta^3(\vec{r}) \vec{\sigma}_e \cdot \vec{p}) Q_W(Z, N) + \text{termos envolvendo } \vec{\sigma}_p \text{ e } \vec{\sigma}_n,$$

onde  $m_e$ ,  $\frac{1}{2}\vec{\sigma}_e$ ,  $\vec{p}$ ,  $\vec{r}$  são, respectivamente, a massa, o spin, o momento linear e a posição do elétron, enquanto  $\vec{\sigma}_p$  e  $\vec{\sigma}_n$  representam o spin do próton e o spin do nêutron. Ainda nessa expressão,  $G_F = 2.19 \times 10^{-14}$  u.a. é a constante de acoplamento da interação de Fermi e  $Q_W$  é a constante efetiva de carga fraca e depende do modelo particular de interação fraca.

26. A estimativa do alcance da interação entre partículas, com a troca de bósons de massa M, feita pelo físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981; PNF, 1949), em 1934, é dada por:  $r \approx \frac{\hbar}{Mc}$  onde  $\hbar$  é a constante de Planck  $h$  dividida por  $2\pi$ .
27. As primeiras evidências de correntes neutras fracas foram observadas por pesquisadores do **Centre Européen de Recherches Nucléaires - CERN**, sob a liderança do físico francês Paul Musset, em experiências com a câmara de bolhas *Gargamelle* envolvendo espalhamento de neutrinos com a matéria nuclear. As mesmas evidências foram confirmadas, em 1974, em experiências realizadas no **Fermi National Laboratory - FERMI LAB**, da Universidade de Chicago, por pesquisadores liderados por Rubbia. (BASSALO, op.

- cit.)
28. BOUCHIAT, M. A. and BOUCHIAT, C. C. 1974. *Phys. Lett.*, **48B**: 111.
29. Para o cálculo dessa proporcionalidade, veja-se: HARRIS, R. A. and STODOLSKY, L. 1978. *Phys. Lett.*, **78B**: 313.
30. Para detalhes sobre essas experiências, veja-se: BOUCHAT, M. A. and POTTIER, L. 1984. *Scientific American*, June: 76; — 1986. *Science*, **234**, December, 5: 1203.
31. Nesse trabalho (*Am. J. Phys.*, **56**: 1086, 1988), os químicos R. A. Hegstrom, J. P. Chamberlain, K. Seto e R. G. Watson usando o potencial da força fraca indicado na nota 25 obtiveram uma representação pictórica da quiralidade do átomo de Hidrogênio. Basicamente, eles mostraram que a força eletrofraca nesse átomo é assim especificada: a força eletromagnética exercida pelo próton sobre o elétron faz com que este descreva uma órbita curvilínea em torno do próton; por outro lado, a força fraca exercida também pelo próton sobre o elétron faz com que este descreva uma hélice de mão-direita em torno do próprio próton, uma vez que a força fraca tende a alinhar o momento linear ( $\vec{p}$ ) do elétron na direção de seu spin ( $\vec{\sigma}_e$ ). (Lembrar que a interação depende do termo  $\vec{\sigma}_e \cdot \vec{p}$ .) Para demonstrar que o elétron descreve essa hélice, os autores calcularam a densidade de corrente de probabilidade  $\vec{J}(\vec{r})$  para um elétron estacionário no estado  $\Psi(\vec{r}) : \vec{J}(\vec{r}) = \text{Re}[\Psi^\dagger(\vec{r})\vec{P}\Psi(\vec{r})]$ , onde  $\vec{P}$  é o operador momento linear do elétron e  $\Psi(\vec{r}) = 2p_{\frac{1}{2}} + ic2s_{\frac{1}{2}}$  (nesta expressão,  $c$  representa o efeito da força fraca sobre o estado  $2p_{\frac{1}{2}}$ ). Por fim, é oportuno dizer que, como a interação fraca viola a paridade, a imagem especular do átomo descrito acima, o movimento do elétron em forma de uma hélice de mão-esquerda não existe na Natureza.
32. Em trabalho publicado em 1980 (*Il N. Cim.*, **55B**: 110), os físicos italianos A. Di Giacomo, G. Paffuti e C. Ristori usando o potencial da força fraca indicado na nota 25 (aliás, nesse trabalho esse potencial é apresentado em sua forma



- completa) investigaram efeitos da violação da paridade, devido a correntes neutras fracas, em moléculas.
33. Ver referências sobre o assunto, em: MAGDERMOTT, A. J., TRANTER, G. E. and TRAINOR, S. J. 1992. *Chem. Phys. Lett.*, **194**: 152.
34. MASON, S. F. 1984. *Nature* **311**: 19; DE MIN, M. LEVY, G. and MICHEAU, J. C. 1988. *J. Chim. Phys.*, **85**: 5.
35. NICOLIS, G. and PRIGOGINE, I. 1977. *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*, John Wiley, N.Y.; HAKENS, H. 1977. *Synergetics: an Introduction*, Springer-Verlag.
36. KONDEPUDI, D. K. and NELSON, G. W. 1984. *Physica* **125A**: 465.
37. Esse assunto também foi tratado por CATTANI, M. and TOMÉ, T. 1993. *Origins of Life* **23**: 125.
38. SALAM, op. cit.