



# Composição Histórica de Estudos do Comportamento da Paridade nas Interações Fracas: da Teoria de Fermi à Teoria V - A

## Historical Composition of Studies on Parity Behavior in Weak Interactions: from Fermi Theory to V - A Theory

Márcia da Costa<sup>1\*</sup> , Irinéa de Lourdes Batista<sup>2</sup> 

1.Universidade Federal do Espírito Santo  – Departamento de Química e Física – Alegre (ES), Brasil.

2.Universidade Estadual de Londrina  – Departamento de Física – Londrina (PR), Brasil.

\***Autora correspondente:** [marcia.costa.21@ufes.br](mailto:marcia.costa.21@ufes.br)

**Editor de Seção:** Maria Consuelo Alves Lima.

**Recebido:** 10 Fev. 2022 | **Aprovado:** 17 Jun. 2022

**Como citar:** COSTA, M.; BATISTA, I. L. Composição Histórica de Estudos do Comportamento da Paridade nas Interações Fracas: da Teoria de Fermi à Teoria V - A. *Ensino & Multidisciplinaridade*, São Luís (MA), v. 8, n. 1, e0522, 2022.

<https://doi.org/10.18764/2447-5777v8n1.2022.5>

### RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de apresentar uma composição histórica a respeito de estudos que tenham investigado o comportamento da paridade nas interações fracas, que representam uma relevante contribuição na área de física de partículas, culminando na reformulação da teoria que descrevia as interações fracas e posteriormente inspirando os estudos que levaram a elaboração da Teoria Eletrofraca. Neste artigo, será apresentado o problema que levou à discussão da conservação da paridade nas interações fracas e às proposições teóricas e experimentais que ajudaram a elucidar a questão da conservação, ou não, da paridade nas interações fracas. Este estudo foi elaborado com base nos pressupostos da elaboração de uma composição histórica e de pesquisas em História da Ciência, prezando pelas fontes primárias e secundárias, seguindo os princípios de inteligibilidade, valores cognitivos e fidedignidade, que resultam em um material que reúne elementos históricos, epistemológicos, axiológicos e científicos para a inteligibilidade de um conteúdo científico com objetivo pedagógico e de disseminação de conhecimentos.

**Palavras-chave:** Composição Histórica. Paridade. Interações Fracas. Decaimento  $\beta$ .

### ABSTRACT

This paper aims to present a historical composition about studies that investigated the behavior of parity in weak interactions, which represent a relevant advance in the area of particle physics, culminating in the reformulation of the theory that described weak interactions and later inspiring the studies that led to the elaboration of the Electroweak Theory. This paper will present the problem that led to the discussion of parity in weak interactions and the theoretical and experimental propositions that helped to elucidate the issue of conserving or not parity in weak interactions. This study was elaborated based on the assumptions of the elaboration of a historical composition and research in History of Science, valuing the primary sources and following the principles of intelligibility, cognitive values, and reliability, which result in a material that brings together historical, epistemological, axiological, and scientific criteria for the intelligibility of a scientific content with pedagogical purpose and knowledge dissemination.

**Keywords:** Historical Composition. Parity. Weak Interactions. Decay  $\beta$ .

## INTRODUÇÃO

Ao justificar a relevância da contextualização no Ensino de Ciências, que pode ser obtida por meio de abordagens históricas, filosóficas e sociológicas, entre outras, não se pode ignorar a discussão a respeito da disponibilidade dessas abordagens para a formação e atuação profissional dos professores, pois eles não têm à disposição reconstruções histórico-epistemológicas a respeito dos variados assuntos das ciências. Sabe-se, ainda, que algumas das reconstruções disponíveis foram elaboradas em outros idiomas, o que dificulta o acesso a essas alternativas (BATISTA, 2004; MARTINS, 2007; FORATO; MARTINS; PIETROCOLA, 2012).

Isso justifica a elaboração dessas abordagens nos programas de pós-graduação, no contexto educacional brasileiro, oferecendo a possibilidade, aos professores e estudantes, de consultar reconstruções histórico-epistemológicas que podem promover um ensino contextualizado, problematizador, democrático e motivador.

Este trabalho é componente de uma composição histórica (BATISTA 2011; 2016) a respeito da Unificação Eletrofraca, elaborada com objetivo de proporcionar, aos estudantes de Física e aos professores que atuam em salas de aula, uma alternativa para abordar conceitos de Física Moderna por meio de uma abordagem histórica. Neste artigo, será apresentada uma parte dessa composição referente ao comportamento da Paridade nas Interações Fracas. Outra parte dessa composição, denominada composição histórica da Teoria Eletrofraca, já foi publicada em uma edição anterior deste periódico (COSTA; BATISTA, 2021). Desse modo, a composição histórica de estudos do comportamento da Paridade nas Interações Fracas e a composição histórica da Teoria Eletrofraca buscam explicitar partes do processo de construção e aceitação da proposta da unificação das interações fracas e eletromagnéticas, de maneira a exemplificar aspectos da natureza da ciência, ao mesmo tempo que busca promover o entendimento dos conteúdos científicos abordados.

Ademais, outras produções oriundas de pesquisas em educação científica, como as simulações virtuais de experimentos históricos (COSTA et al., 2021) e o exemplar de uma abordagem histórico-didática para o ensino da Teoria Eletrofraca (COSTA; BATISTA, 2020), também foram elaboradas para auxiliar a exploração desses conteúdos em sala de aula.

A composição histórica apresentada a seguir se dirige ao público-alvo da licenciatura em Física e busca trazer exemplares e episódios históricos que contribuam para o entendimento problematizado, articulador e integrador do conhecimento físico como um processo de construção coletiva, da imbricação dos aspectos teórico e experimental, com seus sucessos, revezes e desdobramentos. A explicitação dessas características do fazer científico aproxima e humaniza o mundo da ciência, além de proporcionar o entendimento de que uma produção científica não é resultado de acasos, de delírios ou sorte, mas fruto de muita preparação, empenho, engajamento e admiração das pessoas envolvidas nesse processo.

Além disso, assim como nas referências de Maia Filho e Silva (2019a; 2019b), que abordam a relevância de trabalhos da cientista Chien-Shiung Wu para a Física, este trabalho também pretende apresentar parte das contribuições dessa pesquisadora, explorando a elucidação do problema da paridade no estudo do decaimento  $\beta$ . Como mencionado por Maia Filho e Silva (2019a), embora Chien-Shiung Wu tenha desenvolvido técnicas e experimentos que foram relevantes para a Física Moderna, ela ainda é pouco citada e lembrada na literatura de História das Ciências. Assim, espera-se que esta composição também possa contribuir para dar mais visibilidade à participação das mulheres na ciência.

Com base nesses argumentos, é apresentada a seguir uma composição histórica a respeito dos estudos que investigaram o comportamento da paridade nas interações fracas, tendo como ponto de partida o cenário no qual surgiu o problema que levantou questionamentos a respeito da conservação da paridade nessas interações e percorrendo um caminho que passa pelas contribuições teóricas e experimentais que elucidaram esse questionamento, culminando na reformulação da Teoria de Fermi para a Teoria V - A, que acabou gerando outros questionamentos e hipóteses, os quais, futuramente, levariam ao desenvolvimento da Teoria Eletrofraca. Além disso, dá-se ênfase na descrição de um experimento histórico que pode ser explorado em sala de aula por meio de uma simulação virtual.

## A FÍSICA DAS INTERAÇÕES FRACAS ATÉ 1950

Ao final do século XIX, com a observação dos primeiros fenômenos relacionados à radioatividade, criou-se um novo campo de pesquisa na Física, que proporcionou um acesso a conhecimentos a respeito da constituição e propriedades fundamentais da matéria (BATISTA, 1999; 2001).

Em 1898, Rutherford já havia distinguido dois dos tipos de radiação,  $\alpha$  e  $\beta$ , e, em 1900, já estava estabelecido que as partículas  $\beta$  eram elétrons provenientes dos núcleos atômicos instáveis (BATISTA, 1999; 2001). No entanto, havia algo instigando os pesquisadores. No processo nuclear de decaimento  $\beta$ , o produto do decaimento não apresentava a mesma quantidade de energia do núcleo original.

Mediante esse problema, alguns cientistas cogitaram a ideia da violação do princípio da conservação de energia, enquanto outros defendiam o surgimento de uma nova partícula, hoje conhecida como antineutrino. Pauli foi quem primeiro propôs essa hipótese e foi Fermi que elaborou uma teoria para a explicação desse fenômeno e nomeou o neutrino. Fermi, em uma tentativa de explicar o decaimento  $\beta$  em 1933, apresentou uma proposta de teoria chamada Interação Fermi, a qual introduziu a produção de neutrinos (atualmente antineutrinos) e na qual surgiram as primeiras noções a respeito da Interação Fraca (BATISTA, 2005). Essa proposta tinha como objetivo explicar o que ocorria no decaimento  $\beta$  e como a interação que provocava esses decaimentos se comportava. Fermi assumiu a existência da nova partícula proposta por Pauli e admitiu que o núcleo continha apenas prótons e nêutrons, sendo elétron e neutrino (na época não se sabia que se tratava do antineutrino) criados no instante do decaimento. Em analogia com a Teoria Eletromagnética (quadri-vetor potencial) e com a Teoria da Eletrodinâmica Quântica, e porque seus cálculos estavam de acordo com as observações de decaimentos naturais, ele usou a forma vetorial (V) da interação.

A recepção a essa tentativa de teoria, como Fermi mesmo enuncia, ocorreu de duas maneiras: positiva, procurando aprofundar os estudos do decaimento  $\beta$  e expandi-los para explicação de outros fenômenos; e negativa, colocando-se dúvidas a respeito da nova partícula proposta e da abordagem teórica (BATISTA, 1999; 2001).

Entre os estudos que aceitaram a proposta de Fermi, Heisenberg, em 1934, propôs que o par elétron-neutrino seria o responsável pela interação entre os núcleon, e investiu na possibilidade de a Teoria de Fermi ser utilizada como uma teoria universal das Interações Nucleares Fortes. Mais tarde, Yukawa proporia uma teoria concorrente à proposta de Heisenberg, também para explicar as interações nucleares.

Estudos tentaram mostrar algumas falhas na Teoria de Fermi, como o caso do trabalho de Konopinsk e Uhlenbeck (BATISTA, 1999; 2001). Todavia, na tentativa de resolver uma falha, cometeram erros. Além disso, como foram observados decaimentos além dos naturais, a Teoria de Fermi precisou ser aperfeiçoada. A teoria foi universalizada ao explicar decaimentos de partículas dos chamados raios cósmicos e generalizada por Gamow-Teller, sendo, posteriormente, aperfeiçoada por Lee, Yang, Sudarshan, Marshak, Feynman, Gell-Mann, Sakurai e outros cientistas contemporâneos, na década de 1950, estendendo seu campo de aplicação (BATISTA, 1999; 2001).

A interação fraca é relevante no entendimento da desintegração radioativa e de partículas cósmicas, bem como da fusão nuclear de partículas subatômicas. Por exemplo, ela desempenha um papel decisivo na produção de energia pelo sol, no qual a fusão de hidrogênios produz deutério e hélio, liberando a energia que alimenta seu processo termonuclear. Além disso, é ela que ajuda a transmutar os elementos para construir a riqueza da tabela periódica. Essa interação é chamada assim porque é  $10^5$  vezes menos intensa que a interação eletromagnética e seu alcance não passa de  $10^{-16}$  cm, que é menor que o alcance da interação forte, por um fator de 1.000 (SALAM, 1991).

Já em relação à interação forte, embora não tenha sido formalizada na época, foi proposta em uma teoria elaborada por Yukawa em 1935 para explicar a coesão do núcleo atômico. No início, Yukawa pretendia explicar todas as interações nucleares por meio dessa teoria. Mais tarde, Bethe (1940) e Bethe e Nordheim (1940) mostraram que isso não era possível (BATISTA, 1999). É a interação forte que mantém o núcleo unido, evitando que os prótons destruam o núcleo por repulsão eletromagnética. Assim, é uma das forças responsáveis pela existência da matéria como se conhece. Sem ela, os nêutrons e prótons não se manteriam coesos no núcleo e, conseqüentemente, impossibilitando a formação dos átomos constituintes da matéria. A interação forte foi, finalmente, formalizada, independentemente, por Politzer, Gross e Wilczek, em 1973, com a Teoria da Cromodinâmica Quântica, a qual é capaz de explicar os fenômenos nucleares (BASSALO, 1994). O intervalo entre esses episódios teóricos foi marcado por discussões que possibilitaram um entendimento mais aprofundado a respeito da interação fraca, além da aplicação da Teoria de Fermi.

Yukawa, em 1935, tinha proposto a existência de uma partícula que faria a mediação das interações nucleares e, em 1937, os físicos Neddermeyer e Anderson, trabalhando com as câmaras de Wilson no nível do mar, observaram uma partícula chamada méson e, mais tarde, múon. Essa partícula possuía uma massa com valor intermediário entre os valores de massa do elétron e do próton, cerca de 200 vezes maior que a massa do elétron, o que se encaixava nas predições teóricas de Yukawa (ABDALLA, 2005). No entanto, na época, em virtude da Segunda Guerra Mundial, reduziram-se as atividades experimentais e o Japão ficou isolado do Ocidente. Dessa

forma, os físicos que estavam trabalhando com raios cósmicos não sabiam da proposta de Yukawa, que só ficou conhecida no Ocidente após dois anos de sua publicação no Japão (BATISTA, 1999).

Os físicos japoneses vibraram com as evidências dessa partícula. Entretanto, começaram a perceber alguns pontos que não se encaixavam, como a vida média do méson, que era excessivamente alta, bem como o fato de que ele raramente interagia com o núcleo. Um dos indícios disso é o fato de que eram observadas no nível do mar e até em túneis subterrâneos (SEGRÈ, 1987).

Foram os físicos italianos Conversi, Pancini e Piccioni que observaram que os mésons positivos e negativos se comportavam de forma diferente. Os positivos decaíam como se estivessem no vácuo e os negativos, se detidos por núcleos pesados, eram capturados e produziam desintegrações. Contudo, se fossem capturados por núcleos leves, decaíam como se estivessem no vácuo, o que não era o comportamento esperado da partícula de Yukawa (SEGRÈ, 1987).

Ao analisar esses resultados, em 1947, Pontecorvo fez uma analogia entre o comportamento dos mésons e o decaimento  $\beta$ , a partir do que propôs que parte desse comportamento e o decaimento  $\beta$  se deviam à interação fraca. Essa ideia foi assumida por outros pesquisadores, entre eles Lee e colaboradores, que trabalharam em aprimorações no entendimento da interação fraca (BATISTA, 1999; 2005), como será visto adiante.

A Teoria de Fermi conseguia explicar o comportamento dos mésons, enquanto a teoria de Yukawa não explicava a origem desses elementos, uma vez que eles não eram as partículas previstas teoricamente pelo estudioso. Essa extensão da Teoria de Fermi foi o primeiro passo para a chamada Teoria Universal de Fermi, que, em 1955, ficou conhecida como interação fraca.

Outro fator que contribuiu para a extensão do campo de aplicação das ideias de Fermi foi a evidência das partículas estranhas e de suas desintegrações. Essas partículas foram observadas pela primeira vez na década de 1950, graças ao desenvolvimento da técnica de emulsões fotográficas sensíveis e da utilização de aceleradores mais sofisticados. As partículas estranhas tinham uma característica em comum: eram produzidas em abundância e em curto tempo; já para decaírem em partículas carregadas, o processo era mais lento. A única explicação para o fenômeno era que a produção e o decaimento delas eram regidos por processos físicos diferentes (BATISTA, 2005).

A produção abundante dessas partículas podia ser explicada pela interação forte, mas não os seus lentos decaimentos, que eram explicados pelas interações fracas. Hoje se sabe que as partículas estranhas são produzidas pela interação forte e seus decaimentos regidos pela interação fraca (BATISTA, 1999). Paralelamente a essa sistematização de conhecimentos a respeito dessas partículas estranhas, outro problema precisava de respostas.

## O QUEBRA-CABEÇA $\Theta$ - $\tau$

Duas novas partículas,  $\Theta$  e  $\tau$ , com massas, spin e tempo de vida parecidos, eram tidas como produto do decaimento da partícula K, hoje denominada Káon. Desse modo, deveriam ser a mesma partícula, caso apresentassem a mesma paridade. No entanto, ao se observarem os valores de paridade para o decaimento dessas partículas, via-se que eram diferentes, o que, na época, não era permitido teoricamente.

Na Física, o conceito de paridade está relacionado ao de simetria. Na Matemática, a simetria de um corpo está relacionada com a totalidade de deslocamentos, conhecidos como transformações de simetria, que tal corpo sofre com a finalidade de coincidir com ele mesmo no tempo e no espaço (BATISTA, 2005).

Na Física Quântica, mais especificamente na Física de Partículas, ao se falar de simetria, relaciona-se o conceito de paridade, que tem o significado de um princípio teórico. Por exemplo, suponha que a função de onda  $\psi(x, y, z)$  defina o movimento de uma partícula elementar. Ao se realizar uma reflexão de coordenadas, ou seja, inverter os sinais das coordenadas, isso vai gerar uma nova função  $\psi'(-x, -y, -z)$ . Quando não ocorre mudança de sinal na função  $\psi'$ , diz-se que a paridade é positiva, ou seja, o estado de paridade de um sistema de partículas é o mesmo antes e depois; caso contrário, a paridade é tida como negativa (FRANKLIN, 1986; 1990). Convém ressaltar que a paridade de um grupo de partículas é dada pelo produto das paridades das partículas individuais, não pela soma (BATISTA, 1999).

Essa transformação de coordenadas é chamada transformação de paridade. É equivalente a uma reflexão de espelho, seguida por uma rotação de  $180^\circ$  paralela ao espelho. Se um processo físico procede exatamente da mesma maneira quando submetido a uma inversão de coordenadas, diz-se que a paridade é conservada; caso contrário não é conservada (FORMAN, 1982).

A lei de conservação da paridade foi considerada, por um longo tempo, válida tanto para as interações fortes quanto para as fracas. No entanto, em 1956, surgiu um caso no qual a conservação da paridade começou a ser questionada para as interações fracas.

Em estudos a respeito do “ $\theta - \tau$  puzzle”, Lee e Yang se depararam com uma situação enigmática: entre 1952 e 1953, foram evidenciadas duas partículas, aparentemente iguais, mesma massa e mesmo tempo de vida, que apresentavam decaimentos diferentes. O méson  $\theta$  decaía em dois píons, enquanto o méson  $\tau$  decaía em três píons. Isso conferia uma paridade positiva para o méson  $\theta$  e uma paridade negativa para o méson  $\tau$ , o que não era permitido pela conservação da paridade. Nesse momento, ou se acreditava que eram duas partículas iguais e se assumia a quebra da conservação da paridade, ou se assumia que se tratava de partículas diferentes (LEE; YANG, 1956).

Assumir a quebra de paridade não pareceu, para a maior parte da comunidade de cientistas da Física da época, uma alternativa promissora. No entanto, houve quem não abandonasse a ideia de violação da conservação da paridade.

Em abril de 1956, estudantes da Sexta Conferência Rochester começaram a expressar suas dúvidas em relação à validade universal da paridade. Intrigados com esse questionamento, Lee e Yang começaram imediatamente uma investigação sistemática do estado de conhecimento experimental a respeito da conservação da paridade e foram surpreendidos com o fato de que não havia testes experimentais que validassem a conservação da paridade em interações fracas (LEE; YANG, 1956). O que se tinha na literatura era uma hipótese extrapolada das interações fortes e eletromagnéticas e nenhuma investigação que validasse essa hipótese (WU, 1996). Ou seja, ficou claro que as experiências existentes indicavam a conservação da paridade em interações fortes e eletromagnéticas, com um alto grau de precisão, mas que, para as interações fracas, a conservação da paridade era, até o momento, apenas uma hipótese extrapolada não suportada por evidências (LEE; YANG, 1956).

De acordo com Lee e Yang (1956), o “quebra-cabeça  $\theta - \tau$ ” poderia ser uma evidência da quebra de paridade nas interações fracas, mas isso não era para ser levado a sério graças à escassez dos conhecimentos a respeito da natureza das partículas estranhas que tinham até então. Entretanto, esse quebra-cabeça constituía um incentivo para o exame da questão da conservação da paridade nas interações fracas.

Para decidir inequivocamente a respeito da conservação ou não da paridade nessas interações, era necessário realizar testes. Isso levou Lee e Yang a proporem quatro novos experimentos que pudessem elucidar essa questão (BATISTA, 2005): medida da distribuição angular dos elétrons originados por decaimentos  $\beta$ , a partir de núcleos orientados; medida da distribuição angular dos elétrons originados no decaimento de múons polarizados; análise da polarização longitudinal (helicidade) de múons produzidos pelo decaimento de píons; e análise da polarização circular de raios  $\gamma$  em experimentos de correlação  $\beta - \gamma$ . Esses experimentos remetem à procura de uma correlação entre a direção e o sentido do spin de uma partícula com a direção do momento linear de partículas de um decaimento. Na época, o primeiro e o terceiro experimentos só poderiam ser realizados em laboratórios altamente especializados e o quarto experimento era considerado impraticável pelos autores. Assim como em casos anteriores em que foi proposta a quebra de uma lei de conservação, a proposta de Lee e Yang foi recebida com ceticismo e rejeição, o que justifica o fato de poucos laboratórios se empenharem nesses testes experimentais. Até mesmo os autores da ideia chegaram a publicar um artigo, logo após a proposta da quebra de paridade, no qual assumiam a conservação da paridade, o que leva a cogitar que nem eles estavam convictos dessa ideia ou estavam se protegendo da crítica dos ortodoxos (BATISTA, 2005).

Quem também estudava um problema semelhante era o físico brasileiro Tiomno. Em 1950, ele defendeu sua tese de doutorado na Universidade de Princeton, sob a orientação de Wigner, na qual tratou da teoria dos neutrinos e da dupla desintegração  $\beta$ . Nessa tese, Tiomno apresentou novas ideias envolvendo o operador de projeção<sup>1</sup>. No entanto, entre as combinações possíveis envolvendo esse operador, Tiomno descartou uma combinação por ela violar o princípio da conservação da paridade. Contudo, foi justamente essa combinação a considerada por Lee e Yang em seus trabalhos de 1956 (BASSALO, 1994). Na época, era impensável que alguém questionasse a validade das simetrias espaciais, de carga e de tempo. Chien-Shiung Wu, pesquisadora experimental e líder de pesquisa em Física Nuclear, comentou em um trabalho publicado que, mesmo depois de ela e seus colaboradores terem evidenciado a violação da paridade, ela recebeu uma carta de Pauli, na qual ele descrevia acreditar que os

---

1. Em Mecânica Quântica, um operador é uma entidade matemática que serve para representar grandezas físicas. Aplicado sobre a função de onda, ou vetor de estado, ele fornece, por meio da equação de onda, os valores efetivos dessas quantidades. Um operador de projeção define que todo vetor de estado pode ser decomposto na soma de dois vetores ortogonais (BATISTA, 1999).

resultados não iriam mostrar a violação da paridade. Feynman chegou a apostar abertamente que a paridade seria conservada no decaimento proposto para ser explorado experimentalmente (WU, 1996).

Em pesquisas de Cox e colaboradores, em 1928, e Chase, em 1930, a respeito da polarização intrínseca de elétrons do decaimento  $\beta$ , já se tinha indícios da violação de simetria por reflexão, embora na época não tivessem chegado a essa conclusão. Esses experimentos foram lembrados, anos mais tarde, depois que a violação da paridade já estava estabelecida (FRANKLIN, 1986; 1990; BATISTA 1999; 2005).

Lee e Yang não encontraram os trabalhos de Cox e colaboradores e Chase, que já poderiam ter dado algumas evidências da violação da paridade. Isso ocorreu porque Lee e Yang estavam procurando por experimentos que estudavam o decaimento  $\beta$  e as interações fracas, enquanto os experimentos de 1928 e 1930 estavam investigando a dispersão de elétrons (FRANKLIN, 1986; 1990). Assim, o primeiro teste experimental que evidenciou a quebra da conservação da paridade foi desenvolvido pela física Chien-Shiung Wu e por sua equipe no NBS (National Bureau of Standards).

Chien-Shiung Wu desenvolveu relevantes contribuições para a Física Moderna e hoje é considerada uma das mais relevantes cientistas do século XX na área de Física Nuclear. Foi a primeira pessoa a receber o Prêmio Wolf de Física e a primeira mulher a presidir a American Physical Society, além de participar de um dos maiores projetos científicos, o Projeto Manhattan. No entanto, mesmo tendo seu trabalho destacado em biografias internacionais, a trajetória de Wu ainda é pouco difundida na literatura tecno-científica brasileira (MAIA FILHO; SILVA, 2019a). Destacam-se, nesse cenário, os trabalhos de Maia Filho e Silva (2019a; 2019b), que apresentam registros históricos da vida de Chien-Shiung Wu na China, sua chegada aos Estados Unidos, suas dificuldades em conseguir o primeiro emprego, sua participação no Projeto Manhattan, sua contribuição à Física Experimental, a não premiação de Wu com o Prêmio Nobel de 1957 e o reconhecimento pela comunidade científica a partir da concessão de prêmios e homenagens.

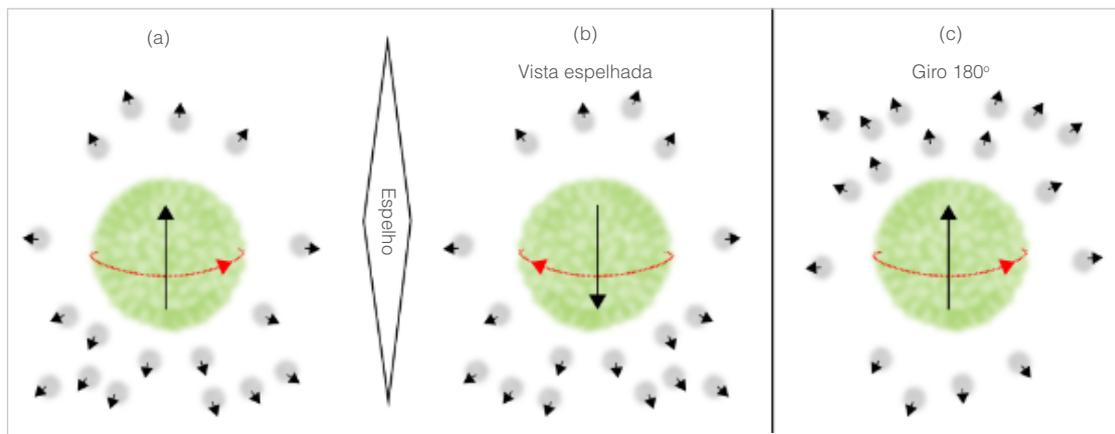
## COMPORTAMENTO DA PARIDADE NAS INTERAÇÕES FRACAS: RESOLVENDO O PROBLEMA

Wu, após uma conversa com Lee, na qual discutiram avanços nos experimentos relacionados ao decaimento  $\beta$  e à conservação da paridade, começou a investigar a questão da paridade no decaimento  $\beta$ . Nessa conversa, Wu perguntou a respeito dos métodos indicados para um possível teste. Lee comentou que havia sugestões de utilização de núcleos polarizados produzidos em reações nucleares ou usar um feixe de nêutrons lentos polarizados por meio de um reator. Wu analisou as ideias e sugeriu que seria mais eficiente utilizar núcleos de cobalto  $^{60}\text{Co}$  polarizados pelo método de desmagnetização adiabática (HAMMOND, 2010).

O processo de decaimento é o seguinte:  $^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow ^{60}_{28}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e + 2\gamma$ , um dos nêutrons do núcleo do cobalto decai para um próton por emissão de um elétron ( $e^-$  ou partícula  $\beta$ ) e seu antineutrino ( $\bar{\nu}_e$ ), transformando-se em um núcleo de Níquel ( $^{60}_{28}\text{Ni}$ ), que por sua vez decai para seu estado fundamental com a emissão de dois raios  $\gamma$  ( $2\gamma$ , fótons). Para entender a ideia do experimento, imagine o seguinte: todos os núcleos têm momentos magnéticos, o que significa que eles podem atuar como um conjunto de minúsculos ímãs. Assim, se forem colocados num campo magnético, os núcleos podem alinhar-se, da mesma maneira que um conjunto de ímãs faria. Se considerar o momento magnético resultante como uma rotação, sabe-se que, a partir da discussão a respeito de paridade, em um espelho a rotação apareceria na direção oposta à direção de rotação do núcleo original (HAMMOND, 2010).

Assim, a ideia do experimento foi alinhar os spins nucleares em duas direções, para cima e para baixo. Uma delas corresponderia à imagem real e a outra à imagem espelhada. Se a paridade fosse conservada, então, as partículas emitidas deveriam surgir em iguais quantidades tanto para cima quanto para baixo. Se não, no espelho, onde a rotação é invertida, o que se observaria seria diferente. Caso isso acontecesse, a paridade não seria conservada. Na Fig. 1, representa-se um núcleo e partículas  $\beta$  (elétrons) sendo emitidas. A sequência de Figs. 1a-c representa um caso de transformação de paridade e o que se espera caso a paridade se conserve.

Na Fig. 1a, um núcleo gira no sentido anti-horário e tem o sentido de seu eixo de rotação para cima. Agora, imagine essa imagem espelhada: com isso, o sentido do giro inverte e, conseqüentemente, o sentido do eixo de rotação também é alterado (Fig. 1b). O próximo passo é girar a imagem espelhada em  $180^\circ$ : assim, o sentido do giro e do eixo de rotação voltam ao quadro original (Fig. 1c). Isso completa uma transformação de paridade, como descrito em Paul Forman (1982).



Fonte: Costa (2019, p. 149).

**Figura 1:** Representação de uma transformação de paridade.

Ao analisar as Figs. 1a e 1c, pode-se interpretar que o esperado é que o número de emissão de partículas, durante o decaimento, seja igual, tanto na direção do eixo de rotação quanto na direção oposta. Isso representaria a conservação da paridade, uma vez que, quando o número de emissões é uniforme em todas as direções, os decaimentos com alinhamento para cima e para baixo seriam indistinguíveis.

De acordo com Wu (1996), a conservação de paridade afirma que nenhuma nova lei física deve resultar da construção de um sistema que seja diferente do original por ser uma imagem espelhada. Ou seja, não existe uma distinção absoluta entre um objeto real e sua imagem espelhada: os dois sistemas deveriam obedecer às mesmas leis físicas. Em outras palavras, duas partículas radioativas semelhantes que giram em sentidos opostos, em torno do mesmo eixo, devem emitir a mesma intensidade de radioatividade em qualquer direção dada. Foi isso que os cientistas procuraram estudar no experimento. Alinharam os átomos em duas direções, para cima e para baixo, e observaram o número de emissões nos dois casos.

Como Wu pretendia trabalhar com o alinhamento dos prótons de núcleos de cobalto, ao iniciar as investigações, ela já sabia que precisaria trabalhar com baixas temperaturas, pois a energia térmica dos átomos de cobalto é demasiadamente alta, o que destruiria o alinhamento. A partir de previsões teóricas, Wu chegou à conclusão de que precisaria de uma temperatura de aproximadamente 0,01 K. No entanto, ela não dominava as técnicas de alinhamento a baixas temperaturas. Isso acabou envolvendo outros cientistas na investigação (WU, 1996; HAMMOND, 2010).

O experimento<sup>2</sup> exigia a combinação de duas técnicas experimentais sofisticadas, que nunca tinham sido combinadas antes. A “espectroscopia  $\beta$ ”, que consistia na observação precisa dos elétrons de alta velocidade emitidos por núcleos radioativos, e a “criogenia”, que tratava da produção das temperaturas mais baixas atingíveis. Para realizar algum dos experimentos propostos por Lee e Yang, era necessário que os núcleos fossem fortemente orientados em uma direção específica. Essa técnica foi eficientemente desenvolvida nos laboratórios pioneiros em baixas temperaturas de Oxford e Leyden. No entanto, nesses laboratórios não foi percebida a relevância da técnica para os experimentos propostos por Lee e Yang (BATISTA, 2005). Isso não aconteceu no NBS, pois já havia expectativas em relação a essas técnicas. Esse fato levou Wu a convidar Ambler, um dos pesquisadores dos laboratórios ingleses, que havia se mudado para o Laboratório de Baixas Temperaturas no NBS de Washington, a integrar a equipe (WU, 1996; MAIA FILHO; SILVA, 2019b). Ele aceitou a proposta, já que tinha feito sua tese de doutorado a respeito do alinhamento do núcleo de cobalto. Outros experimentalistas, Hudson, com experiência em criogenia, e Hayward e Hoppes, com experiência em detecção de radiação, juntaram-se ao grupo e começaram os testes (LESOV, 2009). Desse modo, Wu, que até então trabalhava no laboratório em Columbia, passou a realizar os testes no NBS.

O experimento foi arriscado, porque havia muitas questões que não puderam ser respondidas e não se tinha certeza se a experiência poderia ser executada (HAMMOND, 2010). Para realizar o experimento, alguns

2. Esse trabalho experimental é descrito neste artigo pelo fato de que essas informações podem ser utilizadas em abordagens didáticas que envolvam a simulação virtual desse experimento (ver <https://drive.google.com/drive/folders/1d2S4zlokYL9AZchc3dremlPQtSaEgrsl?u=sp=sharing>).

desafios foram enfrentados: o primeiro foi obter uma maneira de polarização eficiente, uma vez que para isso era necessário que a temperatura da amostra fosse da ordem de 0,01 K. O segundo desafio consistia no fato de que o processo precisava ser feito em um equipamento que permitisse um isolamento térmico suficiente para realizar as medidas. O terceiro foi desenvolver um método para a detecção das partículas  $\beta$  na presença de baixas temperaturas e de um campo magnético alto. Isso levou a perguntas como: “Como contar os elétrons?”;<sup>3</sup> “Onde colocar os detectores?”; e “Qual o efeito do campo magnético?” (WU et al., 1957; WU, 1996; HAMMOND, 2010).

O primeiro dos desafios foi resolvido por meio de um processo de desmagnetização adiabática. Nesse processo, a amostra é misturada com um material paramagnético<sup>4</sup> e o sistema é submetido à ação de um campo magnético, que magnetiza a amostra até obter uma polarização quase total do sistema. Ao retirar suavemente o campo magnético a amostra entra em processo de resfriamento até obter uma temperatura na ordem de 0,01 K (WU et al., 1957; WU, 1996; HAMMOND, 2010). Como a partícula  $\beta$  é absorvida muito rapidamente na matéria, Wu tinha que encontrar uma maneira de obter as partículas emitidas livres e não permitir que fossem reabsorvidas pela própria fonte de onde vieram. Wu pensou em utilizar uma camada superficial fina, da fonte radioativa, sobre o cristal de nitrato de cério e magnésio. Ela calculou que uma camada de 0,002 polegadas (0,005 mm) seria suficiente para garantir que a maioria das partículas emitidas escapasse (WU et al., 1957). Era necessário que os núcleos da camada de cobalto 60 ficassem alinhados por tempo suficiente para realizar as medidas. Contudo, em poucos segundos o alinhamento era destruído, o que impedia as medidas. Wu suspeitava de que a camada ia aquecendo com o tempo, talvez em virtude do calor de radiação ou do hélio que era trocado para arrefecer a amostra. Ela acreditava que a fina camada deveria ser protegida por um invólucro espesso de cristais de nitrato de cério e magnésio. Sendo assim, a equipe voltou seus esforços para a produção desses cristais mais espessos, uma vez que nenhum deles sabia como isso poderia ser feito (WU, 1996; HAMMOND, 2010; CREASE; MANN, 1996).

Para solucionar o segundo desafio, foram colocados a amostra e o detector em um tubo de vácuo, utilizando um criostato<sup>5</sup> para proporcionar o isolamento térmico até que as medidas fossem efetuadas (WU et al., 1957). Essas medidas foram possíveis dada a solução do terceiro desafio. Wu e sua estudante de pós-graduação, Biavati, mostraram que as partículas  $\beta$  ainda produziam sinais luminosos, utilizando o método de cintiladores, mesmo quando o cintilador era resfriado com hélio líquido e que essas cintilações poderiam ser capturadas por um tubo fotoelétrico, utilizando um tubo transparente. Esse tubo era necessário pois os fotomultiplicadores então disponíveis não funcionavam a baixas temperaturas e, conseqüentemente, a luz dos cintiladores tinha de ser retirada do criostato, de modo que o fotomultiplicador pudesse ser colocado em temperatura ambiente (FORMAN, 1982).

Assim, para contar as partículas emitidas, logo acima da amostra foi colocado um fino cristal de antraceno que funcionava como cintilador ao ser atingido por radiações ionizantes. Também foi instalado um tubo de lucite acima do cintilador, que permitia a transferência das cintilações para um fotomultiplicador, o qual estava localizado na parte superior do criostato. Desse modo, quando uma partícula  $\beta$  atingia o cintilador, ele emitia um sinal luminoso que se propagava pelo tubo de lucite até chegar ao fotomultiplicador, o qual, por sua vez, emitia um sinal elétrico para um analisador de altura de pulsos (WU et al., 1957). Por meio dos dados fornecidos pelo analisador de altura de pulsos se obtinham informações a respeito de quantas partículas foram emitidas e em que direções elas foram emitidas.

De acordo com Wu et al. (1957), Wu (1996), Forman (1982) e Hammond (2010), o experimento foi feito da seguinte maneira: utilizou-se uma amostra misturada em nitrato de cério e magnésio protegida por um invólucro de cristais desse nitrato dentro do criostato. Para resfriar e polarizar a amostra, colocou-se um eletroímã próximo ao criostato, provocando um campo magnético de aproximadamente 2,3 T. O calor produzido nesse processo foi removido por meio do hélio líquido, que circundava o recipiente de vidro contendo a amostra. Após a polarização, esse eletroímã foi suavemente retirado das proximidades do criostato; assim, a amostra foi resfriada até alcançar uma temperatura da ordem de 0,003 K.

Em seguida, envolveu-se o criostato com um solenoide para orientar os spins dos átomos em uma das direções, para cima ou para baixo, dependendo do sentido da corrente elétrica que circulava no solenoide. Por exemplo: se a corrente estava circulando no sentido horário, os spins se alinhavam para baixo; se circulasse no

3. Na época, a radiação  $\beta$  já era compreendida como elétrons (BATISTA, 1999).

4. Foi utilizado o nitrato de cério e magnésio, composto magnético que emite calor ao ser submetido à ação de um campo magnético e absorve calor quando o campo é removido (SZPAK, 2009).

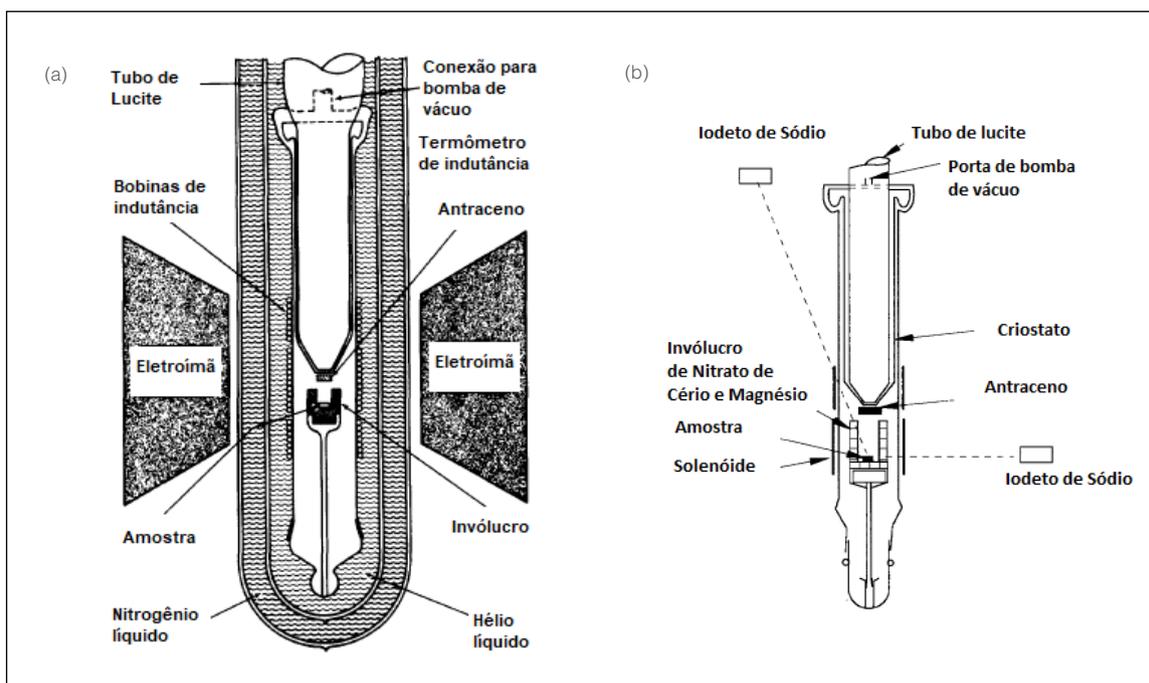
5. Dispositivo que controla ou mantém baixas temperaturas. Um criostato de pesquisa é um recipiente de forma complexa, feito para receber líquidos criogênicos (que produzem baixa temperatura) como nitrogênio e hélio líquidos (CHAVES, 2012).

sentido anti-horário, os spins se alinhariam para cima. O campo magnético vertical, provocado pelo solenoide, não reaquecia o sal arrefecido magneticamente, porque era cerca de cinquenta vezes mais fraco do que o campo horizontal do ímã maciço de resfriamento. Aliado a isso, o sal utilizado – nitrato de cério e magnésio – tem uma susceptibilidade magnética extremamente baixa ao longo de uma direção, nesse caso vertical. Após o alinhamento, dava-se início à contagem das partículas emitidas por meio do sistema de detecção formado pelo cintilador, o tubo de lucite, o fotomultiplicador e o analisador de altura de pulsos. Essa contagem foi realizada para os dois casos de alinhamentos, para cima e para baixo.

Foram instalados mais dois detectores de cintilação, de iodeto de sódio, um no plano equatorial e outro perto do topo do criostato, para medir os raios  $\gamma$  emitidos no decaimento. A anisotropia de raios  $\gamma$  observada foi utilizada como medida de polarização e de temperatura. Para o controle de temperatura também foi utilizada uma bobina de indução, parte de um termômetro magnético, a fim de determinar a temperatura da amostra. Até que se chegasse ao uso desse aparato experimental e à realização do experimento, foram necessários aprimoramentos para que tudo funcionasse, tanto como o caso supracitado de aquecimento da amostra como na estrutura do criostato, que previamente foi projetada em metal para evitar problemas com a superfluidez do hélio líquido e que, depois de testes frustrados, foi reconstruída completamente com vidro, revestida de grafite para que a luz externa não atingisse os detectores. Nos primeiros testes com a estrutura em vidro, houve vazamento de hélio e problemas com o invólucro da amostra, até que esse problema foi resolvido e pôde-se dar sequência ao experimento (FORMAN, 1982; CREASE; MANN, 1996). Na Fig. 2, é apresentado um diagrama esquemático de parte do aparato utilizado por Wu e seus colaboradores.

Em 27 de dezembro de 1956, uma explosão de entusiasmo misturou-se com uma onda de dúvida. Os resultados iniciais indicaram a assimetria que eles estavam procurando, mas experiências repetidas não duplicaram o primeiro resultado. Depois de dias de testes cuidadosos, Wu e sua equipe estavam convencidos de que um menor número de elétrons foi emitido na direção do spin nuclear do que na direção contrária, sinal de que a paridade não foi conservada. O impossível era possível: a paridade não foi conservada. Esse resultado, é claro, erradicou o problema  $\Theta - \tau$ : era realmente apenas uma partícula o tempo todo, agora chamada de Káon, que pode decair de duas maneiras diferentes.

Lederman, em um almoço com físicos de Columbia, ouviu a respeito dos resultados do grupo de Wu. Ele sabia que certas cadeias de decaimento de píons e múons poderiam fornecer outra evidência de violação de paridade. Em experiências, ele e mais alguns pesquisadores observaram decaimentos de partículas que só poderiam ser possíveis se a paridade fosse violada (GARWIN; LEDERMAN; WIENRICH, 1957).



Fonte: (a) adaptado de WU et al. (1957). (b) adaptado de Forman (1982).

**Figura 2:** Representação esquemática de uma parte do experimento realizado por Wu (1996).

Um fato relevante desse episódio histórico é relatado por Wróblewski, que afirma que nem Wu, nem Lederman foram os primeiros a investigar experimentalmente casos em que a questão da violação da paridade aparecia. Um grupo de pesquisadores da Itália, Castagnoli, Franzinetti e Manfredini, já acompanhava essa questão desde a conferência em Rochester em abril. Eles fizeram um experimento parecido com o de Lederman; no entanto, não assumiram a quebra de paridade em seus resultados (HAMMOND, 2010). Isso não é surpreendente, pois, na época, duvidar da conservação da paridade não era algo comum. Alguns cientistas até acreditavam que era perda de tempo investigar essa questão.

Após a conclusão dessas experiências, foi realizado outro teste por Wu, Ambler, Hayward, Hoppes e Hudson, usando  $^{58}\text{Co}$ , que é um emissor de pósitrons. Nesse caso, os pósitrons foram emitidos preferencialmente na direção oposta à dos elétrons, ou seja, as partículas  $e^+$  são preferencialmente emitidas ao longo do sentido de seu eixo de rotação. Isso forneceu uma confirmação adicional da conjectura de Lee e Yang e apoiou a nova hipótese que estava sendo desenvolvida na época para explicar a não conservação da paridade (HUDSON, 2001).

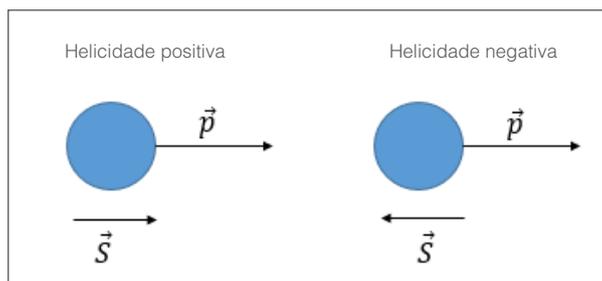
A evidência experimental da violação da paridade no decaimento  $\beta$  foi significativa a ponto de receber um Prêmio Nobel para a proposta teórica dos físicos Tsung Dao Lee e Chen-Ning Frank Yang, em 1957. No entanto, embora tenha recebido indicações, Wu não foi incluída na premiação (MAIA FILHO; SILVA, 2019b). Uma das justificativas dadas, de acordo com Chiang (2014), apresentada por Maia Filho e Silva (2019b), é o fato de que os colaboradores do experimento, Amber, Hayward, Hudson e Hoppes, sentiriam-se meros técnicos perante a premiação de Wu, que apareceria como a personagem em destaque no experimento. De acordo com Maia Filho e Silva (2019b), Wu sofreu segregação hierárquica, sendo o não agraciamento do Prêmio Nobel um reflexo dessa segregação pela sub-representação das mulheres nas áreas científicas e tecnológicas.

### COMPORTAMENTO DA PARIDADE NAS INTERAÇÕES FRACAS: RESOLVENDO O PROBLEMA...

Depois das evidências da violação da paridade, outras questões relacionadas ao fenômeno ainda precisavam ser esclarecidas. Por exemplo, na época, os neutrinos provenientes do decaimento  $\beta$  eram descritos pela equação de Dirac, porém essa equação havia sido proposta para explicar um férmion massivo, cuja função de onda para descrevê-lo possuía quatro componentes. No entanto, o neutrino era desprovido de massa. Assim, bastariam apenas dois componentes para descrevê-lo. Desse modo, surgiu a teoria dos dois componentes do neutrino e o conceito de helicidade, cujas ideias iniciais foram apresentadas nos artigos independentes de 1957, de Lee e Yang, de Salam e de Landau (LEE; YANG, 1957; BASSALO, 1994).

A helicidade foi definida como o produto escalar do spin e do momento linear, dividido pelo produto do módulo dessas grandezas. Assim, se a helicidade é negativa, significa que o spin e o momento linear são antiparalelos; se é positiva, significa que as grandezas são paralelas, conforme representado na Fig. 3.

A teoria dos dois componentes do neutrino implicava que os antineutrinos seriam destros, ou de helicidade positiva, e todos os neutrinos seriam canhotos, ou de helicidade negativa. Em outras palavras, os neutrinos apresentam spin antiparalelo ao momento linear e os antineutrinos apresentam o spin paralelo ao momento linear. Essa previsão teórica foi testada um ano depois, em 1958, por Goldhaber, Grodzins e Sunyar, que mediram a helicidade de neutrinos e obtiveram resultados que concordavam com a teoria (BASSALO, 1994; LESOV, 2009).



Fonte: Adaptada de Pires e Carvalho (2014).

**Figura 3:** Representação de casos de helicidade positiva e helicidade negativa.

Assim, o fato de que os elétrons são emitidos preferencialmente em uma direção oposta ao seu spin significa ser mais provável sua helicidade ser negativa do que positiva. Em outras palavras, a experiência de Wu e colaboradores demonstrou que os elétrons têm tendência a serem canhotos<sup>6</sup>. Após os resultados de Wu e sua equipe, a teoria da interação fraca ainda não estava estabelecida e buscava por respostas para questionamentos cruciais. Além disso, a questão da helicidade do neutrino colocava em dúvida a conceituada interação S e T (escalar e tensor), que era utilizada para descrever o decaimento  $\beta$ . Assim, em 1958, surgiu a teoria V - A, que explicou melhor essa interação. Isso implica que os processos fracos, como o decaimento  $\beta$ , têm contribuições de vetores (V), com constante de acoplamento GV, e de pseudovetores, ou vetores axiais (A), com constante de acoplamento GA (PLEITEZ, 2008).

A Teoria de Fermi na forma V - A foi resultado de reformulações para se adequar às questões da paridade e da carga. Essa reformulação teve a contribuição de físicos como Sudarsham e Marshak, Feynman e Gell-Mann, e Sakurai (BATISTA, 1999). Na reformulação feita por Feynman e Gell-Mann, em 1958, aparece a hipótese de um bóson mediador das interações fracas. Todas as interações fracas surgem da interação de uma corrente  $J_\mu$  com ela mesma, possivelmente via um méson, vetor carregado intermediário, com grande massa (FEYNMAN; GELL-MANN, 1958).

Feynman e Gell-Mann, com base nos dados experimentais da época, consideraram apenas as correntes fracas carregadas, pois os dados experimentais da época não indicavam a presença de fenômenos com correntes neutras. Desde 1933, a Teoria de Fermi do decaimento  $\beta$  assumia que as interações fracas eram produzidas apenas por correntes carregadas, ou seja, induziam processos nos quais ocorriam mudanças na carga elétrica. Nessa teoria, o decaimento- $\beta$  é descrito como a transformação de um núcleo "pai", caracterizado pelos números de massa A e atômico Z, e um núcleo "filho" com o mesmo número de massa, A, mas com número atômico Z + 1 e a emissão espontânea de um elétron e um antineutrino do elétron. Isso implica uma mudança de carga elétrica no núcleo (FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007). Eles levaram em consideração os dados experimentais para elaborar a proposta. No entanto, às vezes, como enfatizado por Dirac, a beleza matemática poderia levá-los a novas intuições físicas que somente mais tarde poderiam ser expressadas por experimentos (LEITE LOPES, 1998).

A forma V - A se estabeleceu não só para explicar o decaimento  $\beta$ , mas como explicação para todos os fenômenos relacionados à interação fraca conhecidos até o momento. A natureza vetorial das interações fracas era compatível com a forma vetorial da interação eletromagnética, o que levou à reflexão de que, de alguma maneira, essas interações poderiam estar relacionadas (CREASE; MANN, 1996).

Essa hipótese deu início aos estudos que começaram a cogitar a existência de bósons mediadores para a interação fraca, uma vez que a interação eletromagnética era mediada por um bóson, o fóton. Esses estudos foram se desenvolvendo e, após muitas contribuições teóricas, experimentais e extracientíficas, hoje sabe-se que as interações fracas são mediadas por três bósons, os  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ , descritos pela Teoria Eletrofraca, que apresenta as interações eletromagnéticas e fracas como aspectos de uma única interação, a Interação Eletrofraca.

## CONSIDERAÇÕES

Por meio desta composição histórica, é possível identificar o processo de desenvolvimento do conhecimento científico que esclareceu os questionamentos a respeito do comportamento da paridade nas interações fracas. Apresentando os aspectos históricos e epistemológicos desse desenvolvimento, é possível evidenciar uma imagem de Ciência que procura retratar uma imagem realista do trabalho científico, no qual cientistas, homens e mulheres, contribuem entre si para o desenvolvimento científico.

Desse modo, problematiza-se a noção de senso comum de cientistas como gênios, do sexo masculino, ocidentais, que trabalham sozinhos no desenvolvimento da Ciência. Nesta composição textual, é possível identificar a relevância do trabalho colaborativo e as dificuldades encontradas nas atividades experimentais; destaca-se o papel desempenhado pela pesquisadora Chien-Shiung Wu, que buscou especialistas e chefou a equipe experimental que elucidou o comportamento da paridade nas interações fracas. Além disso, trata-se de uma pesquisadora de relevantes contribuições para a Mecânica Quântica, de tal forma que se defende que a participação feminina na Ciência seja devidamente reconhecida e incentivada, a fim de que se promova a visibilidade e a inclusão das mulheres na Ciência – principalmente nas Ciências da Natureza e Engenharias –, que por tanto tempo tem sido ofuscada e/ou negligenciada diante do papel masculino.

---

6. Esse trabalho experimental é descrito neste artigo pelo fato de que essas informações podem ser utilizadas em abordagens didáticas que envolvam a simulação virtual desse experimento (ver <https://drive.google.com/drive/folders/1d2S4zlokYL9AZchc3dremIPQtSaEgrsl?usp=sharing>).

Ademais, fica representado nesta composição histórica o papel dos experimentos no desenvolvimento científico, no qual não assumem o papel de protagonistas e decisivos. O próprio resultado aqui discutido ilustra isso, uma vez que múltiplos e diferentes testes experimentais foram feitos e que a relação dos experimentos com as proposições teóricas é indissociável. A ênfase dada em aspectos experimentais, neste texto, deve-se ao desejo de aprofundamento da compreensão a respeito do processo experimental para a detecção do fenômeno. Esse detalhamento permitiu a elaboração de uma simulação virtual desse experimento histórico<sup>7</sup>, que, juntamente com a abordagem histórico-didática, tem uma função pedagógica para o ensino de Física.

A abordagem histórica de tópicos de Física Moderna propicia explicitar o trabalho científico como um processo colaborativo e contínuo, rompendo com a ideia do conhecimento científico imutável e permitindo que se perceba a Ciência como uma construção humana, dinâmica e desenvolvida perante um contexto histórico, cultural, político e social.

Espera-se que este material possa servir de base para propostas didáticas, bem como um recurso para a disseminação do conhecimento científico relacionado ao estudo da paridade nas interações fracas, que provê o entendimento do processo de construção desse conhecimento, levando em consideração os aspectos históricos, epistemológicos e científicos a ele relacionados.

## CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Investigação, metodologia e recursos: Costa M e Batista IL; Escrita – rascunho: Costa M; Escrita – revisão e edição: Costa M e Batista IL.

## DISPONIBILIDADE DE DADOS

Não se aplica

## FINANCIAMENTO

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

## AGRADECIMENTOS

As autoras gostariam de agradecer à Equipe Multidisciplinar composta pelo professor Dr. Jacques Duílio Brancher, pelo programador Yago Henrique Pereira e pelo designer Murilo Crivellari Camargo, que colaboraram na elaboração das simulações computacionais elaboradas com base na composição histórica. Também agradecem ao grupo de pesquisa IFHIECEM pelo apoio e colaboração.

## REFERÊNCIAS

ABDALLA, M. C. B. Sobre o Discreto Charme das Partículas Elementares. **Física na Escola**, v. 6, n. 1, p. 38-44, 2005.

BASSALO J. M F. Partículas Elementares: do átomo grego à supercorda. In: CARUSO, F.; SANTORO, A. **Do átomo grego à Física faz Interações Fundamentais**. Rio de Janeiro: Editora Aiafex, 1994.

BATISTA, I. L. **A teoria universal de Fermi**: da sua formulação inicial até a reformulação V-A. 1999. 122 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Departamento de Filosofia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

---

7. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1d2S4zlokYL9AZchc3dremIPQtSaEgrsl?usp=sharing>. Na pasta compartilhada pelo link também se encontram as instruções.

- BATISTA, I. L. A teoria de Fermi para o decaimento beta: da sua formulação inicial à sua universalização. In: PESSOA JR. O. (org.). **Fundamentos da Física 2**: Simpósio David Bohm. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2001. p. 107-118.
- BATISTA, I. L. O ensino de teorias físicas mediante uma estrutura histórico-filosófica. **Ciência e Educação**, Bauru, v. 10, n. 3, p. 461-476, 2004. <https://doi.org/10.1590/S1516-73132004000300010>
- BATISTA, I. L. As partículas estranhas e a Teoria Universal de Fermi. In: PIETROCOLA, M.; FREIRE JR., O. (orgs.). **Filosofia, ciência e história**: uma homenagem aos 40 de colaboração de Michel Paty com o Brasil. São Paulo: Editora Discurso, 2005. p. 437-471.
- BATISTA, I. L. History and philosophy of science improving interdisciplinary teacher knowledge. In: SEROGLU, F.; KOULOUNTZOS, V.; SIATRAS, A. (eds.). **Science and culture**: promise, challenge and demand-proceedings of the 11th international IHPST and 6th Greek history, philosophy and science teaching joint conference. Thessaloniki: Epikentro Publications, 2011.
- BATISTA, I. L. Uma adoção da história e filosofia da ciência no desenvolvimento dos saberes docentes interdisciplinares. In: BATISTA, I. L. (org.). **Conhecimentos e saberes na educação em ciências e matemática**. Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 2016. 372 p.
- BETHE, H. A. The meson theory of nuclear forces. **Physical Review**, v. 57, p. 260-272, 1940. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.57.260>
- BETHE, H. A.; NORDHEIM, L. W. On the theory of meson decay. **Physical Review**, v. 57, p. 998-1006, 1940. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.57.998>
- CHASE. C. T. The scattering of fast electrons by metal II. Polarization by double scattering at right angle. **Physical Review**, v. 36, 1930. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.36.1060>
- CHAVES, A. S. **Desenvolvimento de um Criostato para Caracterização Elétrica de GaAs Semi-isolante**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2012.
- CHIANG, T. C. **Madame Chien-Shiung Wu**: the first lady of Physics research. Tradução Frank Wong Tang-Fong. Singapore: World Scientific, 2014.
- COSTA, M. **Experimentos históricos em ambiente virtual**: uma abordagem histórico-didática a respeito da teoria eletrofraca para o estudo de física de partículas no Ensino Superior. 2019. 423 f. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) – Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.
- COSTA, M.; BATISTA, I. L. Abordagem histórico-didática para o ensino da teoria eletrofraca utilizando simulações computacionais de experimentos históricos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 37, n. 1, p. 242-262, 2020. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2020v37n1p242>
- COSTA, M.; BATISTA, I. L. Composição histórica da teoria eletrofraca: da reformulação V-A à detecção dos bósons  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ . **Ensino & Multidisciplinaridade**, São Luís, v. 7, n. 1, p. 57-77, 2021. <https://doi.org/10.18764/2447-5777v7n1.2021.4>
- COSTA, M. et al. Simulações virtuais de experimentos históricos para o ensino da teoria eletrofraca. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 38, n. 1, p. 346-404, 2021. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2021.e72923>
- COX, R. T. et al. Apparent evidence of polarization in a beam of  $\beta$ -rays. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 14, 1928. <https://doi.org/10.1073/pnas.14.7.544>
- CREASE R. P.; MANN C. C. **The second creation**: makers of the revolution in twentieth century physics. New Jersey: Rutgers University Press, 1996.
- FEYNMAN, R. P.; GELL-MANN, M. Theory of the Fermi Interactions. **Physical Review**, v. 109, p. 193-198, 1958. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.109.193>

- FORATO, T. C. M.; MARTINS, R. A.; PIETROCOLA, M. Enfrentando obstáculos na transposição didática da história da ciência para a sala de aula. In: PEDUZZI, L. O. Q.; MARTINS, A. F. P.; FERREIRA, J. M. H. (org.). **Temas de história e filosofia da ciência no ensino**. Natal: EdUFRN, 2012. v. 1. 372 p.
- FORMAN, P. The fall of parity. **The Physics Teacher**, v. 20, n. 5, p. 281-288, 1982. <https://doi.org/10.1119/1.2341037>
- FORTES, E. C. F. S.; TIJERO, M. C.; PLEITEZ, E. V. A descoberta das correntes neutras das interações fracas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. São Paulo, v. 29, n. 3, p. 415-435, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172007000300014>
- FRANKLIN, A. **The neglect of experiment**. New York: Cambridge University Press, 1986.
- FRANKLIN, A. **Experiment right or wrong**. New York: Cambridge University Press, 1990.
- GARWIN, R. L.; LEDERMAN, L. M.; WEINRICH, M. Observation of the failure of conservation of parity and charge conjugation in meson decays: the magnetic moment of the free muon, **Physical Review**, v. 105, p. 1415, 1957. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.105.1415>
- HAMMOND, R. **Chien-Shiung Wu: pioneering nuclear physicist**. New York: Chelsea House Publications, 2010.
- HUDSON, R. P. Reversal of the Parity Conservation Law in Nuclear Physics. In: LIDE, D. R. (ed.). **A century of excellence in measurements, standards and technology**. NIST Special Publication 958. Washington: NST, 2001.
- LEE, T. D.; YANG, C. N. Mass degeneracy of the heavy mesons. **Physical Review**, v. 102, n. 1, p. 290-291, 1956. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.102.290>
- LEE, T. D.; YANG, C. N. Parity nonconservation and a two-component theory of the neutrino. **Physical Review**, v. 105, n. 5, 1957. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.105.1671>
- LEITE LOPES, J. J. Forty years of first attempt at the electroweak unification and of the prediction of the weak neutral boson Z0. *preprint*, **Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas**, Rio de Janeiro, NF-022, 1998.
- LESOV, A. The Weak FORCE: from Fermi to Feynman. *preprint*, **arXiv**, Ithaca, arXiv:0911.0058v1 [physics.hist-ph], 31, 2009.
- MAIA FILHO, A.; SILVA, I. O experimento WS de 1950 e as suas implicações para a segunda revolução da mecânica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 41, p. e20180182-1-e20180182-10, 2019a. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0182>
- MAIA FILHO, A.; SILVA, I. A trajetória de Chien-Shiung Wu e a sua contribuição à física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 36, p. 135-157, 2019b. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2019v36n1p135>
- MARTINS, A. F. P. História e filosofia da ciência no ensino: há muitas pedras nesse caminho. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 24, p. 112-131, 2007. <https://doi.org/10.5007/%25x>
- PIRES, A. S. T.; CARVALHO, R. P. **Por dentro do átomo: física de partículas para leigos**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.
- PLEITEZ V. A física de partículas elementares e o Prêmio Nobel de Física de 2008. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 4301, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172008000400001>
- SALAM, A. Unificação das forças fundamentais. In: SALAM, A.; DIRAC, P.; HEINSENBERG, W. (orgs.). **Em busca da unificação**. Lisboa: Editora Gradativa, 1991.
- SEGRÈ, E. **Dos raios-X aos quarks: físicos modernos e suas descobertas**. Tradução W. H. Ferreira. Brasília: Universidade de Brasília, 1987. 345 p. (Coleção Pensamento Científico, n. 24.)
- SZPAK, W. Detecção acústica do efeito magnetocalórico: parâmetros que influenciam a ciclagem térmica. 2009. 195 f. Tese (Doutorado em Física) – Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.
- WU, C. S. Parity violation. In: NEWMAN, H. B.; YPSILANTIS, T. **History of original ideas and basic discoveries in particle physics**. New York: Plenum Press, 1996.
- WU, C. S. et al. Experimental test of parity conservation in beta decay. **Physical Review**, v. 105, p. 1413-1415, 1957. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.105.1413>