



Márcia da Costa
Irinéa de Lourdes Batista
(organização)

TEORIA ELETROFRACA

história, simulações virtuais
e abordagens didáticas

 EDUFES

Márcia da Costa
Irinéa de Lourdes Batista
(organização)

TEORIA ELETROFRACA

história, simulações virtuais
e abordagens didáticas

 **EDUFES**

Vitória, 2025



**Universidade Federal
do Espírito Santo**



Editora Universitária – Edufes

Filiada à Associação Brasileira
das Editoras Universitárias (Abeu)

Av. Fernando Ferrari, 514
Campus de Goiabeiras
Vitória – ES · Brasil
CEP 29075-910

+55 (27) 4009-7852
edufes@ufes.br
www.edufes.ufes.br

Reitor

Eustáquio Vinicius Ribeiro de Castro

Vice-reitora

Sonia Lopes Victor

Chefe de Gabinete

Ana Paula Santana de Vasconcellos Bittencourt

Diretor da Edufes

Wilberth Salgueiro

Conselho Editorial

Ananias Francisco Dias Junior, Eliana Zandonade, Eneida Maria Souza Mendonça, Othon Souto Campos, Fátima Maria Silva, Gleice Pereira, Graziela Baptista Vidaurre, José André Lourenço, Marcelo Eduardo Vieira Segatto, Margarete Sacht Góes, Rogério Borges de Oliveira, Rosana Suemi Tokumaru, Sandra Soares Della Fonte

Secretaria do Conselho Editorial

Douglas Salomão

Administrativo

Josias Bravim, Washington Romão dos Santos

Seção de Edição e Revisão de Textos

Fernanda Scopel, George Vianna,
Jussara Rodrigues, Roberta Estefânia Soares

Seção de Design

Juliana Braga, Samira Bolonha Gomes,
Willi Piske Junior

Seção de Livraria e Comercialização

Adriani Raimondi, Ana Paula de Souza Rubim,
Dominique Piazzarollo, Marcos de Alarcão,
Maria Augusta Postinghel

Produção Cultural

Déborah Pinto Corrêa



Este trabalho atende às determinações do Repositório Institucional do Sistema Integrado de Bibliotecas da Ufes e está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional.

Para ver uma cópia desta licença, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Preparação de texto

Héber Oliveira Dias e Jussara Rodrigues

Projeto gráfico, diagramação e capa

Juliana Braga

Revisão de texto

Fernanda Scopel Falcão

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Editora Universitária – EDUFES, ES, Brasil)

T314 Teoria Eletrofraca [recurso eletrônico] : história, simulações virtuais e abordagens didáticas / Márcia da Costa, Irinéa de Lourdes Batista (org.). - Dados eletrônicos. - Vitória, ES : Edufes, 2025.

193 p. : il. ; 21 cm.

Inclui bibliografia.

ISBN: 978-85-7772-646-2

Também publicado em formato impresso.

Modo de acesso: <https://repositorio.ufes.br/handle/10/774>

1. Física. 2. Física moderna. 3. Ensino. I. Costa, Márcia da.
II. Batista, Irinéa de Lourdes.

CDU: 53

Elaborado por Ana Paula de Souza Rubim – CRB-6 ES-000998/O

Esta obra foi composta com as famílias tipográficas
Crimson Text e Montserrat.

SUMÁRIO

Apresentação	7
Composição histórica da Teoria Eletrofraca	9
<i>Márcia da Costa</i>	
<i>Irinéa de Lourdes Batista</i>	
Simulações computacionais de experimentos históricos da Teoria Eletrofraca	79
<i>Márcia da Costa</i>	
<i>Murilo Crivellari Camargo</i>	
<i>Yago Henrique Pereira</i>	
<i>Irinéa de Lourdes Batista</i>	
<i>Jacques Duílio Brancher</i>	
Abordagem didática para o ensino da Teoria Eletrofraca	101
<i>Márcia da Costa</i>	
<i>Irinéa de Lourdes Batista</i>	
<i>Etiane Ortiz</i>	
Apêndice A – Organizador prévio	135

Apêndice B – Material de apoio para a realização do experimento 1	143
Apêndice C – Material de apoio para a realização do experimento 2.....	149
Apêndice D – Material de apoio para a realização do experimento 3.....	159
Apêndice E – Texto final	167
Índice remissivo	187
Sobre as autoras e os autores.....	189

APRESENTAÇÃO

A contextualização no ensino das ciências — seja por meio de abordagens históricas, filosóficas, sociológicas ou outras — é fundamental para o processo de aprendizagem. No entanto, há um desafio claro: a escassez de materiais didáticos voltados para essa finalidade na formação e na prática docente, especialmente em português, já que muitas referências estão disponíveis apenas em outros idiomas. Esse quadro impulsionou a elaboração e a divulgação deste livro, no contexto educacional nacional, que oferece composições histórico-epistemológicas capazes de favorecer um processo de ensino e aprendizagem mais contextualizado, democrático e motivador.

Nesse sentido, com o objetivo de oferecer uma alternativa a estudantes e a professores que atuam em sala de aula para a abordagem de conceitos de Física Moderna, em seu primeiro capítulo, ele traz uma composição histórica da *unificação eletrofraca*. Já no segundo capítulo, são apresentadas *três simulações* que permitem o contato virtual com experimentos históricos da Física de Partículas, uma vez que a maioria desses experimentos é irreproduzível em sala de aula. Completam a obra *unidades didáticas* que se servem tanto da composição histórica quanto das três simulações, as quais podem ser exploradas em conjunto ou separadamente, a depender do objetivo e do interesse de professores.

Desse modo, este livro convida leitores a conhecer episódios da história do desenvolvimento da *Teoria Eletrofraca*, uma relevante teoria de unificação de duas das quatro interações fundamentais da natureza (a eletromagnética e a fraca), e oferece alternativas para a exploração desse conteúdo em sala de aula.



COMPOSIÇÃO HISTÓRICA DA TEORIA ELETROFRACA

Márcia da Costa
Irinéa de Lourdes Batista

A “composição histórica” é uma metodologia que reúne elementos históricos e historiográficos, epistemológicos, axiológicos e científicos para a inteligibilidade de um conteúdo com fins pedagógicos e de disseminação de conhecimentos¹. “Composição” foi uma palavra escolhida não só pelo seu significado — “modo pelo qual os elementos constituintes do todo se dispõem e integram” (BATISTA, 2016) —, mas também porque, traduzida em inglês (*composition*), espanhol (*composición*) e francês (*composition*), tem grafia e significado similares, o que será uma vantagem para a eventual utilização deste material em outros idiomas.

Os conceitos condutores do processo metodológico de composição histórica são a inteligibilidade, os valores cognitivos e a fidedignidade da informação. Seu objetivo é elaborar uma abordagem que explicita a epistemologia de um fenômeno ao longo da evolução de seu entendimento, inspirando-se na perspectiva da *história-problema*, de Fernand

1 Este capítulo originou-se da tese de doutorado de Márcia da Costa: “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).

Braudel. Ao mesmo tempo, uma análise comparada problematizadora da explicação contemporânea e científica para esse mesmo fenômeno é feita, considerando possíveis paralelos e semelhanças entre episódios históricos e o raciocínio de estudantes em sala de aula.

Tal método se difere de reconstruções históricas por seu foco e compromisso pedagógico em mediar conteúdos histórico-científicos a públicos-alvo de distintos níveis educacionais e por não ser elaborada somente com base em fontes primárias. Dado que não é fruto do trabalho de um historiador, ela também pode ser elaborada a partir de fontes secundárias produzidas por especialistas em história da ciência.

Seu desenvolvimento pode contribuir com explicitações e aprofundamentos na integração da história e filosofia da ciência com o ensino de ciências e matemática. Trata-se de um instrumento frutífero para a formação de professores, seja ela inicial, seja continuada, que auxilia na construção do conhecimento desses profissionais, tornando-os capazes de transformar o senso comum mediante a exposição de justificativas científicas e ensinar teorias científicas utilizando uma estrutura histórico-filosófico-cognitiva, a partir de uma argumentação que favoreça o ensino crítico e a autonomia intelectual (BATISTA, 2009, 2016).

Com base nesses argumentos, é apresentada a seguir uma composição histórica a respeito da unificação das interações eletromagnética e fraca, com o objetivo de auxiliar os estudantes no entendimento desse tema. O texto destaca experimentos marcantes nesse processo de unificação e pode ser utilizado, com as devidas adequações, como recurso didático nas aulas de Física ou como alternativa de disseminação científica de temas relacionados à Física de Partículas.

A física das interações fracas até 1950

Ao estudar o desenvolvimento da Física, percebe-se que, com o passar do tempo, ela conseguiu unificar fenômenos que pareciam distintos.

A unificação na Física é uma maneira de interpretar fatos aparentemente diferentes como aspectos de um mesmo fenômeno fundamental (SALAM; DIRAC; HEISENBERG, 1991).

A unificação das interações fundamentais foi tema de uma das primeiras lições proferidas em memória de Paul Dirac, em 1988, pelo físico paquistanês Abdus Salam (1991), e uma parte dessa lição está reproduzida nos parágrafos seguintes.

A primeira unificação refere-se às leis que determinam os movimentos terrestres e celestes, tendo sido Al-Biruni o primeiro pensador a afirmar, por volta de 990 a.C., que os fenômenos físicos no Sol, na Terra e na Lua obedeciam às mesmas leis. Essa mesma ideia foi repetida e demonstrada por Galileu, em 1610, que utilizou um telescópio para observar que o aparecimento de sombras na Lua seguia as mesmas leis que se aplicavam ao fenômeno na Terra. Depois, em 1680, Newton estabeleceu que a força gravitacional terrestre, que faz com que objetos sejam atraídos para o centro da Terra, e a força gravitacional celeste, que faz com que os planetas se mantenham em movimento em torno do Sol, são de mesma natureza.

A próxima unificação entre forças deu-se 150 anos mais tarde com as interações elétrica e magnética. Antes de 1820, essas forças eram vistas como distintas. Faraday e Ampère foram os primeiros a apresentá-las como aspectos de uma única interação, a eletromagnética. Por exemplo, ao se colocar um elétron nas proximidades de outro elétron parado, percebe-se a presença de uma força elétrica repulsiva, no entanto, se esse elétron for colocado em movimento, manifesta-se uma força magnética. O que diferencia uma da outra é um fator ambiental, determinado pela situação de repouso ou movimento do elétron. Essa unificação promoveu a base da tecnologia das correntes e dos motores elétricos e viabilizou a construção de estações de produção de eletricidade.

O eletromagnetismo clássico culminou, cinquenta anos mais tarde, nos trabalhos de Maxwell, que sugeriu que, se uma carga elétrica fosse acelerada, ela emitiria uma energia de natureza eletromagnética.

Usando um dispositivo experimental, ele evidenciou que a velocidade da radiação eletromagnética poderia ser expressa em termos de duas constantes que descreviam as propriedades elétricas e magnéticas do vácuo, como já havia predito teoricamente. Essa foi também uma evidência indireta da unificação do eletromagnetismo e da óptica. A evidência direta da radiação eletromagnética produzida por cargas aceleradas foi obtida, dez anos após a morte de Maxwell, por Hertz e tornou-se a base de diversas tecnologias do século XX, como o rádio, a televisão e os raios X.

Outro personagem relevante nas unificações da Física foi Einstein. Com a Teoria da Relatividade Restrita, em 1905, ele relacionou tempo e espaço em uma equação de dilatação do tempo, indicando que, do ponto de vista de um observador em repouso, o tempo passa mais lentamente para um corpo que se desloca com uma velocidade próxima à velocidade da luz. Outra consequência desse trabalho é a relação entre massa e energia, expressa pela equação $E = mc^2$. Em 1915, na Teoria da Relatividade Geral, Einstein geometrizou a Física propondo que a gravidade seria determinada pela curvatura do espaço e do tempo, ou seja, o efeito da interação gravitacional é provocado pela curvatura do espaço-tempo gerada nas proximidades de corpos massivos. Embora a ideia fosse original na época, essa interpretação de Einstein já tinha incomodado Gauss, cerca de cem anos antes. Gauss também havia pensado que o espaço poderia ser curvo e chegou a fazer um experimento para testar sua hipótese, porém, como tratou de distâncias na ordem de quilômetros, não chegou a resultados que validassem sua hipótese.

Os próximos passos foram dados pelo astrofísico Friedmann, que sugeriu, com base nas teorias de Einstein, que o universo estaria em expansão. Ao investigar essa hipótese, Hubble realizou experimentos que evidenciaram que as galáxias distantes estão se afastando aos poucos, como previsto teoricamente.

Apesar dos sucessos da Teoria da Relatividade Geral e da explicação da gravidade como curvatura do espaço-tempo, Einstein se

interrogava a respeito de uma possível ligação entre as interações eletromagnética e gravitacional. Ambas apresentam uma simetria, obedecem à Lei do Inverso do Quadrado, embora suas intensidades, comparadas às mesmas distâncias, sejam diferentes. Faraday, em 1849, também procurou, sem sucesso, por uma relação entre essas interações em experimentos.

A unificação da relatividade geral com o eletromagnetismo foi uma das ambições teóricas de Einstein, ele dedicou anos de pesquisa tentando evidenciar essa possibilidade e, ao final, não obteve resultados positivos. Isso levou alguns cientistas, como Dirac, a pensarem que não era possível a unificação das forças fundamentais.

Também vale ressaltar a tentativa de Kaluza e Klein, que propuseram um espaço-tempo com cinco dimensões com a finalidade de unificar a gravidade e o eletromagnetismo. Essa quinta dimensão deveria ser muito fina, comprimida na ordem de 10^{-33} cm, denominado comprimento de Planck². Kaluza escreveu um artigo a respeito de sua proposta e, antes de encaminhá-lo para publicação, enviou o manuscrito para Einstein, o que provocou um atraso de dois anos na publicação. No entanto, Kaluza não deu continuidade à sua pesquisa nessa área, e a ideia de dimensões adicionais do espaço-tempo não foi tomada como hipótese por outros pesquisadores daquela época. Atualmente, foi retomada a ideia de múltiplas dimensões na teoria das supercordas, que sugere a existência de dez dimensões, de modo a acomodar todas as forças em uma única força fundamental.

Segundo Morrison (2000), uma teoria unificada é simplesmente uma teoria que explica vários fenômenos diferentes usando as mesmas leis. Os exemplos de teorias unificadas que devemos considerar têm duas características comuns: (1) incorporam uma estrutura matemática que fornece um quadro abstrato e geral capaz de unir diversos

2 O comprimento de Planck corresponde à escala de comprimento em que a gravidade deve ser tratada quanticamente, em outras palavras, a escala em que ocorreria a unificação final (SALAM; HEISENBERG; DIRAC, 1993).

fenômenos sob uma única teoria; (2) essa estrutura, geralmente, apresenta um parâmetro, quantidade ou conceito teórico, que “representa” o mecanismo unificador, ou seja, o parâmetro funciona como peça necessária da estrutura teórica que facilita ou representa a unificação de fenômenos distintos.

Nos processos de unificação, distinguem-se dois tipos de unidade: *unidade redutora*, na qual dois fenômenos são identificados como sendo do mesmo tipo, por exemplo, os processos eletromagnéticos e ópticos; e *unidade sintética*, que envolve a integração de dois processos ou fenômenos distintos em uma teoria, como é o caso das interações eletromagnéticas e fracas (MORRISON, 2000).

As interações eletromagnéticas e gravitacionais eram discutidas por serem as únicas interações conhecidas até o início do século XX. As interações fracas e fortes foram conhecidas no decorrer daquele século. Ao final do século XIX, com a observação dos primeiros fenômenos relacionados à radioatividade, surgiu um novo campo de pesquisa na Física, o que proporcionou o acesso a conhecimentos a respeito da constituição e das propriedades fundamentais da matéria (BATISTA, 1999).

Em 1898, Rutherford e colaboradores já haviam distinguido dois tipos de radiação, alfa (α) e beta (β), e, em 1900, já estava estabelecido que as partículas beta eram elétrons provenientes dos núcleos atômicos instáveis. Porém, algo instigava os pesquisadores. No processo de decaimento beta, o produto resultante não apresentava quantidade de energia igual à do núcleo original (BATISTA, 1999). Diante desse problema, alguns cientistas cogitaram a ideia da violação do princípio da conservação de energia, enquanto outros defenderam o surgimento de uma nova partícula, hoje conhecida como neutrino. Pauli foi quem primeiro propôs essa hipótese, e foi Fermi quem elaborou uma teoria para a explicação desse fenômeno.

Enrico Fermi, em uma tentativa de explicar o decaimento beta em 1933, apresentou uma teoria chamada interação de Fermi, que introduzia a produção de neutrinos, proposta por Pauli, e pela qual

surgiram as primeiras noções a respeito da interação fraca (BATISTA, 2005). Essa teoria tinha como objetivo explicar o que ocorria no decaimento beta e como a interação que o provocava se comportava. Fermi, admitindo que o núcleo do átomo continha apenas prótons e nêutrons, assumiu que o elétron e o neutrino — na época não se sabia que se tratava do antineutrino — eram criados no instante do decaimento. Em analogia com a teoria eletromagnética, e porque seus cálculos estavam de acordo com as observações, ele usou a forma vetorial (V) da interação.

A recepção dessa teoria ocorreu de duas maneiras, uma positiva, com cientistas procurando aprofundar os estudos do decaimento beta e expandi-los para explicação de outros fenômenos, e uma negativa, que colocava em dúvida a existência da nova partícula proposta e sua abordagem teórica (BATISTA, 1999). 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 núcleons e investiu na possibilidade de a Teoria de Fermi ser utilizada como uma teoria universal das interações nucleares fortes. Mais tarde, em 1935, Yukawa propôs uma teoria concorrente à de Heisenberg, em que defendia a existência de uma partícula que faria a mediação das interações nucleares fortes e fracas.

Em 1937, os físicos Neddermeyer e Anderson, trabalhando com as câmaras de Wilson ao nível do mar, observaram uma partícula, a que chamaram de méson (e que depois foi renomeada para múon). Ela tinha uma massa com valor intermediário entre os valores de massa do elétron e do próton — cerca de duzentas vezes maior que a do elétron —, o que se encaixava nas previsões teóricas de Yukawa (ABDALLA, 2006). No entanto, na época, devido à 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 dois anos após sua publicação no Japão (BATISTA, 1999).

Os físicos japoneses vibraram com as evidências dessa partícula, entretanto logo perceberam que alguns pontos não se encaixavam, a começar pela vida-média do méson, que era excessivamente alta, e pelo fato de essa partícula raramente interagir com o núcleo, o que explicaria por que tais partículas podiam ser observadas ao nível do mar e até em túneis subterrâneos (SEGRÈ, 1987).

Foram os físicos italianos Conversi, Pancini e Piccioni que, em 1947, 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, mas, se capturados por núcleos leves, também decaíam como se estivessem no vácuo. Esse não era o comportamento esperado da partícula de Yukawa (SEGRÈ, 1987).

No mesmo ano, ao analisar tais resultados, Pontecorvo fez uma analogia entre o comportamento dos mésons e o decaimento beta e propôs que parte da explicação desses fenômenos devia-se à interação fraca. Essa ideia foi assumida por outros pesquisadores, que trabalharam em aprimorações no entendimento da interação fraca (BATISTA, 1999), como será visto adiante.

A Teoria de Fermi, portanto, foi utilizada por vários anos para explicar o decaimento beta, que a princípio era observado em processos naturais de decaimento. Contudo, com a observação de novos tipos de decaimentos, percebeu-se que ela não era capaz de explicá-los todos. Nesse sentido, Gamow e Teller generalizaram a interação de Fermi, que posteriormente, na década de 1950, foi aperfeiçoada pelos trabalhos de Sudarshan e Marshak, Lee e Yang, Feynman, Gell-Mann e de outros cientistas contemporâneos, estendendo-se seu campo de aplicação (BATISTA, 1999).

A interação fraca é responsável pela desintegração radioativa e pela fusão nuclear de partículas subatômicas. 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 o processo termonuclear do astro. Além disso, é ela quem

ajuda a transmutar os elementos, aumentando a diversidade 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, o que é menor que o alcance da interação forte, por um fator de 1.000 (SALAM, 1991).

Por sua vez, a interação forte é o 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 os prótons não se manteriam coesos no núcleo, impossibilitando a formação dos átomos constituintes da matéria.

A interação forte, embora tenha sido proposta em uma teoria elaborada por Yukawa em 1935 para explicar a coesão do núcleo atômico, não foi formalizada na época. No início, Yukawa pretendia explicar todas as interações nucleares por meio de sua teoria, porém, em 1940, Bethe e Nordheim mostraram que isso não era possível (BATISTA, 1999).

A interação forte só foi, finalmente, formalizada em 1973, independentemente, por, de um lado, Politzer e Gross e, de outro, por Wilczek, com a teoria da cromodinâmica quântica, uma teoria 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 e da aplicação da Teoria de Fermi.

Com efeito, a Teoria de Fermi conseguia explicar o comportamento dos mésons, enquanto Yukawa não explicava a origem desses elementos, uma vez que não eram as partículas previstas teoricamente por ele. Essa extensão da Teoria de Fermi foi o primeiro passo para a chamada teoria universal de Fermi, que em 1955 ficaria 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 suas desintegrações. Essas partículas foram observadas pela primeira

vez na década de 1950, devido ao desenvolvimento da técnica de emulsões sensíveis e da utilização de aceleradores mais sofisticados. As partículas estranhas tinham uma característica em comum, eram produzidas em abundância e em um curto intervalo de 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 das partículas eram regidos por processos físicos diferentes (BATISTA, 2005).

A produção abundante dessas partículas podia ser explicada pela interação forte, mas não o seu lento decaimento. Este era explicado pelas interações fracas. Hoje se sabe que as partículas estranhas são produzidas pela interação forte e seus decaimentos regidos pela interação fraca (BATISTA, 1999).

O quebra-cabeça θ - τ

Na matemática, a simetria de um corpo está relacionada com a totalidade de deslocamentos, conhecidos como transformações de simetria, que o corpo sofre com a finalidade de coincidir com ele mesmo no tempo e no espaço (BATISTA, 2005). Na Física, em especial na Física Quântica e, mais especificamente, na Física de Partículas, o conceito de simetria espacial é o que constitui o princípio teórico da *paridade*.

Por exemplo, suponha-se 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, constrói-se uma nova função $\psi'(x, y, z)$. Quando, ao inverter os sinais das coordenadas, não ocorre mudança de sinal na função ψ' , 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, e não pela sua soma (BATISTA, 1999).

Essa transformação de coordenadas é chamada de transformação de paridade. É equivalente a uma reflexão de espelho seguida por uma rotação de 180 graus 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 (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 em que a conservação da paridade começou a ser questionada para as interações fracas. Lee e Yang se depararam com uma situação enigmática: o “theta–tau *puzzle*”. Entre 1952 e 1953, como produto do decaimento da partícula K — hoje denominada káon —, foram evidenciadas duas partículas, aparentemente iguais, mesma massa e mesmo tempo de vida, que apresentavam decaimentos diferentes. O méson theta (θ) decaía em dois píons, enquanto o méson tau (τ) 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 validado pela Lei de Conservação da Paridade. Naquele momento, apenas alguns físicos acreditaram tratar-se de duas partículas iguais e consideraram a possibilidade de quebra da conservação da paridade, enquanto a maioria deles não viam essa como uma alternativa frutuosa e assumiam que estavam diante de partículas diferentes (LEE; YANG, 1956).

Em abril de 1956, estudantes presentes na sexta Conferência Rochester expressaram dúvidas em relação à validade universal da paridade. Intrigados com esse questionamento, Lee e Yang começaram imediatamente uma investigação sistemática do estado de conhecimento empírico a respeito do assunto e foram surpreendidos com o fato de que não havia relatos de testes experimentais que validassem a conservação da paridade em interações fracas (LEE; YANG, 1956). As experiências existentes indicavam a conservação da paridade em interações fortes e eletromagnéticas, com um alto grau de precisão, mas, para as interações fracas, essa era apenas uma hipótese extrapolada (LEE; YANG, 1956; WU, 1996). De acordo com Lee e Yang (1956), o

quebra-cabeça θ - τ poderia ser uma evidência da quebra da paridade nas interações fracas, mas, devido à escassez dos conhecimentos a respeito da natureza das partículas estranhas, a questão exigia mais exames.

Isso levou os autores a proporem quatro experimentos que pudessem decidir inequivocamente a respeito da conservação ou não da paridade nessas interações (BATISTA, 2005): a medida da distribuição angular dos elétrons originados por decaimentos β , a partir de núcleos orientados; a medida da distribuição angular dos elétrons originados no decaimento de múons polarizados; a análise da polarização longitudinal (helicidade³) de múons produzidos pelo decaimento de píons; e a análise da polarização circular de raios gama (γ) em experimentos de correlação β - γ .

Esses experimentos remetiam à procura de uma correlação da direção e 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 era considerado impraticável pelos autores. Além disso, a proposta de Lee e Yang foi rejeitada ou recebida com ceticismo, o que justifica o fato de poucos laboratórios terem se empenhado nesses testes experimentais. Os próprios autores chegaram a publicar um artigo logo após a proposta da quebra de paridade em que assumiam a conservação da paridade, o que leva a cogitar que nem eles estavam convictos da própria ideia ou que estavam se protegendo da crítica dos cientistas ortodoxos (BATISTA, 2005).

3 A helicidade é o produto escalar do spin e do momento linear dividido pelo produto do módulo dessas grandezas. Em outras palavras, pode-se definir a helicidade como a projeção do spin ao longo do momento. Se a projeção tem o mesmo sentido do momento, o vetor spin é paralelo à direção do seu momento linear, a helicidade é positiva e o spin tem orientação rotacional no sentido horário. Se tem sentido contrário, o vetor spin é antiparalelo ao seu momento linear, a helicidade é negativa e o spin tem orientação rotacional no sentido anti-horário (BATISTA, 2005).

Quem também estudava um problema semelhante era o físico brasileiro Jayme Tiomno. Em 1950, ele defendeu sua tese de doutorado na Universidade de Princeton, sob a orientação de Eugene Wigner, na qual tratou da teoria dos neutrinos e da dupla desintegração beta. Na ocasião, Tiomno apresentou possíveis combinações envolvendo o operador de projeção⁴, no entanto descartou uma delas por violar o princípio da conservação da paridade. 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 em Física Nuclear, comentou, em um trabalho publicado, que, depois de ela e seus colaboradores do National Bureau of Standards (NBS) terem desenvolvido o primeiro teste experimental que evidenciou a violação da paridade em 1956, ainda recebeu uma carta de Pauli, na qual ele dizia acreditar que os resultados não iriam mostrar a violação da paridade. Feynman chegou a apostar abertamente que a paridade seria conservada no decaimento a ser explorado experimentalmente (WU, 1996).

Curiosamente, em pesquisas de Cox e colaboradores, em 1928, e de Chase, em 1930⁵, a respeito da polarização intrínseca de elétrons do decaimento β , já havia indícios da violação de simetria por reflexão, embora na época os autores não tivessem chegado a essa conclusão.

4 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 grandezas. Um operador de projeção define que todo vetor de estado pode ser decomposto na soma de dois vetores ortogonais (BATISTA, 1999).

5 O artigo de Cox, McIlwraith e Kurrelmeyer, "Apparent evidence of polarization in a beam of β -rays", foi publicado em *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (v. 14, n. 7, p. 544-549), em 1928; e o de Chase, "The scattering of fast electrons by metals. II. Polarization by double scattering at right angles", em *Physical Review* (v. 36, n. 6, p. 1060-1065), em 1930 (FRANKLIN, 1986).

Esses experimentos foram lembrados, anos mais tarde, depois que a violação da paridade já estava estabelecida (FRANKLIN, 1986, 1990).

Lee e Yang não encontraram os trabalhos de Cox e colaboradores e nem o de Chase — que poderiam ter fornecido de antemão algumas evidências da violação da paridade —, porque estavam procurando por experimentos que estudavam o decaimento beta e as interações fracas, enquanto os experimentos de 1928 e de 1930 investigaram a dispersão de elétrons (FRANKLIN, 1986, 1990).

Comportamento da paridade nas interações fracas

Wu começou a investigar a questão da paridade no decaimento beta após uma conversa com Lee, na qual ela perguntara ao colega a respeito dos métodos indicados para um possível teste. Lee comentou as sugestões existentes de utilização de núcleos polarizados produzidos em reações nucleares ou de um feixe de nêutrons lentos polarizados por meio de um reator. Wu analisou tais ideias e observou que seria mais eficiente utilizar núcleos de cobalto-60 polarizados pelo método de desmagnetização adiabática (HAMMOND, 2010).

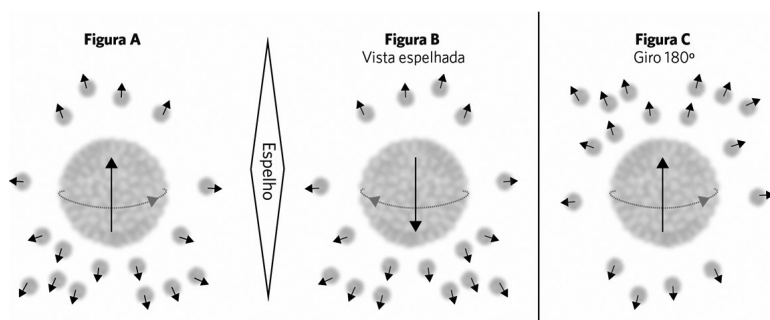
No processo de decaimento ${}_{27}^{60}\text{Co} \rightarrow {}_{28}^{60}\text{Ni} + e^{-} + \bar{\nu}_e + 2\gamma$, um dos nêutrons do núcleo do cobalto decai para um próton por emissão de um elétron (e^{-} , partícula beta) e de seu antineutrino ($\bar{\nu}_e$), transformando o núcleo de cobalto em um núcleo de níquel (${}_{28}^{60}\text{Ni}$), que por sua vez decai para seu estado fundamental com a emissão de dois raios gama (2γ , 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 alinham-se da mesma maneira que um conjunto de ímãs faria. Considerando o momento magnético resultante como uma rotação, sabe-se, a partir da discussão a respeito da paridade, que, 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 corresponderia à imagem espelhada. Se a paridade fosse conservada, então as partículas emitidas deveriam surgir em igual quantidade tanto para cima quanto para baixo. Se não, no espelho, onde a rotação é invertida, o que se observaria seria diferente; se isso acontecesse, a paridade não seria conservada. Na Figura 1, estão representados um núcleo e partículas beta (elétrons) sendo emitidas. A sequência A, B, C representa um caso de transformação de paridade em que ela é conservada.

Figura 1 – Representação de uma transformação de paridade



Fonte: Costa (2019).

Na parte A da figura, o núcleo gira no sentido anti-horário e tem o sentido de seu eixo de rotação para cima. Agora, observando a imagem espelhada (B): o sentido do giro inverte e consequentemente o sentido do eixo de rotação também é alterado. O próximo passo é girar a imagem espelhada em 180 graus (C), assim o sentido do giro e do eixo de rotação voltam ao quadro original. Isso completa uma transformação de paridade, como descrita em Paul Forman (1982).

Nas imagens A e C, o número de partículas emitidas durante o decaimento é igual, tanto na direção do eixo de rotação quanto na direção oposta. Isso representa 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 são indistinguíveis.

De acordo com Wu (1996), a Lei da Conservação da 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 obedecem às mesmas leis físicas, o que significa que 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 o 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.

Para monitorar o alinhamento dos prótons de núcleos de cobalto-60, ao iniciar as investigações, Wu sabia que precisaria trabalhar com baixas temperaturas, pois a energia térmica dos átomos desse isótopo é demasiadamente alta, o que destruiria o alinhamento. O experimento exigia, portanto, a combinação inédita de duas técnicas experimentais sofisticadas: 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. A partir de previsões teóricas, Wu chegou à conclusão de que uma temperatura de aproximadamente 0,01 K seria a ideal. Sob essa temperatura, era necessário que os núcleos fossem fortemente orientados em uma direção específica, técnica eficientemente desenvolvida nos laboratórios pioneiros em baixas temperaturas de Oxford e de Leiden. Contudo, em nenhum deles havia sido percebida a relevância do procedimento para os experimentos propostos por Lee e Yang (HAMMOND, 2010).

Como a utilização dessas técnicas já era prevista por Wu e ela não as dominava, a cientista convidou para integrar a equipe Ernest Ambler, que viera de Oxford trabalhar no Laboratório de Baixas Temperaturas do NBS de Washington (WU, 1996). Ele aceitou o convite, pois tinha feito seu doutorado justamente a respeito do alinhamento do núcleo de cobalto-60. Outros experimentalistas, Hudson, com experiência em criogenia, e Hayward e Hoppes, ambos com experiência em detecção de radiação, juntaram-se ao grupo e os testes começaram (LESOV, 2009).

O experimento era cercado de incertezas, porque havia muitas questões sem resposta e não havia garantias de que a experiência poderia ser executada (HAMMOND, 2010). Então, para realizá-la, alguns desafios foram enfrentados: o primeiro foi encontrar um mecanismo de polarização eficiente, uma vez que a temperatura da amostra deveria ser da ordem de 0,01 K. O segundo desafio consistia em conseguir um equipamento que permitisse um isolamento térmico suficiente para realizar as medidas. E 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 os pesquisadores às seguintes perguntas: como contar os elétrons⁶? Onde colocar os detectores? Qual o efeito do campo magnético? (HAMMOND, 2010; WU, 1996; WU *et al.*, 1957).

O primeiro dos desafios foi resolvido por meio de um processo de desmagnetização adiabática. Nesse processo, a amostra é misturada com um material paramagnético⁷ e submetida à ação de um campo magnético até se obter uma polarização, quase total, do sistema. Ao retirar suavemente o campo magnético, a amostra entra em

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

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

processo de resfriamento até atingir uma temperatura na ordem de 0,01 K (HAMMOND, 2010; WU, 1996; WU *et al.*, 1957).

Como as partículas beta são absorvidas muito rapidamente pela matéria, Wu tinha que encontrar uma maneira de capturá-las antes que fossem reabsorvidas pela própria fonte de onde vieram. Ela pensou em utilizar uma camada superficial fina da fonte radioativa sobre o cristal de nitrato de cério e magnésio e 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 ainda que os núcleos da camada de cobalto-60 ficassem alinhados por tempo suficiente para a realização das medidas. Porém, em poucos segundos, o alinhamento estava sendo destruído. Wu suspeitava que a camada se aquecia com o tempo, talvez devido ao calor da 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. Então, a equipe voltou seus esforços para a produção desses cristais mais espessos, que nenhum dos cientistas sabia como poderia ser feito (CREASE; MANN, 1996; HAMMOND, 2010; WU, 1996).

Para solucionar o segundo desafio, foram colocados a amostra e o detector em um tubo de vácuo, utilizando um criostato⁸ para manter o isolamento térmico até que as medidas fossem efetuadas (WU *et al.*, 1957).

As medições foram possíveis dada a solução do terceiro desafio. Wu e sua estudante de pós-graduação, Marion 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

8 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).

um tubo fotoelétrico transparente. Esse tubo era necessário, pois os fotomultiplicadores então disponíveis não funcionavam a baixas temperaturas e, conseqüentemente, a luz dos cintiladores tinha que ser detectada fora do criostato, de modo que o fotomultiplicador pudesse ser colocado em temperatura ambiente (FORMAN, 1982).

Assim, para contar as partículas emitidas, foi colocado, logo acima da amostra, um fino cristal de antraceno, que funcionava como um cintilador ao ser atingido por radiações ionizantes e, acima do cintilador, um tubo de lucite, que permitia a transferência das cintilações para um fotomultiplicador 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. Dali, um sinal elétrico era emitido para um analisador de altura de pulsos (WU *et al.*, 1957), e, por meio dos dados fornecidos, obtinham-se informações a respeito da quantidade e da direção das partículas emitidas.

De acordo com Wu e seus colaboradores (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 de nitrato de cério e magnésio dentro do criostato. Para resfriar e polarizar a amostra, colocou-se um eletroímã próximo ao criostato, criando 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 com a amostra. Após a polarização, o eletroímã foi suavemente retirado das proximidades do criostato, e 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, e, se a corrente circulasse no sentido anti-horário, os spins se alinhavam 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. E, aliado a isso, o sal utilizado, o nitrato de cério e magnésio, tem uma susceptibilidade magnética extremamente baixa ao longo de uma direção, nesse caso a direção 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 alinhamento, 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 gama emitidos no decaimento. A anisotropia de raios gama observada foi utilizada como medida de polarização e de temperatura. Para o controle e a determinação da temperatura da amostra, também foi utilizada uma bobina de indução, parte de um termômetro magnético.

Até que se chegasse a esse aparato e à realização do experimento, foram necessários aprimoramentos tanto na prevenção do aquecimento da amostra, tal qual mencionado, como na estrutura do criostato. Esta havia sido previamente projetada em metal para evitar problemas com a superfluidade do hélio líquido, mas, depois de testes frustrados, foi reconstruída completamente em vidro e revestida de grafite para que a luz externa não atingisse os detectores. Ainda assim, nos primeiros testes com a estrutura em vidro, houve vazamento de hélio e dificuldades com o invólucro da amostra (CREASE; MANN, 1996; FORMAN, 1982).

Em 27 de dezembro de 1956, uma explosão de entusiasmo misturou-se com uma onda de dúvida. Os resultados iniciais indicaram a assimetria que os cientistas 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 era emitido na direção do spin nuclear do que na direção contrária, sinal de que a paridade não foi conservada. O impossível era possível. Este resultado, é claro, forneceu evidências fortes para resolver o problema theta-tau: havia realmente apenas uma partícula o tempo todo, agora chamada de káon, que podia decair de duas maneiras diferentes.

O físico estadunidense Leon Lederman, em um almoço com físicos da Universidade 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 da violação da paridade. Em experiências, ele e mais alguns pesquisadores observaram decaimentos de partículas que só poderiam ser possíveis se a paridade fosse violada (GARWIN; LEDERMAN; WEINRICH, 1957).

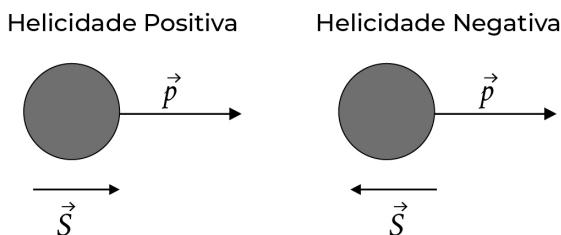
Um fato relevante desse episódio histórico é relatado pelo polonês Wróblewski, que afirma que nem Wu nem Lederman foram os primeiros a investigar experimentalmente a questão da conservação da paridade. Um trio de pesquisadores da Itália, Castagnoli, Franzinetti e Manfredini, já acompanhava essa questão desde a conferência em Rochester em abril de 1956. Eles fizeram um experimento parecido com o de Lederman, no entanto não assumiram a quebra da paridade em seus resultados (HAMMOND, 2010). Isso não surpreende, pois, como se disse, na época duvidar da conservação da paridade era algo incomum. Alguns cientistas até acreditavam que era perda de tempo investigar a questão, como os já mencionados Pauli e Feynman (WU, 1996; HAMMOND, 2010).

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

Depois das evidências da violação da paridade, outras questões relacionadas ao fenômeno ainda precisaram ser esclarecidas. Por exemplo, na época, os neutrinos provenientes do decaimento beta eram descritos pela Equação de Dirac, proposta para descrever um férmion massivo, cuja função de onda era formada por quatro componentes. No entanto, o neutrino era desprovido de massa e bastariam dois componentes para descrevê-lo. Desse modo surgiu a teoria dos dois componentes do neutrino e o conceito de helicidade, apresentado nos artigos independentes, de 1957, de Lee e Yang, de Salam e de Landau (BASSALO, 1994; LEE; YANG, 1957).

A helicidade foi definida como o produto escalar do spin e do momento linear dividido pelo produto do módulo dessas grandezas. Se a helicidade é negativa, o spin e o momento linear são antiparalelos; se é positiva, as grandezas são paralelas, conforme representado na Figura 2.

Figura 2 – Representação de casos de helicidade positiva e helicidade negativa



Fonte: Adaptada de Pires e Carvalho (2014).

A teoria dos dois componentes do neutrino implica que os anti-neutrinos são destros, ou de helicidade positiva, e todos os neutrinos são canhotos, ou de helicidade negativa. Em outras palavras, os neutrinos apresentam spin antiparalelo ao momento linear e os anti-neutrinos apresentam spin paralelo ao momento linear. Esta 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).

Assim, o fato de os elétrons serem emitidos preferencialmente em uma direção oposta ao seu spin significa que é mais provável sua helicidade ser negativa do que positiva. Em outras palavras, a experiência de Wu e seus colaboradores demonstrou que os elétrons têm tendência a serem canhotos⁹.

A teoria V-A e origens da Teoria Eletrofraca

Após os resultados de Wu e sua equipe, a teoria da interação fraca ainda não estava plenamente estabelecida e buscavam-se 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 β . Assim, em 1958 surgiu a teoria V-A, que explicava melhor essa interação.

Segundo essa teoria, os processos fracos, como o decaimento beta, têm contribuições de vetores (V), com constante de acoplamento G_V , e de pseudovetores ou vetores axiais (A), com constante de acoplamento G_A (PLEITEZ, 2008).

A Teoria de Fermi na forma V-A foi resultado de reformulações para adequá-la às questões de paridade e de carga. Essa reformulação teve a contribuição de físicos como Sudarshan, Marshak, Feynman, Gell-Mann e Sakurai (BATISTA, 1999).

Na reformulação feita por Feynman e Gell-Mann, em 1958, apareceu a hipótese de um bóson mediador das interações fracas.

9 Partículas canhotas, ou esquerdas, são aquelas que manifestam helicidade negativa, ou seja, movimentam-se no sentido contrário da orientação de seu spin. Partículas destras, ou direitas, são aquelas de helicidade positiva, que se movimentam no mesmo sentido da orientação de seu spin.

Todas as interações fracas surgem da interação de uma corrente J_μ com ela mesma, possivelmente via um méson vetor carregado intermediário com grande massa (FEYNMAN; GELL-MANN, 1958, p. 197).

Como os dados experimentais da época não indicavam a presença de fenômenos com correntes neutras, Feynman e Gell-Mann consideraram apenas as correntes fracas carregadas. Desde 1933, a Teoria de Fermi assumia que as interações fracas eram produzidas apenas por correntes carregadas, que induziam processos nos quais ocorriam mudanças na carga elétrica. Nessa teoria, o decaimento β 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, o que implica uma mudança de carga elétrica no núcleo (FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007).

Feynman e Gell-Mann levaram em consideração os dados experimentais para elaborar a proposta. No entanto, como enfatizado por Dirac, a beleza matemática poderia tê-los levado a novas intuições físicas que mais tarde poderiam ser corroboradas por experimentos (LEITE LOPES, 1988).

A forma V-A se estabeleceu para explicar não só o decaimento beta, como também todos os fenômenos relacionados à interação fraca conhecidos até o momento. A natureza vetorial da interação fraca era compatível com a forma vetorial do eletromagnetismo, o que levou os teóricos a conjecturarem se, de alguma maneira, essas forças poderiam estar relacionadas (CREASE; MANN, 1996).

A hipótese levantada por Feynman e Gell-Mann a respeito dos bósons vetoriais da interação fraca levou o físico brasileiro Leite Lopes a propor uma unificação das interações fracas e eletromagnéticas em 1958. Segundo ele, mésons, que ele chamou de X , deveriam estar relacionados com as interações eletromagnéticas, transmitidas por partículas vetoriais, os fótons. A proposta de Leite Lopes admitia que a intensidade das interações eletromagnéticas com as correntes

carregadas é igual àquela das interações fracas com as correntes correspondentes, considerando a mesma natureza geométrica para os fótons e os bósons da interação fraca (LEITE LOPES, 1958).

Para ele, os bósons vetoriais carregados e os fótons, que também são bósons vetoriais, deveriam pertencer à mesma família, assim a constante de interação eletromagnética com a matéria seria igual à constante de interação fraca com a matéria. Essa igualdade acarretava uma massa elevada para a partícula X, aproximadamente sessenta vezes a massa do próton. Assim surge a primeira estimativa do valor da massa das partículas mediadoras da interação fraca. Nesse mesmo trabalho, Leite Lopes propôs que a interação elétron-nêutron só poderia ser realizada por intermédio de um bóson vetorial neutro, hoje conhecido como Z^0 (BASSALO, 1994; LEITE LOPES, 1958, 1988).

Convém ressaltar que, ainda em 1958, trabalhos semelhantes foram realizados pelos físicos norte-americanos Bludman, Feinberg, Schwinger e Glashow, que estava em fase de doutoramento sob orientação de Schwinger. Mais tarde, em 1960, Lee e Yang também escreveram um artigo semelhante, no qual apareceram pela primeira vez os símbolos W^+ e W^- para definir os bósons carregados da interação fraca (BASSALO, 1994; LEE; YANG, 1960). Esses trabalhos abordavam cautelosamente as questões de relação entre os bósons vetoriais das interações fraca e eletromagnética e/ou a hipótese das correntes neutras devido à existência de um bóson neutro. Embora Schwinger não tenha utilizado o termo unificação, em 1956 ele já acreditava na relação entre as interações e que elas se combinariam em uma teoria de gauge, na qual o fóton e o bóson maciço deveriam ser os intermediadores (GLASHOW, 1980).

A teoria de gauge é uma classe da Teoria Quântica de Campos, que envolve tanto a mecânica quântica como a relatividade especial de Einstein e é comumente usada para descrever partículas subatômicas e seus campos. Quem a propôs foi Weyl, em 1919, para tratar transformações de escala no espaço-tempo, com a esperança de unificar as duas forças fundamentais conhecidas na época, a eletromagnética e a

gravitacional. Essa unificação não foi alcançada, mas surgiu a ideia de simetria local, que mais tarde foi utilizada por ele para mostrar que a invariância sob o grupo $U(1)$ implicava a existência do fóton e a interação eletromagnética, a partir do princípio de deixar uma simetria global se tornar local. Em uma teoria de gauge há um grupo de transformações das variáveis de campo (transformações de gauge) que deixa a física básica do campo quântico inalterada e é esta condição, que é chamada de invariância de gauge, o que dá para a teoria uma simetria que rege suas equações. Uma transformação de gauge é local, quando é dependente do ponto em que é aplicada, ou global, se é independente do ponto do espaço-tempo em que é realizada. A estrutura do grupo de transformações de gauge vai implicar restrições gerais quanto ao modo como o campo descrito por essa teoria pode interagir com outros campos e partículas elementares (LEADER; PREDAZZI, 1982).

A invariância de gauge, invariância sob uma transformação de gauge, é uma propriedade de simetria em relação a uma das cargas ou a um número quântico das partículas elementares e traz como consequência a existência de um bóson sem massa, no caso, o fóton. O procedimento para estender uma simetria global a uma simetria local é denominado de calibragem de uma simetria e requer a introdução de um novo campo, chamado de potencial de calibre, para viabilizar a substituição de derivadas parciais dos campos originais por derivadas covariantes, por isso a teoria também é conhecida como teoria de calibre. Devido à invariância frente a transformações locais, o sistema descrito se mantém invariante frente a transformações que afetam o sistema de maneiras diferentes para cada ponto do espaço-tempo (T HOOFT, 1980). Para que uma interação física seja invariante por uma simetria global e local, é necessário que se introduzam na interação considerada novos campos, chamados campos de gauge, que vêm associados a partículas de spin inteiro e sem massa (YANG; MILLS, 1954).

A ideia de que as interações fracas eram mediadas por bósons vetoriais massivos foi primeiramente do físico sueco Oskar Klein em 1938. Naquela época, Yukawa já havia proposto sua teoria a respeito

das interações fortes e fracas em termos de bósons carregados, que posteriormente foram identificados como píons. Essa teoria era uma tentativa de unificação, porém a falta de um bóson neutro impedia que se caracterizasse a unificação como uma simetria $SU(2)$ ¹⁰. Em 1938, Nicholas Kemmer previu a existência desse bóson neutro, posteriormente definido como π^0 , usando argumentos de simetria. Com base nesses conhecimentos, Klein propôs, num contexto de dimensões extras, o que agora se conhece como isospin fraco. Essa hipótese incluía o fóton e dois bósons carregados de spin 1, denotados por Klein como B^\pm . Na mesma teorização, não havia bósons neutros, mas, segundo Klein, eles poderiam ser acrescentados se fosse necessário. Percebe-se, nesses casos, um primeiro esboço de ideias que, posteriormente, vieram a fazer parte da Teoria Eletrofraca (FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007; KLEIN, 1986; SALAM, 1980).

Com a estimativa do valor da massa dos bósons vetoriais da interação fraca, feita por Leite Lopes, surgiu um problema. Como considerar os fótons e os bósons W como membros de um multipletto¹¹ com

10 Essa maneira de representação vem da Teoria de Grupos, na qual $U(n)$ representa um grupo unitário composto por matrizes unitárias de dimensão $n \times n$ unitárias, cujo número de geradores independentes é dado por n^2 . $SU(n)$ representa um grupo unitário especial, também composto por matrizes $n \times n$ unitárias, com número de geradores independentes dados por $n^2 - 1$. Verifica-se que, para cada campo de gauge, está associado um determinado grupo de gauge. No caso do eletromagnetismo temos o grupo $U(1)$; na interação eletrofraca o $SU(2) \times U(1)$; e na interação forte o $SU(3)$. $U(1)$ representa uma multiplicação por uma matriz unitária de 1×1 , com um gerador, o fóton. $SU(2)$ é definido como o conjunto de matrizes 2×2 com três geradores ($2^2 - 1 = 3$), os W e o Z^0 . $SU(3)$ é um grupo de matrizes unitárias 3×3 com oito geradores ($3^2 - 1 = 8$), os glúons (BASSALO; CATTANI, 2011).

11 Família de estados que se diferenciam um do outro por uma certa grandeza. Por exemplo, em espectroscopia, diferenciam-se pelo momento magnético; na família dos núcleons, o próton e o nêutron pertencem a um mesmo multipletto de isospin (BATISTA, 1999, p. 121).

essa diferença de massa entre eles? Outro problema estava relacionado com a hipótese das correntes neutras, pois até aquele momento não havia evidência experimental delas.

A unificação das interações fraca e eletromagnética, que estava implícita em parte dos trabalhos supramencionados, foi formalizada em 1967 por Weinberg e, independentemente, por Salam, em 1968. A ideia foi baseada na teoria de gauge proposta pelos físicos sino-norte-americano Yang e norte-americano Mills, em 1954, por meio de um mecanismo chamado de quebra espontânea de simetria (BAS-SALO, 1994). Yang e Mills elaboraram o primeiro exemplo de uma teoria de gauge não abeliana, quando o produto da transformação não é comutativo: $AB \neq BA$. Quando a ordem em que efetuamos as transformações de gauge não são importantes, dizemos que temos uma teoria de gauge abeliana. Se as transformações dependem da ordem em que são realizadas temos uma transformação não abeliana (FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007; SOARES, 2007).

A teoria de gauge não abeliana foi retomada por Yang e Mills, no contexto de isospin forte, agora envolvendo três fases locais, ou seja, em vez de um fóton, haveria três. O objetivo inicial dessa elaboração era que ela viesse a se tornar uma teoria das interações fortes. Com o passar dos anos, outros cientistas passaram a estudar a teoria de gauge na tentativa de quantizar teorias e demorou para que ela fosse aplicada para as interações fracas, pois não se sabia, até 1957, que as interações fracas eram uma mistura de interações vetoriais e pseudovetoriais (axiais), V-A (WEINBERG, 2004), produzidas por bósons vetoriais mediadores. Quem também desenvolveu uma ideia parecida com a de Yang e Mills foi um aluno de doutorado de Salam, o físico Ronald Shaw. Seu trabalho não foi publicado, ficou registrado somente em sua tese de doutorado em Cambridge. Ainda assim, em alguns casos, a teoria de Yang-Mills também é referida como teoria de Yang-Mills-Shaw (SALAM, 1980).

Desde o início, o principal obstáculo à aplicação da abordagem de Yang-Mills às teorias das interações fracas ou fortes foi o problema

da massa. A simetria de gauge não admite que os bósons de gauge tenham qualquer massa. A teoria de Yang-Mills-Shaw não poderia, portanto, descrever a interação fraca, uma vez que esta seria mediada por bósons vetoriais massivos, de spin 1, como visto anteriormente.

A teoria voltou a ser objeto de pesquisa por parte do físico Yoichi Nambu em 1960, quando ele evidenciou a quebra espontânea de simetria, usando uma analogia com a supercondutividade. Outros trabalhos, como o de Goldstone, em 1961, e o de Nambu e Jona-Lasinio, também trataram do mesmo assunto. Goldstone desenvolveu o conceito de quebra espontânea de simetria em teorias abelianas do tipo $U(1)$ e mostrou que tal quebra é acompanhada de uma ou mais espécies de partículas sem massa, chamadas desde então de bósons de Nambu-Goldstone ou bósons de Goldstone (WEINBERG, 1980, 2004).

Sabia-se que não existiam bósons sem massa na interação forte, pois, caso existissem, já teriam sido detectados. Tal conclusão parecia fechar as oportunidades oferecidas pela quebra espontânea de simetria.

O primeiro a indicar uma possível solução para a questão foi um cientista da área de Física da Matéria Condensada, Philip Anderson. Em 1963, inspirado em Schwinger, ele propôs que os bósons sem massa de Yang-Mills e de Goldstone pareciam capazes de “cancelar uns aos outros”, de modo que restariam somente os bósons de massa finita (ANDERSON, 1963). No entanto, seu artigo não foi levado a sério pelos pesquisadores da área de Física de Partículas. Klein e Lee concordavam com as ideias propostas, mas Gilbert discordava; a disputa ainda desencadeou atividades independentes dos belgas Robert Brout e François Englert e do escocês Peter Higgs (BROWN *et al.*, 1997).

Em 1964, em trabalhos independentes, dois grupos de físicos, compostos por Higgs, Englert e Brout de um lado e Guralnik, Hagen e Kibble de outro, encontraram um mecanismo que tornava massivos os bósons de Nambu-Goldstone, partindo da hipótese de que a simetria quebrada espontaneamente deveria ser local, e não global, como se considerava até então. Esse mecanismo ficou conhecido

como mecanismo de Higgs; e o bóson de spin nulo correspondente a tal mecanismo, como bóson de Higgs¹² (WEINBERG, 1980, 2004).

Em seguida, Weinberg começou a estudar as implicações da quebra espontânea de simetria para as interações fortes. Segundo ele, o objetivo era desenvolver uma teoria de gauge para a interação forte. Ele supôs que o bóson de gauge vetorial dessa teoria seria um méson denominado méson *rho*, enquanto o bóson de gauge vetorial axial seria um méson denominado méson *a1* (WEINBERG, 1980, 2004). Usando a simetria $SU(2) \times SU(2)$, ele obteve resultados em que *a1* continha massa e o méson *rho* não. Diante disso, tentou colocar massa para o méson *rho* manualmente, mas a teoria tornou-se menos preditiva e não renormalizável, o que o desanimou. Então, acreditando no potencial da teoria, Weinberg supôs que a estivesse aplicando na interação errada. O lugar certo para aplicar tais ideias não era nas interações fortes, mas nas interações fracas e eletromagnéticas.

Haveria uma simetria de gauge espontaneamente quebrada — provavelmente não $SU(2) \times SU(2)$ — levando a bósons de gauge maciços, que não estariam relacionados com o méson *a1*, mas poderiam ser identificados com os bósons mediadores da interação fraca. Era possível que algum gerador do grupo de gauge não fosse quebrado espontaneamente, e o correspondente bóson de calibre sem massa não fosse o méson *rho*, mas o fóton. A simetria de gauge seria exata e não haveria massas colocadas a mão.

12 O bóson de Higgs também ficou conhecido como “a partícula de Deus”, um apelido que teve origem no nome do livro de Leon Lederman, *The God particle*. Segundo Lederman, ele inicialmente tinha proposto o título *The goddamn particle* [A partícula maldita], em referência às dificuldades e frustrações para se encontrarem evidências da existência dessa partícula. No entanto, editores do livro sugeriram que o nome fosse alterado por questões comerciais (LEDERMAN; TERESI, 2006). Porém, o nome “partícula de Deus” propaga uma ideia equivocada da natureza do bóson de Higgs, já que ele não é uma materialização do divino nem uma evidência científica da existência de Deus.

Weinberg precisava de um modelo concreto para ilustrar essas ideias gerais. Naquela época ele não acreditava na existência dos quarks, assim decidiu levar em conta apenas os léptons e, de forma arbitrária, considerar as simetrias que agiam em apenas uma geração de léptons (elétrons e neutrinos do elétron), separadamente dos antiléptons.

Com esses ingredientes, o maior grupo de gauge que se poderia ter era $SU(2) \times U(1) \times U(1)$. Um dos $U(1)$ poderia ser considerado o grupo de gauge da conservação dos léptons. Assim, sabia-se que o número de léptons era conservado com um alto grau de precisão, então esta simetria $U(1)$ não era quebrada espontaneamente, mas também se sabia que não havia um bóson de gauge sem massa associado ao número de léptons, pois, de acordo com um argumento de Lee e Yang, ele produziria uma força que competiria com a gravitação.

Weinberg decidiu por isso excluir essa parte e ficar somente com $SU(2) \times U(1)$. Os bósons de gauge eram W^+ e W^- (partículas maciças e carregadas), Z (partícula maciça e neutra) e o fóton (partícula sem massa e neutra). As interações desses bósons entre si e com os léptons foram fixadas pela simetria de gauge. Depois dessa formulação, Weinberg fez uma revisão dos estudos publicados a respeito dos bósons mediadores entre o final dos anos 1950 e o início dos anos 1960 e percebeu que a estrutura global do grupo $SU(2) \times U(1)$ já havia sido proposta em 1961 por Glashow.

Glashow, que havia sido orientado por Schwinger, usou a teoria de Yang e Mills e deu continuidade à proposta de seu orientador. Nessa nova formulação, ele sugeriu que seria necessário mais um bóson, uma vez que na formulação de Schwinger existiam dois bósons, um da interação eletromagnética e outro da fraca (GLASHOW, 1961). Nesse mesmo trabalho, ele sugeriu a necessidade de um princípio de simetria e desejava mostrar que sua teoria era renormalizável¹³ (BROWN *et al.*, 1997; CREASE; MANN, 1996).

13 De acordo com 't Hooft (1997), a renormalização consiste em eliminar os termos infinitos de uma teoria. Ao tratar da Teoria Quântica de Campos,

Ao terminar seu trabalho, Glashow acreditava ter mostrado que a teoria era renormalizável. Na época, Salam e John C. Ward também buscavam meios para resolver os problemas da renormalização, pois também se inspiraram no trabalho de Schwinger para relacionar as interações. Eles ficaram incrédulos quando ouviram que Glashow o havia feito, com razões, pois o trabalho de Glashow continha imprecisões físicas e matemáticas que impediam a renormalização de uma teoria que unificava as interações fraca e eletromagnética, contendo dois mediadores da interação fraca e um da interação eletromagnética (CREASE; MANN, 1996).

Então, Glashow propôs a existência de mais um bóson mediador, o Z_0 , que hoje é conhecido como Z^0 . Com isso, ele resolveu alguns problemas teóricos, mas só realizou o processo de renormalização separando as interações eletromagnética e fraca. Assim, essas interações trabalhavam lado a lado, mas não estavam unidas. A contribuição de cada uma das forças para a interação total era expressa em termos de uma razão conhecida como ângulo de mistura, θ_w . Ninguém deu muita atenção ao artigo de Glashow, pois havia sido publicado em uma revista relativamente desconhecida, além de estar escrito usando as notações de Schwinger (CREASE; MANN, 1996; GLASHOW, 1980).

Outro fator que dificultou o fortalecimento da ideia defendida por Glashow na época foi o procedimento experimental utilizado para estudar a interação fraca. Como essas interações são suprimidas pelas interações forte e eletromagnética, os experimentadores estudavam casos de decaimento de partículas estranhas, pois esse processo ocorre devido à interação fraca. No entanto, foi evidenciado posteriormente que as únicas partículas em que as correntes neutras não se manifestam são as partículas estranhas (CREASE; MANN, 1996).

essa técnica elimina os infinitos que aparecem no cálculo de quantidades físicas, como carga e massa.

Mais tarde, em 1964, Salam e Ward, independentemente, também propuseram a mesma estrutura do grupo $SU(2) \times U(1)$. E, em 1967, após Salam tomar conhecimento do mecanismo de quebra espontânea de simetria, por meio do trabalho de Higgs, ele foi capaz de completar a formulação da teoria $SU(2) \times U(1)$. Isso tornou a teoria bastante preditiva e permitiu que as massas de W e Z , assim como seus acoplamentos, fossem calculadas em termos de um único ângulo desconhecido, θ . Independentemente do valor de θ , as massas de W e Z foram previstas com valores altos, grandes o suficiente para escaparem à detecção. Nessa teoria, inicialmente, as partículas teriam massa nula e estariam sujeitas à simetria de 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 de simetria, na qual o fóton (γ) permanece com massa nula, porém os W adquirem massas por incorporação dos bósons carregados (H^\pm), ao passo que Z^0 adquire massa de uma parte dos bósons neutros ($H^0 + \bar{H}^0$), ficando a outra parte ($H^0 - \bar{H}^0$) como um novo bóson escalar (spin 0), o bóson de Higgs (SALAM, 1980, 1991; WEINBERG, 1980, 2004).

A quebra espontânea de simetria ocorre, de acordo com Salam (1991), após uma transição de fase eletrofraca, que deve ter ocorrido quando o universo tinha uma temperatura de cerca de 3×10^{15} °C. Antes que a transição de fase ocorresse, quando a temperatura era maior que essa, havia apenas a interação eletrofraca; quando a temperatura diminuiu, essa interação se dividiu em fraca e eletromagnética, em um processo no qual os W e Z^0 adquiriram massa.

No entanto, essa teoria foi ignorada por mais alguns anos, pois previa a existência das correntes neutras e não era renormalizável, o que reduziu o interesse de físicos experimentais em testar as hipóteses. Isso veio a mudar após desenvolvimentos teóricos que explicavam a ausência das correntes neutras nas correntes fracas e mostravam que a Teoria Eletrofraca poderia passar pelo processo de renormalização (BROWN *et al.*, 1997).

Salam e Weinberg imaginavam que a Teoria Eletrofraca era renormalizável, porém nenhum deles testou essa hipótese. Weinberg afirma que não o fez porque o método usado na época pelo qual era possível fazer o teste o desagradava, a integração de caminho. De acordo com ele, como muitos teóricos daquela geração, aprendera a fazer cálculos na Teoria Quântica de Campos a partir do trabalho de 1949 de Dyson, que mostrou como derivar as regras de Feynman a partir de um formalismo de operador, por isso a resistência em usar a integração de caminho (WEINBERG, 1980, 1996). Assim, foram Veltman e seu aluno 't Hooft que primeiro o fizeram.

Em 1971, 't Hooft usou a integração de caminho para definir um indicador em que as teorias espontaneamente quebradas, não abelianas e com apenas as interações mais simples, tinham uma propriedade essencial à renormalização, segundo a qual, em todas as ordens da teoria de perturbações, haveria apenas um número finito de infinitos (WEINBERG, 1996).

Esse trabalho conjunto, premiado com o Nobel de Física, iniciou-se quando 't Hooft escolheu Veltman como orientador de seu doutorado em 1969. Veltman pediu a seu orientando que estudasse a famosa teoria de gauge não abeliana desenvolvida pelos físicos Yang e Mills em 1954 e, independentemente, pelo físico inglês Shaw, sob a orientação de Salam (BASSALO, 2012).

A teoria de Yang-Mills-Shaw apresentava uma grande dificuldade, uma vez que descrevia três partículas não massivas de spin unitário, conhecidas como bósons vetoriais. Enquanto uma das partículas poderia ser um fóton, partícula não massiva mediadora da interação eletromagnética, as outras duas não existiam na natureza. Além disso, essa teoria não era renormalizável para bósons massivos, como as partículas W^\pm e Z^0 , mediadoras da interação fraca. Portanto, não poderia ser usada para explicá-las (BASSALO, 2012; 'T HOOFT, 1997).

Antes dos anos 1970, havia apenas uma Teoria Quântica de Campos renormalizável que parecia dar uma descrição razoável e útil de partes do mundo real: a teoria eletrodinâmica quântica. No entanto, a

ideia de que outras interações também deveriam ser descritas no contexto de teorias de campo renormalizáveis tornou-se cada vez menos popular. De acordo com 't Hooft (1997), apenas alguns artigos clássicos na literatura mais antiga se destacavam como verdadeiros achados, e eles foram exemplos inspiradores de raciocínio teórico para todos, por muitos anos. Um dos artigos mencionados é o de Yang e Mills, no qual mostraram que a eletrodinâmica quântica poderia ser construída com base em um princípio fundamental, a invariância de gauge local. Foi assim que 't Hooft decidiu qual seria seu problema de pesquisa. Primeiro ele tentaria entender todos os detalhes do sistema de Yang-Mills sem massa e depois adicionaria a massa por um mecanismo de quebra espontânea de simetria local ('T HOOFT, 1997).

Veltman então desenvolveu um *software* que conseguia minimizar o grau e o número de infinitos na computação realizada. Porém, os resultados ainda não eram satisfatórios. Contudo, enquanto seus estudos a respeito do tema continuaram, ele manteve contato com pesquisadores e leu artigos que tratavam do assunto, até que se depa-rou com uma técnica nova, as integrais de caminho feynmanianas. Ele preparou um curso para estudar essa técnica, cujas notas de aula foram preparadas por 't Hooft, o que deu a este último familiaridade com tal formalismo.

Em 1970, 't Hooft foi participar de um curso de verão em Car-gèse, com a participação de Gell-Mann, que havia desenvolvido um modelo para estudar as interações fortes. Formalmente, tal modelo poderia ser renormalizado com a quebra espontânea de simetria. Em um dos seminários, Gervais, Lee e Symanzik afirmaram que as pro-priedades de simetria daquele modelo não seriam destruídas com a geração de massa decorrente da quebra espontânea de simetria. Em vista disso, 't Hooft perguntou a Lee e a Symanzik se não pode-ria fazer o mesmo para a teoria de Yang e Mills (BASSALO, 2012; 'T HOOFT, 1997).

Depois de renormalizar a teoria com partículas não massivas, 't Hooft se concentrou na renormalização com partículas massivas,

usando, para isso, o mecanismo de quebra de simetria. Veltman, usando seu programa computacional, percebeu que o modelo de regularização dimensional de 't Hooft eliminava os infinitos dos diagramas de dois loops. No entanto, para mais de dois loops, os infinitos permaneciam. Eles precisaram usar uma regularização dimensional contínua¹⁴ para resolver esse problema, assim conseguiram mostrar que a teoria era renormalizável (BASSALO, 2012; 'T HOOFT, 1997).

Desse modo, esses trabalhos conseguiram resolver a grande dificuldade do modelo de Salam-Weinberg, ou seja, sua renormalização, e completar a teoria da interação eletrofraca e de suas partículas mediadoras W^\pm e Z^0 .

A contribuição de 't Hooft e Veltman foi de vital importância para a teoria das partículas elementares, colocando-a numa base matemática extremamente sólida. Após o artigo original de 1971 de 't Hooft, a maioria dos teóricos estava bem convencida de que a teoria era renormalizável, e, pelo menos entre eles, houve um aumento de interesse por esse tipo de teoria. A relevância da renormalização não consistia só na eliminação dos infinitos, mas também no potencial que a teoria passava a ter de descrever as interações fracas e eletromagnéticas a energias superiores a 300 GeV. Após essa etapa, as implicações experimentais da teoria passaram a ser mais estudadas (WEINBERG, 2004).

Em termos de suas características, a unificação das teorias científicas requer a presença de uma estrutura matemática e um parâmetro teórico específico. No caso da Teoria Eletrofraca, esse papel é desempenhado, especificamente, pela teoria de gauge e pelo ângulo de Weinberg. É uma unificação do tipo sintética, pois a teoria fornece

14 Para fazer com que, de algum modo, estas integrais divergentes sejam finitas, introduz-se um parâmetro de convergência adequado, o qual geralmente é conhecido como parâmetro de regularização. Nesse processo, é modificada a dimensionalidade das integrais para que elas desmembrem em partes finitas e divergentes (ESPICHÁN CARRILLO, 1995).

uma estrutura unificada, na qual as interações eletromagnéticas e fracas podem ser integradas, porém as partículas mediadoras permanecem distintas. Trata-se de duas teorias, cada uma regida por grupos de simetria independentes, e que, unificadas, são combinadas sob uma estrutura de simetria maior, produzindo uma terceira teoria que introduz um parâmetro necessário, o ângulo de Weinberg (MORRISON, 2000).

O problema, agora, era resolver a questão das correntes neutras. A Teoria Eletrofraca previa a sua existência, mas, até aquela época, nenhum estudo experimental tinha encontrado evidências da presença dessas correntes nos processos de interação fraca. Essa detecção era uma das indicações de que a teoria estaria correta, mas, na época, esse não era o principal interesse dos físicos experimentais.

A teoria de Glashow, Salam e Weinberg permitiu que a massa das partículas W e Z fosse estimada com maior precisão. Isso facilitou a caracterização das correntes neutras, provocadas por Z^0 . Assim, a existência das correntes neutras representava uma primeira evidência experimental do modelo padrão eletrofraco (FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007; WEINBERG, 1980).

A busca experimental pelas evidências das correntes neutras foi desanimadora no início, pois os primeiros experimentos envolviam apenas casos em que a estranheza não era conservada, uma vez que, nas interações fracas, havia casos de violação da estranheza. Os resultados iniciais negativos sugeriam que os processos ocasionados por correntes neutras não existiam ou, se existiam, representavam uma pequena fração dos processos ocasionados pelas correntes carregadas (FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007).

Mais tarde, propuseram-se estudos de processos de espalhamento, no entanto tais propostas foram deixadas de lado. Somente depois da confirmação da existência de dois neutrinos de naturezas diferentes, o interesse pelo assunto foi retomado, concentrando-se, porém, na detecção dos bósons vetoriais W e Z^0 , e não na procura das correntes neutras. Os primeiros estudos que sugeriram a utilização de neutrinos

para o estudo das interações fracas foram feitos por Schwartz, experimentalmente, por Lee e Yang, teoricamente, e, um pouco antes, por Bruno Pontecorvo (FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007).

Convém ressaltar que a teoria de Glashow, Salam e Weinberg tratava apenas do grupo de léptons, sem abranger a família dos quarks. Essa ampliação da teoria só ocorreu mais tarde, após 1970, com o trabalho de Glashow, Iliopoulos e Maiani, que explicava a supressão das correntes neutras por meio de um quarto quark, o quark charm. Isso fez com que alguns olhares se voltassem para as correntes neutras.

Como no decaimento de káons estudado na época não eram observados os bósons vetoriais W , Lee e Yang sugeriram que a massa dos bósons deveria ser maior que a massa do káon. Com essa hipótese, Lee e Yang propuseram que a massa desses bósons deveria ser aproximadamente igual à massa de um núcleon, maior partícula conhecida até então (FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007).

Nesse contexto, foram planejadas e executadas quatro experiências por duas colaborações de físicos experimentais: a Gargamelle, no Laboratório Europeu de Física de Partículas, denominado CERN; e a E1A, no Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), outro laboratório de Física de Partículas, mas nos Estados Unidos. Cada laboratório realizou duas experiências, que acabaram evidenciando a existência das correntes neutras e contaram com a participação de pesquisadores de várias instituições. Vale ressaltar que, no Fermilab, as diferenças entre os experimentos realizados pela colaboração E1A foram significativas. Por sua vez, na Gargamelle, não houve mudanças no aparato experimental; o experimento foi o mesmo, porém com análises diferentes (FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007; HASERT *et al.*, 1973a, 1973b).

É interessante ressaltar que os objetivos iniciais em ambas as colaborações eram a detecção do bóson W . A busca pelas correntes neutras só foi tomada como objetivo principal após a renormalização da Teoria Eletrofraca, em 1971, e uma sequência de atividades experimentais envolvendo interações com neutrinos de alta energia.

Observação das correntes neutras

Uma das maneiras de investigar a interação fraca, sugerida em 1959, era disparar feixes de neutrinos em um alvo fixo e observar o que acontecia. Como os neutrinos experimentam somente a ação da interação fraca, essas experiências prometiam revelar propriedades dessa interação de maneira muito mais clara do que as experiências utilizando decaimentos, uma vez que estes também sofriam efeitos das interações fortes e eletromagnéticas. Entretanto, estava claro que os experimentos exigiriam feixes intensos de neutrinos e detectores muito grandes para que qualquer efeito pudesse ser observado, já que a interação do neutrino com a matéria era de difícil detecção (PICKERING, 1984).

Apesar dessa evidente dificuldade, os experimentos com neutrinos começaram no início da década de 1960, nos dois principais laboratórios de Física de Partículas da época, o Laboratório Nacional de Brookhaven (BNL), nos Estados Unidos, e o CERN, localizado na fronteira entre França e Suíça. Enquanto esses primeiros experimentos com neutrinos eram realizados, um grupo de físicos franceses, liderado por André Lagarrigue, estava construindo uma enorme câmara de bolhas, chamada Gargamelle.

A Gargamelle era basicamente um enorme tanque cheio de um líquido superaquecido, mantido sob pressão para evitar a fervura. Quando um feixe de neutrinos, por exemplo, era disparado no tanque, pequenas bolhas começavam a se formar ao longo de trilhas de partículas carregadas, produzidas na interação entre o neutrino e o núcleo do líquido superaquecido. Essas trilhas eram fotografadas e podiam ser analisadas posteriormente. O motivo para a construção de uma câmara grande era o aumento da taxa de interação do neutrino com o líquido em seu interior. Além disso, a Gargamelle foi projetada para ser preenchida com um líquido muito denso, o freon, o que aumentava a taxa de interação (PICKERING, 1984).

A ideia de construir a Gargamelle surgiu na Conferência de Siena em 1963, logo após a apresentação dos primeiros resultados

do experimento com neutrinos, utilizando uma outra câmara construída pelo Nuclear Physics Apparatus Division (NPA), uma divisão do CERN. A primeira proposta de construção da Gargamelle foi escrita em fevereiro de 1964 por Lagarrigue, Musset e Rousset, e a decisão de iniciar o programa foi tomada em dezembro de 1965. A equipe de *design*, construção e execução do projeto era composta por integrantes de diferentes instituições e países. As imagens registradas na Gargamelle eram analisadas por uma colaboração de sete grupos: Aachen, Bruxelas, CERN-TCL, Londres, Milão, Orsay e Paris (GALISON, 1983, 1987; HAIDT, 2004; ROUSSET, 1994).

A câmara de bolhas Gargamelle comportava um volume útil de $6,2 \text{ m}^3$, com diâmetro de 1,8 metro, preenchido com aproximadamente dez toneladas de freon (CF_3Br), com uma densidade de $1,5 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$, comprimento de radiação de onze centímetros e comprimento de interação de aproximadamente 0,75 metro, exposto a feixes de neutrinos e antineutrinos do CERN. Ela tinha um comprimento de 4,8 metros, o que assegurou que os eventos fossem identificados inequivocamente (HASERT *et al.*, 1973b; 1974).

A câmara ficava sob ação de um campo magnético de dois teslas para que fosse possível observar os desvios das partículas carregadas e, dessa forma, medir seu *momentum*. A fim de evitar ruídos nos resultados, alguns cuidados foram tomados, entre os quais, a blindagem de radiações externas feita por ímãs, por bobinas de cobre e escudos de ferro e concreto (HASERT *et al.*, 1974).

O cuidado em relação ao comprimento da câmara, escolhido para que os eventos fossem identificados sem ambiguidade, foi tomado, porque se sabia da possibilidade de o feixe de neutrinos interagir com os materiais ao redor da câmara e gerar um número desconhecido de nêutrons dentro dela. Ao se chocarem com um núcleo, esses nêutrons poderiam ocasionar um chuveiro de hádrons, ocorrência passível de ser confundida com os eventos de interesse. No entanto, nesse aparato, os nêutrons eram absorvidos mais rapidamente, fazendo com que os eventos provocados

por eles se mantivessem na parte inicial da câmara, o que era suficiente para diferenciá-los (HASERT *et al.*, 1974).

A análise sistemática de possíveis eventos de corrente neutra (CN) pelos grupos do CERN e de Milão tem início após 1971, mas não como prioridade. Durante maio de 1972, uma coleção de candidatos a eventos de CN é cuidadosamente examinada no CERN por vários físicos da colaboração e os resultados levavam a crer que eles existiam. Em julho do mesmo ano, foi recomendado que todos os grupos extraíssem sistematicamente candidatos a eventos de CN e fizessem fotografias em grande escala para serem analisadas numa reunião em agosto, em Paris. Foi só assim que a atenção a esse tipo de evento ganhou corpo (GALISON, 1987; ROUSSET, 1994).

Alguns teóricos também influenciaram o interesse pelas correntes neutras. No CERN, um grupo que trabalhava no modelo de unificação das interações fraca e eletromagnética elaborou um seminário, no final de 1971, para os experimentadores da colaboração Gargamelle. Afinal, para levar adiante seus argumentos, eles necessitavam da ajuda de seus companheiros experimentais. Assim, enfatizaram a relevância de uma busca ativa pelas correntes neutras (PICKERING, 1984).

Nos Estados Unidos, o próprio Weinberg convenceu físicos do Fermilab quanto à necessidade de procurarem as correntes neutras. Atendendo essa necessidade, a colaboração E1A adaptou o experimento HPWF para esse novo objetivo¹⁵ (PICKERING, 1984) e, em 1972, um novo acelerador de partículas entrou em operação a fim de resolver o problema das correntes neutras (HAIDT, 2004; PICKERING, 1984).

Alguns físicos da colaboração começaram então a olhar para os candidatos de correntes neutras que satisfizessem características das seguintes reações semileptônicas ou leptônicas:

15 No Fermilab, a colaboração E1A foi composta por grupos da Universidade de Harvard, da Universidade de Wisconsin e da Universidade da Pensilvânia, muitas vezes abreviada como colaboração HPWF (GALISON, 1983).

$$\nu_{\mu} \text{ ou } \bar{\nu}_{\mu} + \text{núcleons} \rightarrow \nu_{\mu} \text{ ou } \bar{\nu}_{\mu} + \text{hádrons}$$

(um neutrino ou antineutrino sendo espalhado por um núcleon e provocando um chuva de hádrons),

ou

$$\nu_{\mu} \text{ ou } \bar{\nu}_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} \text{ ou } \bar{\nu}_{\mu} + \text{hádrons}$$

(um neutrino ou antineutrino sendo espalhado por um elétron, que adquire momento linear, e provocando um chuva de hádrons).

Esses dois eventos de corrente neutra deveriam ser distinguidos dos eventos de corrente carregada correspondentes às seguintes reações:

$$\nu_{\mu} \text{ ou } \bar{\nu}_{\mu} + \text{núcleons} \rightarrow \mu^{+} \text{ ou } \mu^{-} + \text{hádrons}$$

(um neutrino ou antineutrino colide com um núcleon e é transformado em um múon ou antimúon e um chuva de hádrons).

Esses eventos deveriam ser contabilizados para que se pudesse fazer uma comparação da taxa de eventos de corrente neutra e de corrente carregada.

Nessa etapa surgiu outra questão: como resolver os problemas relacionados aos ruídos (*background*), eventos que imitariam os eventos de interesse?

Ao todo, estariam presentes quatro tipos de eventos para análise, os de corrente neutra, os de corrente carregada (CC), os de ruído ou de *background* (B) — que ocorrem quando os nêutrons produzidos em torno da Gargamelle, ao entrarem na câmara, provocam efeitos semelhantes aos eventos de CN — e os eventos associados (AS), caracterizados por uma interação de neutrino, visível na câmara, seguida por uma

interação neutra, também detectada na câmara. Nesse caso, a partícula neutra que ocasionava o segundo evento era um hádron secundário, vindo da primeira interação. Os eventos associados podiam fornecer informações importantes para a determinação dos efeitos de *background*, cujo cálculo é refinado com um método computacional Monte Carlo¹⁶.

Na análise dos processos leptônicos, as interações de interesse para análise dos grupos de pesquisa eram caracterizadas por um único elétron (e) originário do líquido, não acompanhado por fragmentos nucleares, hádrons ou raios gama correlacionados ao vértice. A cinemática das reações é tal que o elétron seria emitido em um ângulo pequeno, θ_e , em relação ao feixe de neutrino; esperava-se que o elétron transportasse um terço da energia do neutrino incidente, equivalente a um pico entre 1 e 2 GeV. Como as interações de neutrinos com o ímã e com o sistema de blindagem produzem uma radiação de fundo de baixa energia de fótons e elétrons, um limite inferior na energia eletrônica foi estabelecido, 300 MeV. Esse corte de energia garantia que todos os elétrons das reações esperadas teriam $\theta_e < 5^\circ$ (HASERT *et al.*, 1974).

Ao levar em consideração o comprimento da câmara para excluir eventos que imitariam as correntes neutras, somente se analisavam os eventos que ocorriam dentro de um volume interno de dimensões de 3,75 m de comprimento por 1 m de diâmetro, o que representa cerca de 40 % do volume total visível (HASERT *et al.*, 1974).

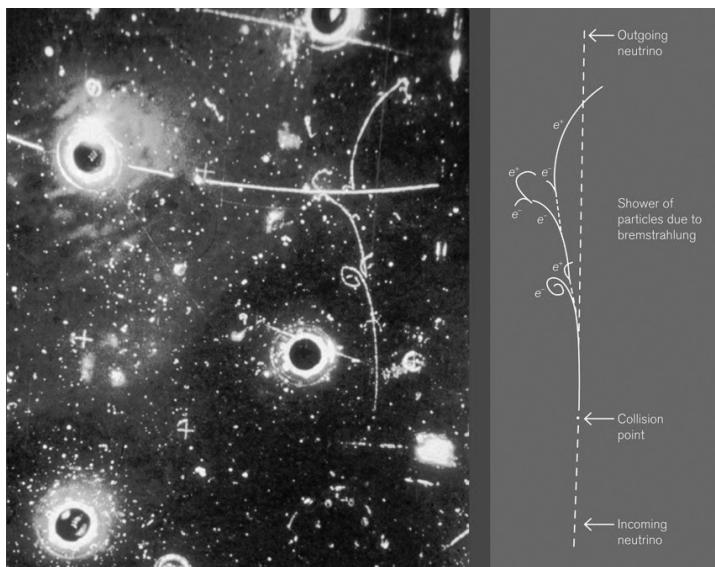
Durante o processo de análise, tomou-se cuidado para não confundir eventos de corrente neutra com eventos associados nem considerar eventos de corrente neutra gerados por eventos de corrente carregada. Além disso, os ruídos foram reduzidos ao máximo para evitar

16 Na literatura científica há outra grande classe de simulações de computador chamada de simulações de Monte Carlo (MC). Essas simulações são algoritmos de computador que usam aleatoriedade para calcular as propriedades de um modelo matemático e em que a aleatoriedade do algoritmo não é uma característica do modelo de destino (WINSBERG, 2013).

uma medida equivocada. As possíveis fontes de ruído avaliadas foram: raios cósmicos; múons μ -lentos; partículas que entram com o feixe e interagem com a câmara; nêutrons e káons vindos de fora da câmara, gerados por neutrinos; káons gerados por efeitos regeneradores na matéria (FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007; HASERT *et al.*, 1974).

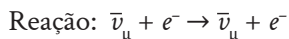
Um total de 375 mil imagens de eventos com neutrinos e 360 mil imagens de eventos com antineutrinos foram analisadas duas vezes pela colaboração Gargamelle. Em janeiro de 1973, a primeira evidência das correntes neutras foi interpretada em um registro das interações dos antineutrinos, um processo leptônico que satisfazia todos os critérios estabelecidos teoricamente. Esse evento estava isolado e bem dentro do volume visível mensurável da câmara, tinha uma energia bastante alta, que não poderia ter sido atingida por um dos portadores neutros ejetados em eventos carregados.

Figura 3 – Fotografia de um dos primeiros eventos de correntes neutras registrado e uma ilustração da identificação das partículas



Fonte: Riesselmann (2009).

Na Figura 3, o antineutrino entra pela parte inferior, sem deixar vestígios, atinge um elétron, que passa a se mover verticalmente para cima, emitindo dois fótons, que produzem um par elétron-pósitron.



A curvatura no início do traço mostra que se trata de uma partícula de carga negativa, e o efeito *bremsstrahlung*, que resulta na produção de fótons de alta energia, evidencia que o traço é de um elétron. A energia do elétron era de 385 ± 100 MeV e o ângulo de $1,4^{\circ}_{-1,4}^{+1,6}$. O vértice do surgimento do elétron estava a sessenta centímetros do início do volume visível da câmara e a dezesseis centímetros do seu eixo. Assim, não havia possibilidade de esse registro ser de um evento gerado por radiação de fundo (HASERT *et al.*, 1973b).

Essa primeira evidência fortaleceu as buscas e, em julho de 1973, após os esforços para medir os eventos de corrente neutra, a colaboração Gargamelle coletou amostras de 102 eventos de CN nas fotografias com neutrinos e 64 nas fotos com antineutrinos. As amostras correspondentes de eventos de CC foram 428 com neutrinos e 148 com antineutrinos. Esses dados foram apresentados em julho de 1973 no CERN e enviados para publicação em um artigo assinado por 51 colaboradores. O resultado havia sido obtido meses antes da apresentação no CERN, o atraso na comunicação foi decorrente do tempo necessário para que os cientistas se convencessem de que os ruídos experimentais estavam sob controle. Mesmo depois desse convencimento, a publicação foi cautelosa. Um evento foi apresentado como candidato, e não como uma evidência definitiva (HAIDT, 2004; ROUSSET, 1994).

No Fermilab, o experimento HPWF entrou em operação no início de 1972 e passou por uma sequência complexa de acontecimentos. No começo de 1973, os pesquisadores já haviam reunido dados que corroboravam a existência das correntes neutras e comunicaram a notícia ao CERN, o que acabou influenciando na decisão da colaboração Gargamelle de publicar seus resultados antes do

previsto. Em seguida a equipe HPWF também chegou a enviar resultados para publicação, mas os integrantes resolveram suspender o artigo e melhorar o experimento (PICKERING, 1984).

O que veio a seguir colocou em xeque os resultados anteriores da equipe HPWF, pois os pesquisadores concluíram que os sinais de corrente neutra encontrados eram muito menores do que o relatado pelo CERN. Posteriormente, estimativas mais detalhadas foram feitas; inicialmente elas contrariavam os resultados postos, mas depois acabaram convergindo para o que havia sido publicado pela colaboração Gargamelle. Assim, a equipe HPWF decidiu manter a publicação de 1973, que afirmava haver indícios das correntes neutras, e, em 1974, seus resultados acabaram confirmando aqueles obtidos pela colaboração Gargamelle (HAIDT, 2004; PICKERING, 1984).

A proporção das correntes neutras entre todas as interações de neutrinos e antineutrinos foi relativamente grande; para antineutrinos a razão CN/CC foi aproximadamente de 40 % e para neutrinos de 25 %. Qual o motivo desse efeito não ter sido detectado antes? Afinal, já existiam indícios de correntes neutras em fotografias tiradas na câmara do NPA. De acordo com Rousset (1994), os experimentos anteriores haviam sido desencorajadores e, até o final da década de 1960, não havia necessidade teórica de provar esses eventos, portanto não existia motivação para fazê-lo (HAIDT, 2004).

No final da década de 1970, a existência e as propriedades das correntes neutras já estavam bem estabelecidas e as práticas experimentais de interpretação, tanto da colaboração Gargamelle como da equipe HPWF, foram incorporadas em sucessivas gerações de experimentos com neutrinos (PICKERING, 1984).

A evidência das correntes neutras fracas coroou o programa de pesquisa de neutrinos iniciado pelo CERN no início dos anos 1960 e o levou a um papel de liderança no campo de pesquisa. O novo efeito marcou o início experimental do Modelo Padrão das interações eletrofracas e desencadeou uma gama de atividades no CERN e em todo o mundo, tanto experimentais como teóricas (HAIDT, 2004).

O sucesso mais imediato foi a predição do valor de massa do bóson vetorial intermediário W , com base no modelo Glashow-Salam-Weinberg combinado com as primeiras medidas do ângulo de mistura eletrofraco θ_w . Obteve-se um valor de 70 GeV, o que indicava que os experimentos com neutrinos não seriam capazes de realizar a detecção. Seria necessário realizar experimentos de colisões de alta energia (HAIDT, 2004, 2013).

A detecção das correntes neutras, de acordo com Haidt (2013), deu substância à Teoria Eletrofraca, tornando-se sua primeira evidência experimental. Além disso, trouxe um impulso para a astrofísica e teve aplicações na biologia, bem como estabeleceu um novo campo de interações de neutrinos, agora mediado pelo bóson Z^0 .

Outra questão que foi discutida novamente, após as correntes neutras serem estabelecidas, foi a possível violação da paridade em átomos. No final dos anos 1960 e durante os anos 1970, algumas experiências foram realizadas para testar essa possibilidade. Os resultados iniciais não encontraram nenhum efeito, dado que o átomo exibe um alto grau de simetria e é dominado por interações eletromagnéticas, que preservam a paridade. No entanto, quando os bósons da interação eletrofraca interagem entre si, uma interferência entre as correntes neutras eletromagnéticas e fracas pode induzir efeitos de violação da paridade nos átomos (HAIDT, 2013).

A presença desse novo tipo de interação, provocada pelo Z^0 , é perceptível na interferência sobre a interação entre um elétron e um núcleon, quando mediada por um fóton e por um Z^0 . Quando ocorre a troca de fótons, a interação que aparece é a eletromagnética, que preserva a paridade, assim os elétrons seriam espalhados na mesma proporção tanto para a esquerda como para a direita. No entanto, com a troca de Z^0 , esse equilíbrio fica perturbado, pois as interações fracas violam a paridade.

Esse efeito foi observado por alguns experimentos, entre os quais um experimento de dispersão de elétron-núcleon no SLAC National Accelerator Laboratory, da Universidade de Standford, em 1978

(PRESCOTT *et al.*, 1978). Esse experimento demonstrou, de maneira convincente, que as interações eletromagnéticas e fracas agiam juntas no processo de dispersão inelástica de elétrons polarizados. Depois disso, a maioria dos físicos tomou como certa a Teoria Eletrofraca.

Além disso, o experimento forneceu uma medida mais precisa do ângulo de mistura eletrofraco, o que melhorou as previsões de massa das partículas mediadoras da interação fraca (PRESCOTT, 1997).

Dadas as previsões teóricas de massas, os laboratórios de Física de Partículas existentes na época não possuíam aceleradores com energia suficiente para a realização de experimentos que possibilitassem a observação dessas partículas.

Detecção indireta dos bósons W e Z^0

Os maiores aceleradores de partículas na época eram máquinas em que um único feixe de prótons, carregado com alta energia, era direcionado para um alvo fixo. Nesse tipo de experimento, apenas uma pequena fração da energia do feixe é disponibilizada para a criação de novas partículas. Assim, para gerar partículas com massa da ordem das massas dos bósons W e Z^0 , a única chance é utilizar uma máquina de colisão de feixes onde as partículas aceleradas colidem de frente, transformando essencialmente toda a sua energia em novas partículas (RUBBIA; VAN DER MEER; CLINE, 1982).

Uma das alternativas era promover colisões de elétrons e pósitrons em um acelerador circular. A vantagem de empregar elétrons e pósitrons é que um único anel de ímãs e cavidades de radiofrequência poderia, simultaneamente, acelerá-los em direções opostas. Por outro lado, pelo fato de serem muito leves, eles rapidamente dissipariam suas energias quando obrigados a circular em no anel. Isso acontece porque, quando uma partícula carregada é desviada de sua trajetória, sua energia cinética diminui por frenagem, e, dessa forma, a diferença de energia é emitida na forma de fótons de alta

energia. Essa radiação é chamada de *bremstrahlung*, que significa “radiação de freamento” em alemão. A probabilidade de emissão de *bremstrahlung* é proporcional ao inverso da massa da partícula ao quadrado, por isso esse efeito ocorre em abundância em feixes de elétrons. Em um acelerador circular, uma partícula é continuamente desviada por campos magnéticos, de modo que um elétron estaria continuamente emitindo essa radiação e perdendo energia. A perda de energia pode ser atenuada trocando elétrons por prótons, os quais são mais pesados e permitem que aceleradores com energias mais altas sejam operados com menor consumo de energia (RUBBIA; VAN DER MEER; CLINE, 1982; WATKINS, 1986).

Dessa maneira, não parecia eficiente construir uma máquina com feixes elétron-pósitron grande o suficiente para alcançar a energia dos bósons vetoriais intermediários. O plano foi, em vez disso, construir anéis de armazenamento nos quais os prótons colidiriam de frente com antiprótons. Dois anéis entrelaçados seriam necessários para organizar essas colisões.

Em 1976, Carlo Rubbia e Peter McIntyre, da Universidade de Harvard, e David Cline, da Universidade de Wisconsin, sugeriram uma ideia alternativa para a detecção dos bósons. Em vez de construir uma máquina de colisão de feixes inteiramente nova, propuseram um acelerador de prótons com alvo fixo, existente numa máquina de colisão. Isso era viável e muito mais barato, pois não exigia um novo acelerador e a adoção desse procedimento poderia, se bem-sucedida, produzir resultados dentro de cinco anos. A proposta envolveu o aprimoramento de um síncrotron de prótons de alta energia para acelerar simultaneamente um feixe de antiprótons e um feixe de prótons no anel de aceleração, que posteriormente seriam levados a colidirem de frente (RUBBIA; VAN DER MEER; CLINE, 1982; WATKINS, 1986).

O maior síncrotron disponível atingia energias máximas de várias centenas de GeV e já proporcionaria uma energia de colisão grande o suficiente para evidenciar a existência ou não dos bósons W e Z^0 .

Alguns peritos dos experimentos do síncrotron de prótons tinham receio em permitir a transformação desse acelerador em um colisor de prótons e antiprótons, que nem sabiam se iria funcionar. No entanto, Rubbia expôs suas ideias de maneira determinada, com embasamento teórico e experimental, com a finalidade de convencê-los de que tal mudança poderia responder aos questionamentos em jogo (DARRIULAT, 2004).

De acordo com Darriulat (2004), caso o CERN não tivesse aceitado a ideia de Rubbia, o físico a iria propor para o Fermilab. Isso acabou ajudando na tomada de decisões. Após uma análise minuciosa dos problemas que poderiam ser encontrados em um projeto como aquele, a sugestão foi bem recebida e iniciou-se a execução do projeto.

No entanto, também existiam desvantagens em comparação com o uso de colisões elétron-pósitron. Cada próton é composto por três quarks, glúons e pares quark-antiquark, ao passo que cada antipróton contém três antiquarks juntamente com glúons e pares quark-antiquark. Assim, quando um próton colide com um antipróton, ocorre uma interação complicada entre várias partículas diferentes. Isso exige um estudo teórico e experimental capaz de distinguir os produtos dessa colisão (WATKINS, 1986). Além disso, a proposta só funcionaria se um feixe de antiprótons altamente compacto com um impulso precisamente definido fosse produzido.

Ao contrário dos prótons, antiprótons não estão prontamente disponíveis a partir de qualquer fonte natural, eles devem ser criados em colisões de alta energia. Para isso, um feixe de prótons de alta energia é dirigido a um alvo de metal; nessa colisão os antiprótons são gerados e precisam ser dirigidos magneticamente para um anel de armazenamento particularmente projetado. O processo é extremamente ineficiente; em média, um antipróton de baixa energia é produzido para cada milhão ou mais de prótons de alta energia que atingem o alvo. A perspectiva calculada era de que, para obter um número útil de colisões de prótons e antiprótons na máquina de

colisão de feixes, seria preciso recolher grupos de prótons e antiprótons, cada um composto de pelo menos 100 bilhões de partículas (RUBBIA; VAN DER MEER; CLINE, 1982).

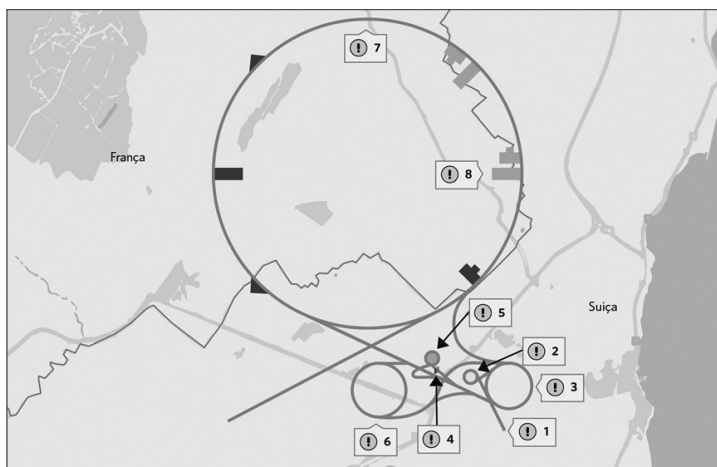
Criar antipartículas suficientes não era o único problema. Os antiprótons emergem do alvo com velocidades e direções variadas. Se a energia for demasiadamente elevada, algumas das partículas vão atacar as paredes do acelerador, e o feixe será dissipado. Portanto, era necessário um método para “esfriar” o feixe de antipróton, isto é, para reduzir seus movimentos aleatórios, de modo a mantê-lo tão concentrado quanto possível antes de sua entrada no anel acelerador.

Na época, já existiam algumas técnicas de resfriamento, uma delas utilizava um feixe de elétrons “frios”, ou seja, elétrons com a mesma velocidade e direção, misturado ao feixe de antiprótons, o que fazia com que parte da energia térmica dos antiprótons fosse transferida para os elétrons. Misturando os feixes repetidamente, o resfriamento era alcançado. No entanto, esse processo é mais eficiente para casos em que a energia dos antiprótons não seja tão alta.

A saída foi utilizar outro método de resfriamento, mais adequado para as necessidades da máquina de prótons e antiprótons do CERN. Esse processo, denominado arrefecimento estocástico, foi inventado em 1968 por Van der Meer. Nesse método, os antiprótons são armazenados em um depósito circular, em pacotes isolados. Os antiprótons que entram no acumulador circulam por uma pista mais externa, e sensores eletrônicos medem o desvio médio das partículas da órbita ideal. Essas medidas são convertidas em um sinal de correção que é transmitido para outro dispositivo, onde um campo elétrico empurra o centro de massa das partículas de volta para dentro da órbita ideal. Assim que esse feixe está suficientemente resfriado, ele é encaminhado para uma pista mais interna do acumulador, enquanto outro feixe de antiprótons desordenados assume a pista externa. Dessa maneira, são acumulados vários pacotes de antiprótons, até que se tenha um feixe denso o suficiente para a realização das colisões (RUBBIA; VAN DER MEER; CLINE, 1982; WATKINS, 1986).

Na Figura 4 é representado um esquema de todo o processo de aceleração e produção dos prótons e antiprótons. Os itens desse complexo de aceleradores estão indicados na figura por números identificados na legenda.

Figura 4 – Representação do processo de produção e aceleração de prótons e antiprótons até o momento da colisão



Legenda

1 acelerador linear	4 alvo de metal	7 acelerador Super Proton Synchrotron
2 síncrotron impulsor	5 acumulador de antiprótons	
3 acelerador Proton Synchrotron	6 interseção de armazenamento	8 detector UA1

Fonte: Adaptado de Rubbia, Van der Meer e Cline (1982) e Watkins (1986).

Todo o complexo experimento, que foi projetado para a detecção dos bósons, tem início com um cilindro de hidrogênio que fornece os átomos cujos prótons serão utilizados na experiência. Esse cilindro fica em uma das pontas de um acelerador linear (linac, do inglês *linear accelerator*). É nele que os prótons são injetados e acelerados, até obterem uma energia de 50 MeV, antes de serem direcionados para os aceleradores circulares. Em seguida, esses prótons são

direcionados para um síncrotron impulsador, o booster, composto por quatro anéis que recebem o feixe de prótons do linac e o aceleram até 800 MeV para então direcioná-lo ao Proton Synchrotron (PS).

No acelerador PS, os prótons são novamente acelerados até obterem uma energia de 26 GeV e então direcionados para colidirem com um alvo fixo de metal (4), produzindo um jato de partículas que inclui um pequeno número de antiprótons com energia de 3,5 GeV.

Esses antiprótons são recolhidos e transferidos para um anel de armazenamento circular, chamado acumulador de antipróton (AA), onde eles são, em primeiro lugar, pré-resfriados pelo método estocástico e, em seguida, transferidos para uma órbita ligeiramente menor, na qual são empilhados com os grupos previamente injetados e submetidos a mais resfriamento. Depois de algumas centenas de bilhões de antiprótons serem recolhidos, eles são enviados de volta para o anel PS e acelerados a 26 GeV, antes de serem injetados no Super Proton Synchrotron (SPS).

Enquanto isso, prótons de 26 GeV do anel PS são injetados no anel SPS para serem acelerados até obterem uma energia de 270 GeV. Os antiprótons, acelerados no PS, também são enviados para o SPS, porém são injetados de forma a circular na direção oposta de circulação dos prótons. Quando os dois feixes retêm a energia adequada para a colisão, eles são direcionados para colidirem no interior de dois detectores, o UA1 (Underground Area 1) e o UA2 (Underground Area 2).

Depois de os prótons e os antiprótons passarem por todo esse processo, eles estão prontos para a colisão. Nesse ponto, entram duas questões. A primeira é: *como detectar a presença dos bósons vetoriais produzidos em tais colisões?* Ora, sabe-se que uma partícula com curto tempo de vida pode ser detectada indiretamente pelos produtos de seu decaimento. Os bósons W e Z^0 decaem pela interação fraca, então se espera que o decaimento ocorra. Porém, em razão de sua massa, eles decaem muito mais rápido do que partículas mais leves. No decaimento de um W ou Z^0 , há uma enorme liberação de energia e, nessas

colisões de alta energia, frequentemente são produzidas mais de cem partículas diferentes (WATKINS, 1986).

A segunda pergunta é: *como selecionar os produtos de decaimento dos bósons W e Z^0* ? Quanto a isso, como Z^0 é neutro, espera-se que ele decaia em um par lépton-antilépton, ou seja, dois léptons com cargas opostas, por exemplo, um elétron e um pósitron ($Z^0 \rightarrow e^- + e^+$), um múon e um antimúon ($Z^0 \rightarrow \mu^- + \mu^+$). Como tanto o elétron quanto o múon têm massas bem menores do que o Z^0 , a previsão é de que os decaimentos produzam partículas com alta energia, pois toda a energia de repouso do Z^0 é transmitida para elas. Estatisticamente, o decaimento do Z^0 em um par elétron-pósitron ou múon-antimúon ocorre em apenas 6 % das vezes, no entanto esses modos de decaimento são os mais úteis na busca pela existência do Z^0 em colisões próton-antipróton (WATKINS, 1986).

Já os W^+ e W^- com carga elétrica +1 ou -1 devem decair em um lépton ou antilépton, com carga elétrica, e neutrinos ou antineutrinos, sem carga elétrica. Por exemplo, o W^- pode decair em um elétron e um antineutrino do elétron, um múon e um antineutrino do múon. Já o W^+ pode decair em um antilépton e o neutrino do elétron, em um antimúon e o neutrino do múon etc. Como o neutrino não pode ser detectado nas colisões, a identificação desses decaimentos é feita pela conservação do momento e da energia das partículas resultantes da colisão. Os decaimentos em lépton ou antilépton, acompanhados de neutrinos ou antineutrinos, representam aproximadamente 8 % das possibilidades de decaimento dos bósons W , no entanto, assim como no caso do decaimento do Z^0 , são os mais úteis nessa busca.

Os cálculos realizados para estimar a produção das partículas mediadoras W^+ , W^- e Z^0 em colisões de prótons e antiprótons a 540 GeV estimaram um decaimento de W a cada 10 milhões de colisões. No caso do Z^0 , essa previsão era de uma taxa de decaimento dez vezes menor. Assim, seriam necessários meses de trabalho contínuo nos aceleradores e detectores para identificar alguns desses eventos (WATKINS, 1986).

Como o acelerador era subterrâneo, cada detector no colisor teve que ser instalado também em uma área subterrânea. Desde o início, tudo foi acompanhado por uma série de grupos de pesquisa de países diferentes, que formaram as colaborações da área subterrânea 1 (UA1) e da área subterrânea 2 (UA2). As colaborações foram formadas com a missão de projetar e construir um detector para identificar e registrar colisões energéticas próton-antipróton na busca dos bósons W e Z^0 .

A decisão de ter dois experimentos independentes na busca dos bósons mostrou-se uma escolha sábia. Como os detectores são bastante complexos, é muito mais seguro ter dois experimentos em caso de falha grave em algum deles. Isso também introduziu um elemento adicional, a concorrência, o que assegurou que os resultados experimentais sejam extraídos o mais rápido possível (WATKINS, 1986, p. 67, tradução nossa).

Além disso, nos experimentos envolvendo aceleradores de partículas, é conveniente realizar dois experimentos com o mesmo objetivo, pois assim é possível confirmar ou refutar os resultados mutuamente. Por exemplo: no acelerador Tevatron do Fermilab, os experimentos CDF e DZero anunciaram juntos a evidência do quark top; e, no acelerador LHC, os experimentos ATLAS e CMS comprovaram a evidência do bóson de Higgs. No caso dos bósons W e Z^0 , o experimento UA1 os detectou e o experimento UA2 fez a confirmação.

Como a colisão gera muitas partículas diferentes, é necessário projetar vários detectores para procurar os produtos da decomposição dos bósons vetoriais. O detector UA1 é o resultado de um esforço colaborativo de uma equipe de mais de cem físicos de onze instituições na Europa e nos Estados Unidos: da Universidade de Aachen, do Laboratório de Física de Partículas de Annecy, da Universidade de Birmingham, do CERN, do Queen Mary College (Londres), do Collège de France, da Universidade da Califórnia (Riverside), da

Universidade de Roma (I), do Laboratório de Rutherford, do Centro de Pesquisa Nuclear Saclay e da Universidade de Viena (RUBBIA; VAN DER MEER; CLINE, 1982).

Parte do sucesso do projeto UA1, de acordo com Darriulat (2004), deve-se à experiência que os físicos obtiveram com o Intersecting Storage Rings (ISR), que foi o primeiro colisor de hádrons já construído no mundo, uma máquina na qual a jovem geração de físicos que projetou, construiu e operou o colisor próton-antipróton aprendeu e adquiriu suas experiências. Nela, as ideias de Van der Meer a respeito do arrefecimento estocástico foram experimentadas pela primeira vez, estudadas e compreendidas.

O detector UA1 tinha dez metros de comprimento por cinco metros de largura e massa total de aproximadamente 2 mil toneladas. Tratava-se de um dispositivo polivalente, feito para detectar vários tipos de partículas e recolher informações de um largo ângulo sólido em torno do ponto onde os feixes colidiam. Ele media a energia das partículas por vários meios, incluindo a curvatura dos seus caminhos em um campo magnético e se compunha de um detector central, um calorímetro eletromagnético, fotomultiplicadores, uma bobina de alumínio, um calorímetro hadrônico e um detector de múons. Detalhes dos componentes desse detector podem ser encontrados em Rubbia, Van der Meer e Cline (1982) e Watkins (1986), ou ainda em uma busca no repositório do CERN¹⁷.

O detector central era uma câmara de fios formada por três cilindros com dimensões aproximadas de dois metros de comprimento por dois metros de diâmetro. Dentro dos cilindros, havia uma mistura gasosa que envolvia as camadas de fios, separadas por três milímetros uma da outra. Existia uma diferença de potencial entre as camadas, que estavam empilhadas alternando cátodos e ânodos. Quando uma partícula carregada penetrava na câmara, ela ionizava o gás. Os

17 O CERN Documento Server (CDS) está disponível no seguinte endereço eletrônico: cds.cern.ch.

elétrons eram atraídos para os ânodos e os íons positivos para os cátodos. Quando isso acontecia, a presença da partícula era notada e, por meio de computadores, sua trajetória podia ser refeita.

O calorímetro eletromagnético era utilizado para medir com precisão a energia de elétrons e fótons provenientes da colisão. Era composto por camadas alternadas de cintiladores e chumbo, com aproximadamente um milímetro cada. Quando uma partícula carregada passava pelo cintilador, ele emitia um sinal luminoso. Esse sinal era captado por um fotomultiplicador, que o transformava em sinal elétrico. O calorímetro envolvia todo o detector central, inclusive nas extremidades.

Envolvendo o calorímetro eletromagnético, estava uma bobina de alumínio, de oitocentas toneladas, que era utilizada para gerar um campo magnético de 0,7 teslas no detector central. Para isso, na bobina, circulava uma corrente elétrica de 10 mil ampères. Dessa forma, produzia-se um campo magnético uniforme no volume do detector central e um campo magnético mínimo fora dele, fazendo os calorímetros operarem com êxito.

A bobina era envolta por um calorímetro hadrônico, utilizado para medir com precisão a energia de partículas que contêm quarks, por exemplo, prótons e nêutrons. Ele era formado por camadas alternadas de cinco centímetros de ferro e um centímetro de cintilador, em formato de C. Os sinais luminosos emitidos pelos cintiladores também eram transmitidos para fotomultiplicadores que os convertiam em sinais elétricos. Assim como o calorímetro eletromagnético, ele era fechado nas extremidades.

Envolvendo todas essas camadas de detectores, encontrava-se o detector de múons, formado por módulos de câmaras de múons, cada um com uma área de quatro por seis metros e quatro planos cruzados de tubos. Cada tubo tinha uma secção transversal de cinco por quinze centímetros. Um fio sensível atravessava o centro do tubo e detectava a ionização causada pela passagem de uma partícula carregada. Os tubos eram preenchidos com a mesma mistura gasosa que o detector central.

Desde a elaboração do projeto até o início dos experimentos, muitos testes foram realizados, e paulatinamente os aceleradores e detectores eram adaptados e instalados para promoverem as colisões.

As adaptações para a realização do experimento terminaram em 1981 e, em julho desse ano, foram observadas as primeiras colisões de próton-antipróton, com uma energia de 270 GeV por feixe. Ao final de dezembro, quando o experimento foi pausado para o feriado de Natal, mais de 250 mil colisões como essas tinham sido gravadas. No entanto, por causa da taxa comparativamente baixa na qual os bósons vetoriais intermediários são produzidos em colisões de próton-antipróton, não foi de estranhar que nenhum deles tenha sido detectado nessas primeiras séries. A situação só mudou na próxima fase de experiências, em que a intensidade dos feixes e a taxa de colisão foram aumentadas (RUBBIA; VAN DER MEER; CLINE, 1982).

Durante os preparativos para a segunda obtenção de dados, ocorreram alguns incidentes. Um deles foi com o detector central, que precisou ser desmontado, limpo e remontado para se prosseguir com o experimento. Após esse acidente, a gestão do CERN decidiu adiar a retomada dos experimentos para outubro de 1982.

Outro imprevisto ocorreu durante o verão de 1982, devido às frequentes tempestades que ocorriam nessa época do ano. A água começou a acumular na área subterrânea mais rápido do que qualquer bomba poderia removê-la, assim a camada de detectores de múons que ficava na parte inferior foi danificada pela inundação e precisou ser reparada (WATKINS, 1986).

Os primeiros dados de outubro de 1982 não apresentaram nenhum indício dos bósons procurados. Esse cenário mudou no início de novembro, quando, durante uma das sessões de rotina, um candidato ao bóson W^- foi encontrado, gerando grande entusiasmo e chamando a atenção de dezenas de físicos, ansiosos para observar todas as características do evento na área de digitalização. No entanto, ao analisarem detalhadamente o evento, os cientistas perceberam que

não era possível afirmar tratar-se de um decaimento do bóson W . Assim, a emoção foi contida e a busca continuou.

Dois dias depois, um segundo candidato W^- foi encontrado em outra sessão de verificação de rotina, o que, novamente, gerou entusiasmo e levou a estudos detalhados de todos os aspectos desse novo evento. Cópias do registro do evento, visto de todos os ângulos, foram feitas e distribuídas rapidamente para integrantes da colaboração UA1. Cada pessoa que estudou o evento tentou detectar um problema que poderia ter passado despercebido pelos demais, mas nada foi detectado após a inspeção, o que caracterizou esse evento como um excelente candidato a um bóson W^- decaindo em um elétron e seu antineutrino.

Entretanto, um único evento não confirmava a existência do bóson W^- , pois a detecção dos neutrinos e antineutrinos era feita com base na falta de uma porção da energia inicial. Por exemplo, ao somar todas as energias registradas nos calorímetros, se essa soma não coincidissem com o valor da energia inicial, era possível que neutrinos ou antineutrinos tivessem carregado a energia faltante sem serem registrados pelos detectores. Porém, os detectores não conseguem fazer uma varredura de todo o espaço em torno da colisão, existem lacunas entre eles que podem levar a uma falsa interpretação da presença de neutrinos ou antineutrinos. Isso pode ser resolvido com a presença de mais eventos, que corrigem esses efeitos de fundo e tornam os resultados mais convincentes.

Dessa maneira, a busca deveria continuar. Ao final da obtenção de dados, havia muito a ser analisado. Por meio de critérios de seleção, os eventos de interesse foram classificados e estudados pelas equipes de pesquisadores, até que restaram somente aqueles que poderiam ser interpretados como decaimentos dos bósons W .

Um *workshop* a respeito das colisões de prótons e antiprótons foi realizado na Universidade de Roma (I) de 12 a 14 de janeiro de 1983. Nesse encontro estavam presentes muitos experimentadores que participaram dos longos períodos de preparação e obtenção de dados no final de 1982. A sessão mais emocionante incluiu as apresentações de

Rubbia e Darriulat, que descreveram o *status* das buscas realizadas pelas experiências UA1 e UA2 para os bósons W e Z^0 .

A apresentação da colaboração UA1 foi conduzida por Rubbia, que conseguiu expor um grande volume de material em uma hora. Toda a experiência da UA1 foi revisada brevemente, desde as propriedades de cada parte do detector, até a seleção final de candidatos a W . Entre os resultados, não havia um único candidato a um bóson Z^0 , mas havia seis candidatos aos bósons W . Com relação à colaboração UA2, tampouco havia candidatos ao bóson Z^0 , mas foram apresentados quatro candidatos aos bósons W .

Quando as colaborações retornaram ao CERN, outros detalhes foram observados e nenhum outro problema foi identificado. A massa do bóson W poderia ser estimada pela combinação das medidas dos produtos do decaimento, logo ambas as colaborações foram capazes de citar a massa do bóson W como sendo aproximadamente de 80 GeV. Os resultados desses dois experimentos foram apresentados em seminários no auditório do CERN nos dias 20 e 21 de janeiro de 1983. E, no fim de semana seguinte, a colaboração UA1 começou a escrever um artigo científico a respeito dos eventos.

O anúncio oficial da evidência dos bósons W ocorreu em 25 de janeiro, em uma conferência de imprensa convocada no CERN. Foram apresentados os cinco eventos da colaboração UA1 e os quatro eventos da colaboração UA2 como evidências da existência dos bósons W . Havia então esperança de que o bóson Z^0 , produzido com menos frequência que os bósons W , ainda seria detectado.

Os esforços entusiasmados de um número enorme de pessoas foram aproveitados efetivamente. No primeiro artigo publicado, assinaram 135 autores, seguidos por mais dois artigos com 138 autores. A evidência bem-sucedida do bóson W foi uma recompensa pelo trabalho em equipe em uma escala sem precedentes em experiências científicas.

Depois de todo o entusiasmo, era, por fim, necessário retornar ao trabalho, analisar o restante dos dados e retomar a obtenção de dados. Os aceleradores foram utilizados para outros experimentos e

a retomada de colisões foi programada para começar em 12 de abril de 1983 e durar até julho. O objetivo imediato dessa etapa era claro: acumular outros exemplos de decaimento do bóson W e encontrar evidências do bóson Z^0 .

Em 4 de maio de 1983, o primeiro candidato Z^0 foi identificado a partir da análise de uma colisão ocorrida em 30 de abril. Novamente, todos os cuidados foram tomados para que não ocorresse nenhuma interpretação falsa e chegou-se à conclusão de que se tratava de um evento de decaimento do bóson Z^0 em um par elétron-pósitron. Logo depois dessa confirmação, houve a observação de outra possibilidade do decaimento de Z^0 , no par múon-antimúon. Ambas as observações foram realizadas pela colaboração UA1.

Esses resultados foram apresentados em um seminário no CERN e, em seguida, os experimentos continuaram a busca por mais eventos. Dias após o seminário, mais dois eventos foram observados pela UA1. E em 1º de junho de 1983, o CERN anunciou formalmente as evidências da existência do bóson Z^0 .

A colaboração UA1 escreveu um artigo científico a respeito dessas observações, que incluiu quatro decaimentos em um par elétron-pósitron e um decaimento em um par múon-antimúon. Esse artigo foi submetido para publicação em 6 de junho de 1983 e citou uma massa para o bóson Z^0 de $95,2 \pm 2,5$ GeV. O experimento UA2 também detectou candidatos Z^0 . Essas duas colaborações reuniram nove eventos de decaimento desse bóson, com uma massa aproximada de 93 GeV, o que estava em excelente concordância com as previsões detalhadas da Teoria Eletrofraca.

Os registros dessas detecções, tanto do decaimento do W^- como do decaimento do Z^0 , podem ser consultados no repositório do CERN (CERN DOCUMENT SERVER, 1982, 1983). Trata-se de evidências empíricas conclusivas da Teoria Eletrofraca, segundo a qual a interação eletrofraca é mediada por quatro partículas: o fóton (γ), partícula não massiva e mediadora da interação eletromagnética, e três bósons vetoriais massivos, W^+ , W^- e Z^0 , mediadores da interação fraca.

Como dito anteriormente, de acordo com essa teoria, a princípio as partículas têm massa nula e estão sujeitas à simetria de gauge. No entanto, por meio do mecanismo de Higgs, do qual participam o dubleto Higgs (H^+ , H^0) e seu antidubleto (H^- , \bar{H}^0), há a quebra espontânea de simetria. Quando isso ocorre, o fóton (γ) permanece com massa nula, porém o W^+ e o W^- adquirem massa por incorporação dos bósons carregados (H^\pm), ao passo que o Z^0 adquire massa de uma parte dos bósons neutros ($H^0 + \bar{H}^0$), ficando a outra parte ($H^0 - \bar{H}^0$) como uma nova partícula bosônica escalar de spin 0, o chamado bóson de Higgs.

Essa teoria já havia sido aceita pela comunidade científica mesmo antes da detecção dos bósons W^+ , W^- e Z^0 , com seus propositores ganhando o Prêmio Nobel de 1979. Por fim, em 2012, foi anunciada a evidência experimental de uma partícula que provavelmente seria o bóson de Higgs. Com o anúncio dessa evidência empírica, também veio um intenso trabalho dos pesquisadores para obter mais medidas e informações a respeito dessa partícula até que fosse confirmada a detecção.

Com base nessa composição histórica, pôde-se entender o processo de elaboração da teoria das interações eletrofracas e observar a relevância das formulações teóricas, bem como o papel que as equipes experimentais e seus experimentos tiveram na elucidação dos desafios daquela época.

Referências

- ABDALLA, M. C. B. **O discreto charme das partículas elementares**. São Paulo: Editora Unesp, 2006.
- ANDERSON, P. W. Plasmons, gauge invariance, and mass. **Physical Review**, v. 130, n. 1, p. 439-442, 1963.
- BASSALO, J. M. F. O bóson de Higgs (“a Partícula Deus”) e a Partícula Z^0 (“a Partícula de Deus”). **Norte Ciência**, v. 3, n. 1, p. 1-26, 2012.

- BASSALO, J. M. F. Partículas elementares: do átomo grego à supercorda. *In*: CARUSO, F.; SANTORO, A. (org.). **Do átomo grego à física das interações fundamentais**. Rio de Janeiro: Aia-fex, 1994. p. 87-165.
- BASSALO, J. M. F.; CATTANI, M. S. D. **Teoria de grupos para físicos**. São Paulo: Instituto de Física/Universidade de São Paulo, 2011. *E-book*.
- BATISTA, I. L. **A teoria universal de Fermi**: da sua formulação inicial até a reformulação V-A. 1999. Tese (Doutorado em Filosofia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- BATISTA, I. L. As partículas estranhas e a teoria universal de Fermi. *In*: PIETROCOLA, M.; FREIRE JR., O. (org.). **Filosofia, ciência e história**: uma homenagem aos 40 anos de colaboração de Michel Paty com o Brasil. São Paulo: Discurso, 2005. p. 437-471.
- BATISTA, I. L. Reconstruções histórico-filosóficas e a pesquisa interdisciplinar em educação científica e matemática. *In*: BATISTA, I. L.; SALVI, R. F. (org.). **Pós-graduação em ensino de ciências e educação matemática**: um perfil de pesquisas. Londrina: Eduel, 2009. p. 35-50.
- 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: UEL, 2016. p. 157-167.
- BETHE, H. A. The meson theory of nuclear forces. **Physical Review**, v. 57, p. 260-272, 1940.
- BETHE, H. A.; NORDHEIM, L. W. On the theory of meson decay. **Physical Review**, v. 57, p. 998-1006, 1940.
- BROWN, L. M. *et al.* The rise of the standard model: 1964-1979. *In*: HODDESON, L. *et al.* (ed.). **The rise of the standard model**: a history of particle physics from 1964 to 1979. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 3-35.

- CERN DOCUMENT SERVER. **UA1**: first Z event recorded. 30 Apr. 1983. 1 imagem. Disponível em: <https://cdsweb.cern.ch/record/615824>. Acesso em: 14 jan. 2022.
- CERN DOCUMENT SERVER. **UA1**: W particle decay. 1982. 1 imagem. Disponível em: <http://cds.cern.ch/record/39467/?ln=pt>. Acesso em: 14 jan. 2022.
- CHAVES, A. S. **Desenvolvimento de um criostato para caracterização elétrica do GaAs semi-isolante**. 2012. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.
- COMPOSIÇÃO. *In*: GRANDE DICIONÁRIO HOUAISS. Rio de Janeiro: Instituto Antônio Houaiss, 2023. Versão online.
- 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. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.
- CREASE, R. P.; MANN, C. C. **The second creation**: makers of the revolution in twentieth-century physics. New Jersey: Rutgers University Press, 1996.
- DARRIULAT, P. The discovery of the W & Z, a personal recollection. **European Physical Journal C**, v. 34, n. 1, p. 33-40, 2004.
- ESPICHÁN CARRILLO, J. A. **Métodos de regularização em teoria de campos e gama-fluidos**. 1995. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.
- FEYNMAN, R. P.; GELL-MANN, M. Theory of the Fermi interactions. **Physical Review**, v. 109, p. 193-198, 1958.
- FORMAN, P. The fall of parity. **The Physics Teacher**, v. 20, n. 5, p. 281-288, 1982.
- 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.

- FRANKLIN, A. **Experiment, right or wrong**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- FRANKLIN, A. **The neglect of experiment**. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- GALISON, P. **How experiments end**. Chicago: University of Chicago Press, 1987.
- GALISON, P. How the first neutral-current experiments ended. **Reviews of Modern Physics**, v. 55, n. 2, p. 477-509, 1983.
- 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. 1415-1417, 1957.
- GLASHOW, S. L. Partial-symmetries of weak interactions. **Nuclear Physics**, v. 22, n. 4, p. 579-588, 1961.
- GLASHOW, S. L. Towards a unified theory: threads in a tapestry. **Review of Modern Physics**, v. 52, n. 3, p. 539-543, 1980.
- HAIDT, D. The discovery of neutral currents. **European Physical Journal C**, v. 34, n. 1, p. 25-31, 2004.
- HAIDT, D.; PULLIA, A. The weak neutral current: discovery and impact. **La Rivista del Nuovo Cimento**, v. 36, n. 8, p. 335-395, 2013.
- HAMMOND, R. **Chien-Shiung Wu: pioneering nuclear physicist**. New York: Chelsea House Publications, 2010.
- HASERT, F. J. *et al.* Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the Gargamelle neutrino experiment. **Nuclear Physics B**, v. 73, n. 1, p. 1-22, 1974.
- HASERT, F. J. *et al.* Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the Gargamelle neutrino experiment. **Physics Letters**, v. 46B, n. 1, p. 138-140, 1973a.
- HASERT, F. J. *et al.* Search for elastic muon-neutrino electron scattering. **Physics Letters**, v. 46B, n. 1, p. 121-124, 1973b.
- 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:** a chronicle of selected NBS/NIST Publications, 1901-2000. Washington: NBS: NIST, 2001. p. 111-115. (NIST Special Publication 958).
- KLEIN, O. On the theory of charged fields. **Surveys in High Energy Physics**, v. 5, n. 3, p. 269-285, 1986.
- LEADER, E.; PREDAZZI, E. **An introduction to gauge theories and the “new physics”**. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- LEDERMAN, L. M.; TERESI, D. **The god particle: if the universe is the answer, what is the question?** Boston: Mariner Books; New York: Houghton Mifflin Harcourt, 2006.
- LEE, T. D.; YANG, C. N. Implications of the intermediate boson basis of the weak interactions: existence of a quartet of intermediate bosons and their dual isotopic spin transformation properties. **Physical Review**, v. 119, n. 4, p. 1410-1419, 1960.
- LEE, T. D.; YANG, C. N. Mass degeneracy of the heavy mesons. **Physical Review**, v. 102, n. 1, p. 290-291, 1956.
- LEE, T. D.; YANG, C. N. Parity nonconservation and a two-component theory of the neutrino. **Physical Review**, v. 105, n. 5, p. 1671-1675, 1957.
- LEITE LOPES, J. A model of the universal Fermi interaction. **Nuclear Physics**, v. 8, p. 234-236, 1958.
- LEITE LOPES, J. Weak interaction physics: from its birth to the electroweak model. **Química Nova**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, p. 146-163, 1988.
- LESOV, A. **The weak force: from Fermi to Feynman**. Senior Thesis (Bachelor of Science in Engineering Physics) – University of South Carolina, Columbia, 2009.
- MORRISON, M. **Unifying scientific theories: physical concepts and mathematical structures**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

- PICKERING, A. Against putting the phenomena first: the discovery of the weak neutral current. **Studies in History and Philosophy of Science Part A**, v. 15, n. 2, p. 85-117, 1984.
- PIRES, A. S. T.; CARVALHO, R. P. **Por dentro do átomo**: física de partículas para leigos. São Paulo: 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. 4301.1-4301.5, 2008.
- PRESCOTT, C. Weak-electromagnetic interference in polarized electron-deuteron scattering. *In*: HODDESON, L. *et al.* (ed.). **The rise of the standard model**: a history of particle physics from 1964 to 1979. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 459-477.
- PRESCOTT, C. *et al.* Parity non-conservation in inelastic electron scattering. **Physics Letters B**, v. 77, n. 3, p. 347-352, 1978.
- RIESELMANN, K. Weak neutral current. **Symmetry**: dimensions of particle physics. Aug. 2009. Disponível em: <https://www.symmetrymagazine.org/article/august-2009/weak-neutral-current>. Acesso em: 12 out. 2021.
- ROUSSET, A. The discovery of weak neutral currents. **Nuclear Physics B**, v. 36, p. 339- 362, 1994.
- RUBBIA, C.; VAN DER MEER, S.; CLINE, D. B. The search for intermediate vector bosons. **Scientific American**, v. 246, n. 3, p. 48-59, 1982.
- SALAM, A. Gauge unification of fundamental forces. **Review of Modern Physics**, v. 52, n. 3, p. 525-538, 1980.
- SALAM, A. Unificação das forças fundamentais. *In*: SALAM, A.; DIRAC, P.; HEINSENBERG, W. **Em busca da unificação**. Lisboa: Gradiva, 1991. p. 7-72.
- SALAM, A.; DIRAC, P.; HEINSENBERG, W. **Em busca da unificação**. Lisboa: Gradiva, 1991.

- SALAM, A.; HEINSENBERG, W.; DIRAC, P. A. M. **A unificação das forças fundamentais**: o grande desafio da física contemporânea. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1993.
- SEGRÈ, E. **Dos raios X aos quarks**: físicos modernos e suas descobertas. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1987.
- SOARES, B. L. **Simetrias globais e locais em teorias de calibre**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- SOUZA, R. S.; SILVA, A. P. B.; ARAUJO, T. S. James Prescott Joule e o equivalente mecânico do calor: reproduzindo as dificuldades do laboratório. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 36, n. 3, p. 3309.1-3309.9, 2014.
- SZPAK, W. **Deteção acústica do efeito magnetocalórico**: parâmetros que influenciam a ciclagem térmica. 2009. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.
- 'T HOOFT, G. Gauge theories of the forces between elementary particles. **Scientific American**, v. 242, n. 6, p. 104-141, 1980.
- 'T HOOFT, G. Renormalization of gauge theories. *In*: HODDESON, L. *et al.* (ed.). **The rise of the standard model**: a history of particle physics from 1964 to 1979. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 179-198.
- WATKINS, P. **Story of the W and Z**. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- WEINBERG, S. Conceptual foundations of the unified theory of weak and electromagnetic interactions. **Review of Modern Physics**, v. 52, n. 3, p. 515-523, 1980.
- WEINBERG, S. Electroweak reminiscences. *In*: NEWMAN, H. B.; YPSILANTIS, T. (ed.). **History of original ideas and basic discoveries in particle physics**. New York: Plenum Press, 1996. p. 27-36.
- WEINBERG, S. The making of the standard model. **The European Physical Journal C**: particles and fields, v. 34, n. 1, p. 5-13, 2004.

- WINSBERG, E. Computer simulations in science. **Stanford Encyclopedia of Philosophy**. 2015. Disponível em: <https://plato.stanford.edu/entries/simulations-science/>. Acesso em: 16 jun. 2018.
- WU, C. S. Parity violation. *In*: NEWMAN, H. B.; YPSILANTIS, T. (ed.). **History of original ideas and basic discoveries in particle physics**. New York: Plenum Press, 1996. p. 381-400.
- WU, C. S. *et al.* Experimental test of parity conservation in beta decay. **Physical Review**, v. 105, p. 1413-1415, 1957.
- YANG, C. N.; MILLS, R. L. Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance. **Physical Review**, v. 96, n. 1, p. 191-196, 1954.



SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE EXPERIMENTOS HISTÓRICOS DA TEORIA ELETROFRACA

*Márcia da Costa
Murilo Crivellari Camargo
Yago Henrique Pereira
Irinéa de Lourdes Batista
Jacques Duílio Brancher*

O estudo e o ensino de temas relacionados à Física Moderna Contemporânea (FMC) não é uma tarefa trivial, pois envolve fenômenos abstratos, idealizados, de sofisticada físico-matematização e aparatos experimentais de alto custo financeiro¹. Ao tratar da Física de Partículas, fala-se de partículas elementares, elétrons, glúons, bósons mediadores, bósons de Higgs, correntes neutras, interações fundamentais na matéria, enfim, conceitos e assuntos que podem não ficar claros perante uma abordagem tradicional de ensino. Além disso, ao procurar uma abordagem experimental, em muitos casos, os professores

¹ Este capítulo é parte de um artigo que foi publicado na revista *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Ver Costa e outros (2021).

se deparam com experimentos feitos em grandes laboratórios e com equipamentos sofisticados, caros e, em alguns casos, aparatos que exigem construções de grande magnitude, inclusive inexistentes em vários países. Isso dificulta o desenvolvimento e a aplicação de uma abordagem para sala de aula.

Assim, uma das alternativas é a utilização de simulações virtuais, o que pode tornar o processo de ensino e de aprendizagem mais interativo e menos abstrato (MEDEIROS; MEDEIROS, 2002; SANTOS; DICKMAN, 2019; SMETANA; BELL, 2012). Elas possibilitam que fenômenos e experimentos sejam simulados de maneira a oferecer a estudantes uma forma de interação com o objeto de estudo e uma oportunidade de testar hipóteses, aprender com seus erros e seguir o processo de aprendizagem de acordo com seu nível de aproveitamento.

Além do mais, as simulações conseguem tornar conceitos e assuntos menos abstratos. Embora não consigam abranger todas as variáveis e complexidades de um fenômeno ou experimento real, permitem a observação de situações virtuais e representações de fenômenos por meio de modelos com objetivos didáticos, uma vez que a observação real de certos experimentos se mostra inviável ou impossível de acontecer. Ainda, possibilitam uma mudança no papel desempenhado pelo aluno, pois as simulações exigem dele respostas e tomada de decisões (CARDOSO; DICKMAN, 2012; FIGUEIRA, 2005).

Portanto, este capítulo tem o objetivo de apresentar alternativas para o ensino de tópicos de FMC no ensino superior por meio da simulação de experimentos históricos e sugestões para sua aplicação em sala de aula. Os experimentos históricos foram escolhidos, entre as estratégias de inserção de história e filosofia da ciência, por se tratar de um recurso que engloba tanto o enfoque histórico quanto a experimentação, que são abordagens contextualizadoras, articuladoras e integradoras. Esse enlace carrega a potencialidade de criar estímulo, motivação e desafios e, com isso, de aprimorar situações de ensino e facilitar a aprendizagem em ciências, especialmente na

Física. Partindo de pressupostos diferentes, os dois enfoques têm o mesmo objetivo: transformar as aulas em ambientes que promovam a aprendizagem de forma não mecânica, favorecendo a argumentação e o protagonismo de estudantes (HEERING; WITTJE, 2012; SOUZA; SILVA; ARAUJO, 2014).

A Teoria Eletrofraca foi escolhida, entre os tópicos de FMC, por envolver o processo de unificação de duas das interações fundamentais da natureza e ter sido um passo significativo para um essencial entendimento da natureza da matéria e para o que hoje se conhece como “Modelo Padrão da Física de Partículas”. A presença de temas da Física de Partículas é relevante nos currículos dos cursos de licenciatura em Física, pois incluem assuntos de FMC participantes da cultura atual, relacionados com o progresso da ciência e presentes no cotidiano de estudantes para os quais os futuros professores lecionarão.

Convém mencionar que as simulações aqui apresentadas são parte dos resultados de uma pesquisa de doutorado e passaram por avaliações de pares e de usuários, o que possibilitou seu aprimoramento e a discussão acerca de suas vantagens para situações de aprendizagem, entre as quais: a boa aceitação entre estudantes e indícios de aprendizagem significativa a respeito dos conhecimentos científicos e seu processo de elaboração.

Simulação virtual de experimentos históricos no ensino de Física

De acordo com Heering e Wittje (2012), os experimentos são essenciais para uma educação científica e têm desempenhado um papel relevante no ensino de ciências desde o século XVIII. Assim, os experimentos históricos podem ser considerados como uma oportunidade para associar os benefícios da história da ciência com aqueles das atividades experimentais em sala de aula. Essa combinação tem a vantagem de envolver tanto os estudantes que se interessam pelos

relatos históricos como os que preferem as atividades experimentais (SOUZA; SILVA; ARAUJO, 2014).

Por experimento histórico deve-se entender “toda e qualquer tentativa bem-sucedida em estabelecer um marco de referência conceitual e/ou metodológica na definição e/ou solução de um determinado problema específico” (RIBEIRO JUNIOR; CUNHA; LARANJEIRAS, 2012, p. 4602-1). Também pode ser interpretado como experiências que surgem a partir do estudo da ciência do passado (CHANG, 2011).

Chang (2011) elenca diferentes tipologias de experimentos históricos. Existem dois tipos que se qualificam como “replicação”: um deles se preocupa com a reprodução mais fiel possível de um instrumento histórico, enquanto o outro dá mais ênfase para a reprodução fiel dos fenômenos físicos alcançados pelo experimento. Além deles, o autor cita o caso de “extensão” do experimento, quando o estudante age motivado pela curiosidade de testar novas hipóteses e pode chegar às próprias conclusões. Uma quarta tipologia são as “reconstruções históricas”, descritas por Metz e Stinner (2007), uma abordagem guiada por uma narrativa histórica com a qual os estudantes têm a oportunidade de interagir por meio de experimentos elaborados por eles mesmos com materiais alternativos e de baixo custo.

No entanto, independentemente da tipologia adotada, as dificuldades de replicação real de um experimento histórico são variadas, indo desde a falta de informações precisas nos documentos históricos até a falta de recursos e aparatos técnicos utilizados nos experimentos originais. Para amenizar o primeiro problema, é necessário que o investigador tenha acesso a várias fontes de informação, desde os artigos originais até fontes secundárias que apresentem detalhamentos, fotos ou quaisquer outros registros que auxiliem na elucidação de todo o procedimento experimental (CHANG, 2011; HEERING, 2005).

Uma alternativa para resolver a falta de recursos e aparatos técnicos é a simulação virtual do processo. Assim, mantém-se a representação fidedigna do procedimento e cria-se a possibilidade de que

o recurso seja utilizado por vários estudantes ao mesmo tempo, em qualquer lugar, o que é impraticável com replicações reais (RIBEIRO JUNIOR; CUNHA; LARANJEIRAS, 2012).

Além disso, a partir das pesquisas feitas, considerou-se necessário, para a elaboração de simulações que se tornem recursos didáticos efetivamente inovadores e eficientes para a aprendizagem dos estudantes, levar em conta aspectos de teorias de aprendizagem. Um exemplo é a Teoria da Aprendizagem Significativa, que sugere a consideração de princípios como: conhecimentos prévios dos estudantes, organização sequencial, diferenciação progressiva, reconciliação integradora, recursividade e consolidação dos conteúdos. Ainda, por se tratar de simulações de experimentos, o V de Gowin pode figurar como um instrumento auxiliar no desenvolvimento e avaliação das atividades (AUSUBEL, 2003; GOWIN; ALVAREZ, 2005).

Neste trabalho, foram consideradas características das tipologias definidas por Chang (2011) e Metz e Stinner (2007). Segundo esses autores, os experimentos históricos reproduzidos buscam representar, da forma mais fiel possível, experimentos originais e/ou fenômenos físicos por eles abordados. Também sua construção textual histórica permite a interação do estudante com o contexto da experimentação original, que, nesse caso, se desenvolve com a simulação virtual.

Ensinar e aprender Física, tanto nas escolas como em universidades, não é uma tarefa fácil por várias razões. Segundo Medeiros e Medeiros (2002), uma delas é o fato de que a disciplina trabalha com vários conceitos, muitos dos quais bastante abstratos, tornando-se a matemática uma ferramenta essencial no desenvolvimento dessa ciência. Além do mais, ela estuda fenômenos que, frequentemente, estão fora do alcance dos sentidos biológicos do ser humano, a exemplo de partículas subatômicas, corpos com altas velocidades, entre outros processos dotados de grande complexidade. Quando esses fenômenos são abordados com métodos de ensino desajustados das teorias de aprendizagem recentes, os estudantes muitas vezes se sentem entediados e perdidos diante da Física.

Os resultados das pesquisas em ensino de física mostram que uma abordagem tradicional de quadro e giz pode não ser o suficiente para motivar os estudantes ou responder à curiosidade da maioria deles, tendo em vista que o aprendizado é um processo individual e repleto de subjetividade, em que nem todos se implicam ao mesmo tempo e mediante as mesmas metodologias. No caso específico da disciplina de Física, existem conteúdos com alto grau de abstração, idealização e modelação, cuja compreensão exige mais do que uma abordagem oral e tradicional. Assim, as simulações virtuais de experimentos, construídas com cuidado teórico-metodológico, se configuram como uma alternativa para tornar o ensino de Física mais atrativo, interessante e compreensível, uma vez que permitem a observação de sistemas complexos difíceis de imaginar apenas escutando o professor ou lendo textos. Dessa forma, a exploração de simulações ajuda estudantes a estruturarem sistemas complexos em sua mente em vez de apenas memorizá-los (CARDOSO; DICKMAN, 2012; FIOLHAIS; TRINDADE, 2003; TOVAL; FLORES, 1987). Além disso, de acordo com uma revisão abrangente e crítica da literatura a respeito das simulações no ensino de ciências, Smetana e Bell (2012) sugerem que as simulações virtuais são eficientes para promover o aprendizado de conceitos, a alteração conceitual e o desenvolvimento de habilidades processuais em aprendizes.

Martins, Fiolhais e Paiva (2003) defendem o uso das simulações virtuais pelo fato de aumentarem a atratividade das aulas e estimularem a aprendizagem, mesmo considerando que elas não substituem as atividades experimentais. Ademais, uma de suas potencialidades é complementar atividades práticas, uma vez que nem sempre é possível realizar experimentos de determinados conteúdos. Assim, as simulações permitem a visualização de aspectos teóricos que não podem ser observados experimentalmente, como é o caso da representação de campos elétricos e magnéticos variando em uma onda eletromagnética.

As simulações virtuais são abordadas na literatura científica pelo menos há quatro décadas. Elas são utilizadas no contexto científico

e escolar oferecendo alternativas para a resolução de problemas. São úteis na educação científica por facilitarem a aprendizagem de conceitos e processos e, quando projetadas adequadamente, podem estimular o pensamento crítico e ajudar o aluno a levantar hipóteses, prever o curso e os resultados de determinadas ações, entender causas e consequências, explorar efeitos da modificação de parâmetros preliminares, avaliar ideias e obter *insights* (PSYCHARIS, 2011).

No âmbito científico, elas assumem um papel mais relevante do que o de uma ferramenta, constituindo uma nova forma de produção científica. Esse novo modo de produzir conhecimento científico expandiu o número de fenômenos que podem ser modelados e aumentou significativamente a capacidade de testar hipóteses em modelos cujos testes reais sejam inviáveis (GRECA; SEOANE; ARRIASSECQ, 2014).

Entre as vantagens do uso de simulações virtuais para o ensino de Física já listadas na literatura, acrescenta-se a possibilidade de exploração de noções a respeito do trabalho dos cientistas. As simulações favorecem discussões a respeito da construção do conhecimento científico e a interação com experimentos históricos considerados relevantes, que, antes disso, só podiam ser descritos por vídeos, imagens e textos. Desse modo, ajudam os estudantes a desenvolverem habilidades estáveis de raciocínio e tomada de decisão baseada no conhecimento científico (DEVELAKI, 2017).

Além do mais, a reprodução de experimentos históricos, de acordo com Souza, Silva e Araujo (2014), possibilita a exploração de perspectivas epistemológicas e metodológicas, pois o processo de reconstrução do experimento, o levantamento de hipóteses, as propostas elaboradas para resolver os problemas e a análise dos resultados obtidos mostram a complexidade do conhecimento científico e o papel dos experimentos.

As simulações virtuais de experimentos históricos caracterizam-se como alternativas para o desenvolvimento de atividades investigativas. O ensino investigativo é uma estratégia didática

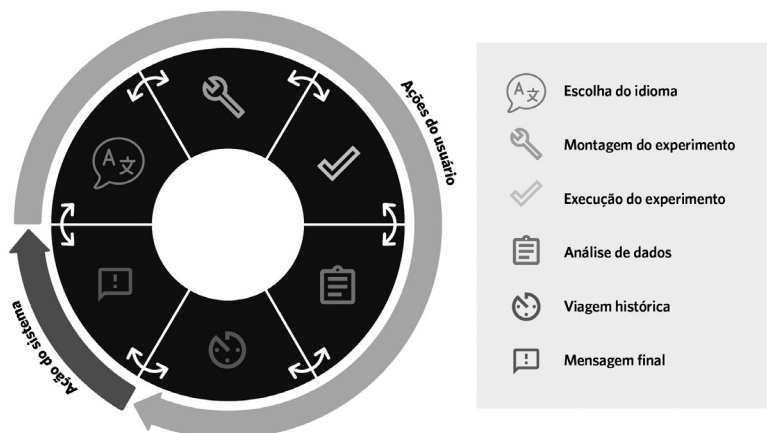
utilizada para elaborar sequências de atividades centradas no aluno visando tanto o “aprendizado dos conceitos, termos e noções científicas” quanto o “aprendizado de ações, atitudes e valores próprios da cultura científica” (CARVALHO, 2013, p. 13). Em uma atividade experimental investigativa, a ação do estudante não deve limitar-se puramente ao trabalho de manipulação de objetos ou à observação de fenômenos. Ela precisa emular “um trabalho científico: em que o aluno deve refletir, discutir, explicar e relatar o que dará ao seu trabalho as características de uma investigação científica” (AZEVEDO, 2004, p. 21).

Apresentação geral das simulações

As três simulações propostas são exploradas em passos distribuídos de forma semelhante em todas elas. O usuário precisa completar todas as atividades de uma etapa para seguir ao próximo passo, mas ele também pode retornar e refazer passos anteriores quantas vezes achar necessário para testar suas hipóteses e tirar dúvidas. Desse modo, garante-se que o usuário adquira os conhecimentos prévios necessários antes de prosseguir na realização do experimento virtual.

Ao iniciar a simulação, a primeira tela que aparece é a de escolha dos idiomas: português, inglês ou espanhol. Após escolher o idioma que deseja utilizar, o usuário monta o experimento ou entende como formatá-lo. No(s) próximo(s) passo(s), ele recebe a tarefa de realizar alguma atividade relacionada à execução do experimento. Depois, analisa resultados dos passos anteriores ou dados históricos dos experimentos originais e, por fim, no último passo, acessa informações históricas a respeito do experimento simulado. Ao terminar a exploração, é exibida uma mensagem indicando que a tarefa foi concluída e são propostos os próximos desafios. A Figura 1 apresenta as etapas mencionadas:

Figura 1 – Fluxograma da exploração das simulações



Fonte: Elaboração própria.

A tela geral dos experimentos, que aparece após a seleção do idioma, foi elaborada seguindo um padrão. A adoção do mesmo *design* nas três simulações propostas facilita o trabalho do programador e a familiarização do usuário com a interface. A Figura 2 ilustra de modo genérico a interface geral das simulações. Durante a exploração da simulação, caso necessite, o usuário pode consultar uma representação semelhante clicando sobre o ícone “ajuda” (?), localizado no canto superior direito de todas as simulações.

Figura 2 – Representação da interface geral das simulações



Fonte: Elaboração própria.

O usuário é guiado por mensagens que aparecem na parte superior da tela, logo abaixo dos passos do experimento. Elas são exibidas nas cores verde, amarela e vermelha para guiar a exploração indicando sucesso, orientação ou notificação de erro, respectivamente. A navegação pelas mensagens é feita graças a setas dispostas sobre elas. Além disso, é possível excluir uma a uma, utilizando a lixeira, ou todas de uma vez só, utilizando o botão “limpar mensagens”. Para evitar equívocos, as mensagens são excluídas automaticamente quando o usuário vai para o próximo passo do experimento. Como a causa de um erro é informada nas mensagens, o usuário pode aprender a partir dele e corrigi-lo em próximas tentativas.

No painel de controle da esquerda, o usuário poderá fazer escolhas e observar algumas saídas. Na parte inferior, estão os botões de ação por meio dos quais ele faz testes e navega entre os passos e entre ações dentro dos próprios passos. Para retroceder a um passo anterior,

basta clicar sobre o botão de ação que o identifica. A única restrição é que não se pode pular passos sem realizar as atividades solicitadas. Para sanar dúvidas em relação à interface das simulações, informações adicionais são exibidas ao clicar no ícone (i), no canto superior direito.

É importante salientar que uma aula utilizando simulações virtuais pode apresentar os mesmos resultados de uma abordagem tradicional se a exploração não for orientada por uma perspectiva investigativa. Portanto, é relevante levar em consideração os conhecimentos prévios dos estudantes e permitir que os materiais complementares ajam como organizadores preliminares, fontes de informação para a exploração das simulações e apresentem o(s) problema(s) que o usuário deve resolver por meio das simulações. Desse modo, para cada uma das simulações aqui apresentadas, é necessário que ocorra uma introdução ao problema a ser respondido e que sejam fornecidos os conhecimentos prévios para sua exploração. Se o objetivo for trabalhar com as três simulações para abordar o processo de elaboração da Teoria Eletrofraca, os mesmos requisitos precisam ser atendidos.

Além disso, há a necessidade de elaborar uma síntese individual das atividades, na forma de um relatório escrito ou de um V de Gowin, o que vai permitir que o professor mapeie o entendimento dos alunos. A partir disso, o professor pode promover uma consolidação dos conteúdos para discutir os resultados do experimento e suas implicações, com o objetivo de corrigir eventuais imprecisões, observar a manifestação de recursividade e reforçar conclusões.

A seguir são apresentadas três simulações virtuais que podem ser utilizadas, em conjunto, para o ensino da Teoria Eletrofraca ou, separadamente, para o ensino dos tópicos de paridade nas interações fracas, correntes neutras e detecção dos bósons da interação fraca².

2 Convém registrar que a literatura indica, na verdade, quatro experimentos como relevantes no processo de consolidação da Teoria Eletrofraca. Porém, o experimento que ocorreu entre o experimento da câmara de Gargamelle (experimento 2) e o experimento com detectores UA1 e UA2 (experimento 3) não foi

Experimento 1: comportamento da paridade nas interações fracas

O primeiro experimento a ser simulado foi o realizado pela cientista Wu e sua equipe e que evidenciou a violação da paridade nas interações fracas³. Consequentemente, levou à reformulação da teoria que as descrevia, culminando nas primeiras propostas de unificação das interações eletromagnética e fraca.

Ao explorar as simulações virtuais, recomenda-se que seja feito um planejamento, o que implica a contextualização do experimento e do problema que ele se propunha a resolver. Nesse caso, o problema que os estudantes deverão solucionar por meio da simulação virtual é o seguinte: *a paridade se conserva na interação fraca?* E entre os conhecimentos prévios necessários para dar início à exploração, citam-se: definição de interações fracas e eletromagnéticas, decaimento beta, o problema θ - τ (θ - τ), polarização, paridade, entre outros.

Desde a ideia de como realizar o teste experimental até seu desfecho, muitos problemas precisaram ser resolvidos por cientistas, então a sugestão é que esses problemas sejam apresentados a estudantes para que possam pensar em possíveis soluções e testar suas hipóteses na simulação, dando um caráter investigativo à atividade.

Uma alternativa é apresentar os problemas por meio de exposição oral, complementada por um texto que sirva de guia para iniciar a simulação do experimento. A ideia é que cada estudante articule tais informações com aquelas da simulação e assim consiga tomar suas decisões.

simulado computacionalmente por não terem sido encontradas informações históricas e técnicas suficientes para isso. Mais detalhes desse experimento podem ser consultados em Costa (2019).

3 Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1d2S4zlokYL9AZ-chc3dremIPQtSaEgrsl?usp=sharing>. As instruções estão inclusas na pasta compartilhada pelo *link*.

Por exemplo, um dos desafios enfrentados para a reprodução do experimento real consiste no fato de que o processo precisa ser feito em um equipamento com isolamento térmico suficiente para realizar as medidas. Para resolver esse problema, à época, cientistas colocaram a amostra e o detector de partículas beta dentro de um dispositivo que controlava e mantinha baixas as temperaturas. Essa informação pode ser dada por escrito e/ou de forma oral, uma vez que, na simulação, a descrição do criostato, um dos itens disponíveis para a montagem do experimento, inclui aspectos semelhantes. Dessa forma, o estudante pode perceber que o criostato é um dos itens necessários para realizar a montagem do experimento.

Ao começar a exploração da simulação, os estudantes recebem uma mensagem conferindo-lhes a tarefa de montar o aparato experimental e, para isso, a simulação exibe uma lista de materiais que podem ou não ser úteis na realização do experimento. Os estudantes escolhem os itens com base nas informações prévias e testam suas hipóteses. Caso eles errem ao selecionar algum item, a simulação exibe uma mensagem alertando o erro e o respectivo motivo. Assim, eles podem se corrigir, reforçando o aprendizado. Isso corresponde ao primeiro passo da simulação.

No segundo passo, a tarefa é polarizar a amostra. Nesse momento, a simulação dá dicas de como proceder e deixa o usuário realizar ações à medida que observa o que acontece com a amostra em termos de alinhamento e temperatura.

No terceiro passo, são simulados os processos de alinhamento da amostra em duas direções e de detecção das partículas emitidas pelo decaimento. Nesse momento, o usuário aprendiz entende como ocorrem esses processos, realiza ações para torná-los possíveis e visualiza a simulação de efeitos do alinhamento e da emissão de elétrons.

No quarto passo, o usuário aprendiz analisa os resultados da emissão das partículas para os dois alinhamentos diferentes, por meio de questões de múltipla escolha que verificam seu entendimento a respeito dos experimentos. Ao escolher uma alternativa, a simulação

exibe uma mensagem de confirmação da resposta, assim o usuário é levado a refletir a respeito da alternativa que escolheu. Se ele erra uma resposta, a simulação exibe uma mensagem explicando o motivo e permitindo que reflita melhor a respeito.

Por fim, no quinto passo, os usuários aprendizes podem consultar registros históricos a respeito do experimento simulado, como fotos dos aparatos experimentais e da equipe de cientistas, bem como um *print* do artigo original. Nessa aba, eles podem navegar pelos registros utilizando setas.

Ao término da exploração da simulação, é necessário que os estudantes expressem seu entendimento a respeito do processo, dos resultados e de suas implicações para a teoria que descrevia as interações fracas. Ao final, eles devem entender que o resultado do experimento não era explicado pela teoria vigente à época e que reformulações precisaram ser feitas para que se explicasse aquele fenômeno recém-evidenciado. A mensagem final exibida aos estudantes incentiva a reflexão a respeito desse ponto.

Experimento 2: detecção das correntes neutras

O segundo experimento a ser simulado forneceu as primeiras evidências empíricas da Teoria Eletrofraca, por meio da detecção das correntes neutras, um fenômeno que é provocado por um dos bósons mediadores da interação eletrofraca⁴. Para simulá-lo, é preciso entender como esse processo ocorreu e quais os resultados obtidos. Desse modo, um dos questionamentos que pode ser apresentado aos estudantes é quanto à própria existência ou não das correntes neutras.

4 Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1d2S4zlokYL9AZ-chc3dremIPQtSaEgrsl?usp=sharing>. As instruções estão inclusas na pasta compartilhada pelo *link*.

Entre os conhecimentos prévios necessários, estão a Teoria Eletrofraca, correntes neutras e carregadas, interações com neutrinos, técnicas de detecção de correntes neutras e carregadas etc. Como a ideia é que a exploração da simulação assuma um caráter investigativo, sugere-se que o problema da detecção das correntes neutras seja apresentado como um desafio e que estudantes desenvolvam o objetivo de entender e responder se as correntes neutras existem ou não. O material complementar pode incluir um texto e/ou uma exposição oral que reúnam informações para realizar as tarefas propostas. Sugere-se também uma contextualização teórico-conceitual prévia com enfoque histórico-conceitual, baseada nos problemas físicos prévios, suas resoluções e seus aspectos conceituais ainda em aberto.

O primeiro passo dessa simulação é a montagem do aparato experimental. Para isso, a simulação apresenta uma lista de materiais que podem ou não ser úteis na realização do experimento. Os estudantes vão fazer suas escolhas com base nas informações obtidas na simulação e no material complementar. Sempre que errarem a montagem, uma mensagem de advertência é exibida explicando o motivo do erro para que o corrijam.

Após a montagem adequada do experimento, os estudantes são guiados à segunda etapa da simulação, para entender o funcionamento da câmara de bolhas, desde a emissão dos neutrinos e antineutrinos até seu processo de detecção, passando pela pressurização e despressurização da câmara.

No terceiro passo, representações fictícias de detecção e informações a respeito das partículas detectadas em cada uma delas são mostradas. Com isso, os estudantes são levados a tentar identificar quais dessas detecções fictícias são evidências da presença de correntes neutras. Se eles errarem a alternativa, a simulação exibe uma mensagem de advertência e outra resposta pode ser escolhida.

Em seguida, no quarto passo, dados históricos da detecção da evidência das interações fracas são fornecidos. É exibida a imagem original da detecção, acompanhada de uma explicação do processo.

No quinto passo, assim como na primeira simulação, são exibidos registros históricos do experimento, fotografias de fases do processo experimental e um *print* do artigo no qual foram publicados os resultados do experimento original. Ao comparar o número de cientistas envolvidos no primeiro experimento simulado e nesse segundo, os estudantes observam o aumento significativo da colaboração científica.

Ao final da exploração, os estudantes fazem uma síntese do que entenderam a respeito do processo experimental e dos resultados obtidos. Assim, ficará claro que esse experimento foi a primeira evidência experimental da Teoria Eletrofraca e que, assim como em todo processo de solucionamento de um problema, surgiram desafios, como o foi a detecção dos bósons da interação fraca. Essa reflexão é iniciada pela mensagem exibida ao término da simulação.

Experimento 3: detecção indireta dos bósons da interação fraca (W^+ , W^- e Z^0)

O terceiro experimento a ser simulado possibilitou as primeiras evidências indiretas de W^- , W^+ e Z^0 , partículas mediadoras da interação fraca⁵.

Nesta simulação, diferentemente das duas primeiras, a primeira etapa é mais informativa do que interativa. No primeiro passo, obtém-se conhecimento do funcionamento do sistema de aceleração e detecção dos bósons. O usuário deve navegar por todos os itens listados no painel de controle antes de seguir para a segunda etapa, na qual irá interagir com a simulação para gerenciar o processo de produção de antiprótons.

5 Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1d2S4zlokYL9AZ-chc3dremIPQtSaEgrsl?usp=sharing>. As instruções estão inclusas na pasta compartilhada pelo *link*.

No segundo passo, o usuário precisa tomar decisões relacionadas tanto ao direcionamento de feixes de prótons e antiprótons como a faixas de energia e tempo aplicadas aos diferentes processos. Ao final, deve ficar claro como ocorre o processo de produção de antiprótons, quais os aceleradores, quantidades de energia e tempo são necessários para obter feixes de prótons e antiprótons disponíveis para a colisão.

No passo 3, os estudantes montam e entendem como funciona o detector UA1, testam a montagem, iniciam a colisão entre os feixes de prótons e antiprótons e compreendem como se dá esse processo.

Os dados históricos das detecções originais, além dos processos de decaimento e as imagens que representam a evidência desses decaimentos, são exibidos no passo 4.

A última etapa, assim como nas outras simulações, é uma viagem histórica por fotografias que registram partes do experimento, com o *print* do artigo no qual foram publicados os resultados a respeito do experimento original.

A mensagem final inicia a reflexão dos resultados evidenciados e sugere aos estudantes que expressem seu entendimento acerca do processo e dos resultados experimentais. Aconselha-se que, depois disso, os professores promovam uma discussão quanto às implicações desse resultado experimental, atividade essa que pode ajudar estudantes a entenderem de forma coerente os resultados ou reforçarem as conclusões já obtidas no processo.

Conclusões

Diante do que foi exposto neste capítulo, espera-se que as simulações propostas propiciem o contato de professores e estudantes com dimensões históricas e experimentais da Teoria Eletrofraca e se configurem como alternativas para o ensino e aprendizagem de tópicos de Física de Partículas no ensino superior.

Embora representem fenômenos abstratos e modelados, o que é um fator positivo, tais simulações são adaptações dos experimentos reais e não podem ser interpretadas como seus substitutos. São, dessa forma, alternativas didáticas e acessíveis para a exemplificação de processos de difícil, inviável ou impossível visualização real em sala de aula.

Como recurso didático, essas simulações foram elaboradas e investigadas levando em consideração aspectos de conteúdo de ciências, de teorias da aprendizagem, da história da ciência e de usabilidade de *softwares*. Trata-se, portanto, de uma inovação para proporcionar uma experiência positiva para estudantes e servir de instrumento ao ensino e aprendizagem de tópicos de Física Moderna Contemporânea, com potencial para gerar atividades investigativas com protagonismo estudantil e resultar em indícios de aprendizagem significativa. Aliam-se, nesse processo inovador, ferramentas contemporâneas de comunicação com aspectos teórico-metodológicos da Física, da historiografia da ciência e da educação científica de modo a se expressarem, significativa e fidedignamente, em exemplares de construção do conhecimento científico, com as idas e vindas naturais de todas as produções humanas coletivas.

Além disso, dadas as avaliações por pares e usuários, os resultados sugerem que essas simulações cumprem com o papel para o qual foram planejadas, colaborando no aprendizado dos conteúdos, auxiliando na representação de fenômenos de difícil acesso real e permitindo que o aluno entenda o contexto histórico no qual o experimento original foi realizado.

Referências

- AUSUBEL, D. P. **Aquisição e retenção de conhecimentos**: uma perspectiva cognitiva. Lisboa: Plátano, 2003.
- AZEVEDO, M. C. P. S de. Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula. In: CARVALHO, A. M. P. (org.).

- Ensino de ciências:** unindo a pesquisa e a prática. São Paulo: Cengage Learning, 2004. p. 19-33.
- BATISTA, S. C. F. **Softmat:** um repositório de *softwares* para matemática do ensino médio: um instrumento em prol de posturas mais conscientes na seleção de *softwares* educacionais. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2004.
- CARDOSO, S. O. O.; DICKMAN, A. G. Simulação computacional aliada à Teoria da Aprendizagem Significativa: uma ferramenta para ensino e aprendizagem do efeito fotoelétrico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 29, n. esp. 2, p. 891-934, out. 2012.
- CARVALHO, A. M. P. O ensino de ciências e a proposição de sequências de ensino investigativas. *In:* CARVALHO, A. M. P. (org.). **Ensino de ciências por investigação:** condições para implementação em sala de aula. São Paulo: Cengage Learning, 2013. p. 1-20.
- CHANG, H. How historical experiments can improve scientific knowledge and science education: the cases of boiling water and electrochemistry. **Science & Education**, Millsboro, v. 20, p. 317-341, 2011.
- 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. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.
- 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. 373-404, 2021.
- DEVELAKI, M. Using computer simulations for promoting model-based reasoning. **Science & Education**, Millsboro, v. 26, p. 1001-1027, 2017.

- FIGUEIRA, J. S. Easy Java simulations: modelagem computacional para o ensino de física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 613-618, 2005.
- FIOLHAIS, C.; TRINDADE, J. Física no computador: o computador como uma ferramenta no ensino e na aprendizagem das ciências físicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 259-272, 2003.
- GOWIN, D. B.; ALVAREZ, M. **The art of educating with V diagrams**. New York: Cambridge University Press, 2005.
- GRECA, I. M.; SEOANE, E.; ARRIASSECQ, I. Epistemological issues concerning computer simulations in science and their implications for science education. **Science & Education**, Millsboro, v. 23, p. 879-921, 2014.
- HEERING, P. Analysing unsuccessful experiments and instruments with the replication method. **Éndoxa**, Madrid, n. 19, p. 315-340, 2005.
- HEERING, P.; WITTJE, R. An historical perspective on instruments and experiments in science education. **Science & Education**, Millsboro, v. 21, p. 151-155, 2012.
- MARTINS, A. J.; FIOLHAIS, C.; PAIVA, J. Simulações on-line no ensino de física e da química. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, v. 11, n. 2, 2003.
- MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. F. de. Possibilidades e limitações das simulações computacionais no ensino da física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 77-86, 2002.
- METZ, D.; STINNER, A. A role for historical experiments: capturing the spirit of the itinerant lecturers of the 18th century. **Science & Education**, Millsboro, v. 16, n. 6, p. 613-624, 2007.
- PSYCHARIS, S. The computational experiment and its effects on approach to learning and beliefs on physics. **Computers & Education**, v. 56, p. 547-555, 2011.
- RIBEIRO JUNIOR, L. A.; CUNHA, M. F.; LARANJEIRAS, C. C. Simulação de experimentos históricos no ensino de física: uma

- abordagem computacional das dimensões histórica e empírica da ciência na sala de aula. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 34, n. 4, 2012.
- SANTOS, J. C.; DICKMAN, A. G. Experimentos reais e virtuais: proposta para o ensino de eletricidade no nível médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 41, n. 1, 2019.
- SMETANA, L. K.; BELL, R. L. Computer simulations to support science instruction and learning: a critical review of the literature. **International Journal of Science Education**, v. 34, n. 9, p. 1337-1370, 2012.
- SOUZA, R. da S.; SILVA, A. P. B. da; ARAUJO, T. S. James Prescott Joule e o equivalente mecânico do calor: reproduzindo as dificuldades do laboratório. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 36, n. 3, p. 3309, 2014.
- TOVAL, A.; FLORES, M. Computer systems simulation in education: description of an experience. **Computers & Education**, v. 2, n. 4, p. 293-303, 1987.



ABORDAGEM DIDÁTICA PARA O ENSINO DA TEORIA ELETROFRACA

Márcia da Costa
Irinéa de Lourdes Batista
Etiane Ortiz

Em relação ao ensino de Física, é consenso científico a necessidade tanto da atualização curricular da educação básica quanto da diversificação das abordagens e metodologias, uma vez que as abordagens tradicionais, na sua maioria, não conseguem despertar o interesse de estudantes e gerar aprendizagens significativas dos conteúdos científicos¹. Entre as possíveis alternativas para os níveis médio ou superior, estão as abordagens que envolvem história e filosofia da ciência (HFC), tecnologias da informação e comunicação (TIC), temas de Física Moderna Contemporânea (FMC), estudantes como protagonistas do processo de aprendizagem e abordagens que levem em consideração as particularidades da própria Física como ciência e disciplina.

Nesse contexto, é necessário pensar na formação dos professores e futuros professores para que trabalhem com abordagens

1 Partes deste capítulo já foram publicadas na revista *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Ver Costa e Batista (2020).

diversificadas, uma vez que são eles que podem promover a atualização curricular e um ensino contextualizado, que seja significativo, articulado e integrador para os estudantes. Diante disso, este capítulo apresenta uma proposta didática que foi investigada e elaborada metodologicamente com base em princípios da Teoria da Aprendizagem Significativa, da historiografia e da didática da ciência. Tal proposta orienta para o ensino de tópicos de FMC e recebe o auxílio das simulações computacionais e do V de Gowin como facilitadores de uma aprendizagem significativa tanto de conceitos científicos quanto de noções de natureza da ciência (NdC).

Referenciais teórico-metodológicos da abordagem didática

De acordo com Cachapuz e outros (2001) e Adúriz-Bravo e Izquierdo (2002), toda abordagem didática de um tema deve ser planejada metodologicamente, considerando as particularidades da disciplina, respeitando características da didática das ciências e centrando a atenção nos conteúdos científicos do ponto de vista do seu ensino e aprendizagem. Batista (2016) demonstra adicionalmente que, na construção de abordagens contextualizadoras, a articulação e a integração de elementos oriundos dos âmbitos epistemológicos e metodológicos dos vários domínios de conhecimento científico envolvidos se constroem de forma dialógica, como uma práxis entre os campos teórico-conceituais e a realidade escolar.

Ainda a respeito da didática das ciências, Cachapuz, Praia e Jorge (2004), ao tratar das orientações para o ensino de ciências e do que se espera que ele proporcione, citam três dimensões que deveriam ser atendidas: a pós-positivista, a contextualizada e a socioconstrutivista.

A dimensão pós-positivista reflete a intenção de ensinar a ciência e o modo de desenvolvê-la, isto é, além de abordar os conceitos científicos, discute como eles foram elaborados, a partir de uma

visão realista. A dimensão contextualizada sugere que os assuntos estudados favoreçam relações entre ciência, tecnologia, ambiente e sociedade. E a dimensão socioconstrutivista é uma alternativa para promover um ensino mais democrático e eficiente, considerando diversas metodologias e estratégias de ensino de acordo com o contexto escolar-educacional.

A abordagem didática proposta neste trabalho procurou atender todas essas dimensões, uma vez que: 1) aborda o tema da unificação eletrofraca, que engloba conceitos componentes de ementas de disciplinas correlatas à Física Moderna e possibilita discussões de questões contemporâneas a respeito de teorias físicas, bem como de métodos experimentais de Física de Partículas, utilizados até os dias atuais e de avanços científicos e tecnológicos que permeiam a vida cotidiana; 2) discute o processo de elaboração da Teoria Eletrofraca e promove reflexões a respeito da NdC; 3) no processo de elaboração e aplicação, leva em consideração aspectos da Teoria da Aprendizagem Significativa.

No planejamento das atividades, um referencial teórico-metodológico foi adotado em consonância com o que defendem Batista (2004, 2016), Silva Netto, Cavalcanti e Ostermann (2015) e Pereira e Ostermann (2009). Segundo esses autores, apesar de a literatura apresentar um número significativo de produções científicas relacionadas aos conteúdos de FMC, como propostas didáticas, jogos, hipermídias, simulações computacionais, textos didáticos, entre outros, ainda são poucas as produções científicas cuja elaboração é fundamentada em referenciais teórico-metodológicos e que buscam investigar resultados reais em sala de aula.

Nesse sentido, os referenciais teórico-metodológicos que guiam a elaboração e a aplicação da abordagem aqui apresentada são os seguintes:

- *Teoria da Aprendizagem Significativa*: levaram-se em consideração princípios dessa teoria, como os organizadores prévios, a diferenciação progressiva, a reconciliação integradora

e a consolidação. Além do mais, foram incorporados como facilitadores da aprendizagem significativa as simulações computacionais e os diagramas de Gowin. Entre as condições que favorecem a aprendizagem, figuraram materiais potencialmente significativos e a predisposição dos indivíduos (AUSUBEL, 2003; GOWIN; ALVAREZ, 2005).

- *Composição histórica e experimentos históricos*: para abordar a Teoria Eletrofraca considerando o contexto histórico e o processo de sua elaboração, foram utilizadas duas estratégias que contemplaram a história e filosofia da ciência em sala de aula: a composição histórica e os experimentos históricos. O termo “composição histórica” foi definido por Batista (2016) como uma construção textual (ou de outra natureza comunicativa) que reúne elementos históricos e historiográficos, epistemológicos, axiológicos e científicos para a inteligibilidade de um conteúdo científico com objetivo pedagógico e de disseminação de conhecimentos histórico-epistemológicos e sociais. Já a abordagem dos experimentos históricos combina experimentação e HFC e pode ser feita de diversas maneiras. Nesta proposta, os experimentos históricos são explorados na perspectiva das simulações computacionais, e os referenciais que guiaram essa estratégia foram: Heering (2005), Chang (2011) e Metz e Stinner (2007).
- *Unidades didáticas*: a abordagem foi composta por três unidades didáticas. O termo “unidade didática” é definido por Zabala (1998) como sequências de atividades estruturadas para alcançar objetivos educacionais determinados. As unidades são instrumentos que têm caráter articulador e reúnem toda a complexidade da prática, ao mesmo tempo que permitem incluir as três fases de uma intervenção reflexiva: o planejamento, a aplicação e a avaliação.

O planejamento de uma unidade didática, baseada em sequências de atividades específicas, favorece o processo formativo. No entanto,

como não é possível prever tudo o que pode acontecer, ainda que se tenha em mãos uma abordagem suficientemente elaborada, a intervenção deve estar aberta a possíveis mudanças, que não podem ser resultado de improvisação (ZABALA, 1998).

De acordo com Zabala (1998), há sequências de atividades que se adaptam melhor a determinados objetivos educacionais. Assim, existem diferentes sequências didáticas para o ensino que podem compor uma unidade didática. O autor propõe como exemplo quatro unidades didáticas que se diferenciam uma da outra pelo grau de participação dos envolvidos e pelas características específicas do tipo de conteúdo.

Para nosso propósito, elegeu-se a quarta unidade exemplificada por Zabala (1998). Ela permite a participação ativa dos envolvidos e agrupa atividades variadas, sendo composta pelas seguintes fases: 1) apresentação de uma situação problemática relacionada com o tema; 2) proposição de problemas ou questões; 3) explicitação de respostas intuitivas ou suposições; 4) proposta das fontes de informação; 5) busca da informação; 6) elaboração das conclusões; 7) generalização das conclusões e síntese; 8) exercícios de memorização; 9) prova ou exame; 10) avaliação.

As fases da unidade didática foram desenvolvidas com as devidas adequações, uma vez que o autor sugere que essas sequências não são rígidas e podem ser adaptadas conforme os propósitos educacionais a serem atingidos. Assim, no modelo aqui proposto, não estão presentes os itens 8, 9 e 10, sendo as atividades compostas por avaliações processuais.

Antes, contudo, de descrever as atividades da abordagem didática, serão apresentadas as características do V de Gowin, uma vez que esse instrumento ainda é pouco difundido e utilizado.

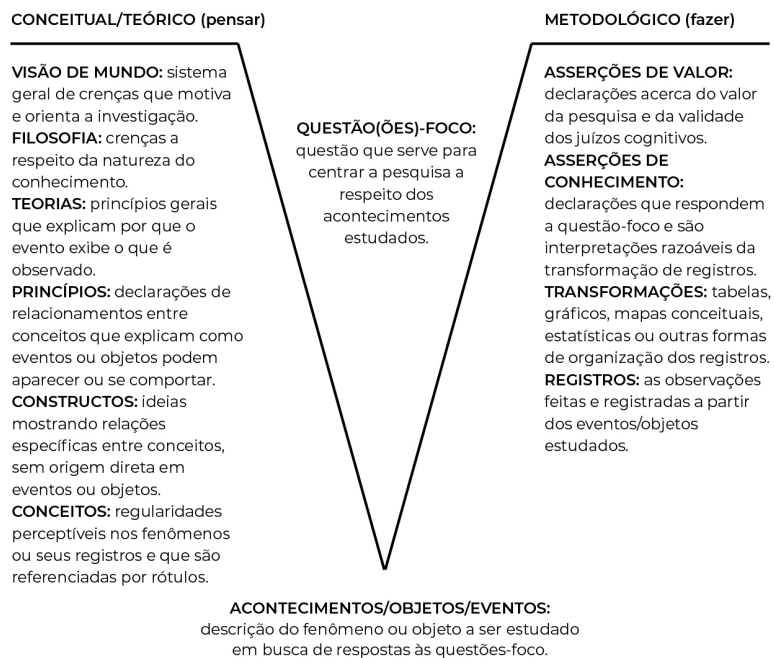
V de Gowin

O diagrama de Gowin é um organizador gráfico na forma de V, também conhecido como: V heurístico, pelo fato de facilitar processos heurísticos; V epistemológico, por ter subjacente uma epistemologia construtivista; V do conhecimento, por ajudar a compreender a estrutura do processo

de produção do conhecimento; ou V de Gowin, por ter sido concebido, na década de 1970, por Dixie Bob Gowin (VALADARES, 2014).

De acordo com Gowin e Alvarez (2005), o diagrama foi idealizado na Universidade de Cornell em 1977, após décadas de pesquisa em ciência, educação científica, filosofia da ciência e filosofia da educação. Esse diagrama, em princípio, evidencia ao mesmo tempo a complexidade e a simplicidade do processo de construção do conhecimento e foi desenvolvido para ajudar estudantes e professores a clarificar a natureza e os objetivos do trabalho experimental em ciências. Sua elaboração deriva do método das “cinco perguntas”, um esquema desenvolvido por Gowin para “desempacotar” o conhecimento numa determinada área (NOVAK; GOWIN, 1984). Na Figura 1, pode-se visualizar os doze elementos que compõem a estrutura do V de Gowin.

Figura 1 – Representação gráfica do V de Gowin



Fonte: Adaptado de Gowin e Alvarez (2005).

A *questão-foco*, posicionada no meio do diagrama, deve ser respondida com base em um acontecimento, objeto ou evento, que aparece no vértice inferior do diagrama. Do lado esquerdo aparecem os aspectos teóricos e conceituais (visão de mundo, filosofia, teorias, princípios, constructos e conceitos) e do lado direito aparecem as questões metodológicas (registros, transformação dos registros em dados, as asserções de conhecimento e de valor). Dessa maneira, fica evidente um pressuposto fundamental na elaboração do V de Gowin: o conhecimento não é absoluto, mas dependente dos conceitos, teorias e metodologias por meio dos quais se vê o mundo (GOWIN; ALVAREZ, 2005).

A interação entre os elementos presentes no diagrama pode auxiliar e ampliar a compreensão da estrutura do conhecimento envolvida em determinada investigação. A questão-foco ou questão de pesquisa direciona a investigação e, de acordo com Gowin e Alvarez (2005), desempenha duas funções: aumentar a precisão, delimitando o evento de estudo, e deixar os detalhes mais claros.

O *acontecimento*, *objeto* ou *evento* que responde à questão é algo que pode ser planejado, que acontece, que pode acontecer ou que está no campo das possibilidades de ocorrência (GOWIN; ALVAREZ, 2005). Não importa se a questão é definida com base nos acontecimentos ou se os acontecimentos definem as questões, o que importa é a coerência entre esses dois elementos.

O elemento *teoria* agrupa um conjunto de fundamentos que tem o objetivo de explicar, elucidar e interpretar os eventos, ou, nas palavras de Gowin e Alvarez (2005, p. 52): “uma boa teoria nos fornece respostas que explicam”. Até o fenômeno acontecer, as teorias podem ajudar na predição e explicação de comportamentos.

Já os *princípios* são proposições de relações entre conceitos que explicam como se espera que eventos e objetos se comportem ou apareçam, em outras palavras, princípios são declarações escritas de regularidades em eventos. Essas declarações escritas são abstraídas e derivadas de muitas afirmações anteriores a respeito de regularidades do evento estudado (GOWIN; ALVAREZ, 2005).

Os *conceitos* são elementos centrais na estrutura do conhecimento definidos como regularidades ou padrões percebidos em eventos ou objetos e representados por um signo ou símbolo, geralmente uma palavra. De acordo com Gowin e Alvarez (2005), define-se conceito como um nome (rótulo, sinal, palavra ou significante) para uma regularidade em eventos ou objetos. Por exemplo, a palavra “vento” é um nome para um evento de algum tipo de movimento regular do ar. Assim, conceitos nomeiam eventos e objetos da experiência vivenciada.

No lado direito do diagrama V, os *registros* são os instrumentos utilizados para monitorar o que acontece nos eventos que estão sendo estudados. Eles podem variar desde simples descrições de observações até registros realizados por instrumentos complexos. É importante que sejam selecionados instrumentos confiáveis para que os registros reflitam com precisão o que está ocorrendo durante os eventos de interesse (GOWIN; ALVAREZ, 2005). Em outras palavras, os registros são os dados brutos, todas as informações relevantes do evento que, ao passarem pelo processo de transformação, podem responder à questão-foco.

No processo de *transformação* os registros efetuados são tratados visando à sua análise e interpretação. As transformações envolvem a tarefa de fazer julgamentos na tentativa de compreender o que está acontecendo, trata-se de um procedimento metodológico para ir dos registros até possíveis asserções de conhecimento (GOWIN; ALVAREZ, 2005). Para organizar os dados, são utilizados com frequência tabelas, quadros, gráficos, estatísticas, mapas conceituais e agrupamentos diversos. Assim como os registros, as transformações são guiadas pelos elementos teóricos conceituais do V.

As *asserções de conhecimento* são as respostas a cada uma das questões levantadas inicialmente. Pensar e interpretar as transformações leva o estudioso a fazer asserções com base nas perguntas feitas. Cada asserção de conhecimento deve ser claramente explicada com argumentos que sustentem as interpretações realizadas durante o processo investigativo. Assim, a retomada das questões, dos eventos,

dos conceitos, dos registros e das transformações auxilia na reconciliação entre ideias e fatos com base nos instrumentos e resultados (GOWIN; ALVAREZ, 2005).

Já as *asserções de valor* são sentenças baseadas nas asserções de conhecimento que declaram o valor ou o mérito do estudo. Elas podem ser de natureza utilitária, científica, educacional, moral, social, estética, havendo inúmeros valores associados à produção de um conhecimento (ARAÚJO; VEIT; MOREIRA, 2012). A pesquisa tem implicações práticas na área estudada? As evidências da pesquisa ajudam a entender melhor algum tópico? A pesquisa poderia ser feita de uma maneira menos dispendiosa? (GOWIN; ALVAREZ, 2005).

Os elementos *visão de mundo, filosofia e constructos* são menos intuitivos para uma primeira abordagem com o V de Gowin e podem gerar dificuldades de exemplificação entre estudantes e professores (LEBOEUF; BATISTA, 2013). Porém, isso não impede que se faça uso da estrutura do diagrama, uma vez que é possível adaptá-lo, conforme demonstra a literatura, na qual se encontram diversas versões com omissão de alguns elementos e inserção de outros (ARAÚJO; VEIT; MOREIRA, 2012; GOWIN; ALVAREZ, 2005; NOVAK; GOWIN, 1984; VALADARES, 2014).

De acordo com Novak e Gowin (1984), uma técnica heurística em forma de V não tem nada sagrado ou absoluto, seu valor reside em várias outras razões. Em primeiro lugar, o V “aponta” para os acontecimentos, objetos ou eventos que estão na base de toda a produção do conhecimento, e é fundamental que os estudantes estejam plenamente conscientes dos acontecimentos, objetos ou eventos que pretendem experimentar e com base nos quais constroem o conhecimento.

Em segundo lugar, a forma do V ajuda os estudantes a reconhecerem a tensão e a interação entre o conhecimento disciplinar que se vai construindo e modificando ao longo do tempo e o conhecimento que uma investigação esporádica permite construir. Embora

os elementos conceituais da parte esquerda do V iluminem as possíveis indagações, eles são construções que se desenvolvem paulatinamente, enquanto os elementos da parte direita se constroem em função da investigação. E, mesmo que os novos juízos cognitivos possam dar lugar à formação de conceitos e teorias, esse processo demora anos ou décadas na maior parte das disciplinas (NOVAK; GOWIN, 1984).

Assim, o formato do diagrama é uma maneira estruturada e visual de relacionar os aspectos metodológicos de uma investigação com seus aspectos conceituais e teóricos. A parte esquerda e a parte direita do V interagem entre si, interação essa de grande relevância para a construção do novo conhecimento. A parte crucial do processo de investigação surge quando se dá a conexão entre o evento/objeto em estudo, o quadro conceitual teórico que o pesquisador domina e os fatos registrados do evento/objeto. A importância dessa conexão foi o que levou Gowin à ideia do formato em V para seu organizador gráfico, a fim de evidenciar a indissociabilidade entre a teoria e a prática (VALADARES, 2014).

O diagrama V não deve ser respondido como se fosse um questionário, pois isso seria uma completa distorção e um grande desperdício de sua potencialidade instrucional e curricular (MOREIRA, 2006), mas sim construído e analisado com idas e vindas por todos os tópicos. Com relação às possíveis aplicações do V de Gowin, Moreira (2006) sugere sua utilização como recurso útil no ensino, na aprendizagem e na avaliação. Ele serve ainda como ferramenta de análise de artigos, teses, dissertações, atividades práticas, planejamentos, ensaios, produções literárias, enfim, qualquer forma de conhecimento (GOWIN; ALVAREZ, 2005; MOREIRA, 2006).

Além disso, o V de Gowin auxilia no preparo das aulas, pois, em vez de simplesmente ensinar um conteúdo porque está presente no livro didático, o professor pode, antes da instrução, procurar responder às cinco questões propostas por Gowin a respeito daquilo que pretende ensinar, identificando: o ponto central da

aula, os conceitos básicos envolvidos, a metodologia, os conhecimentos relevantes, o valor desse conhecimento. Essa é uma análise do currículo no sentido proposto por Gowin (NOVAK; GOWIN, 1984; MOREIRA, 2006).

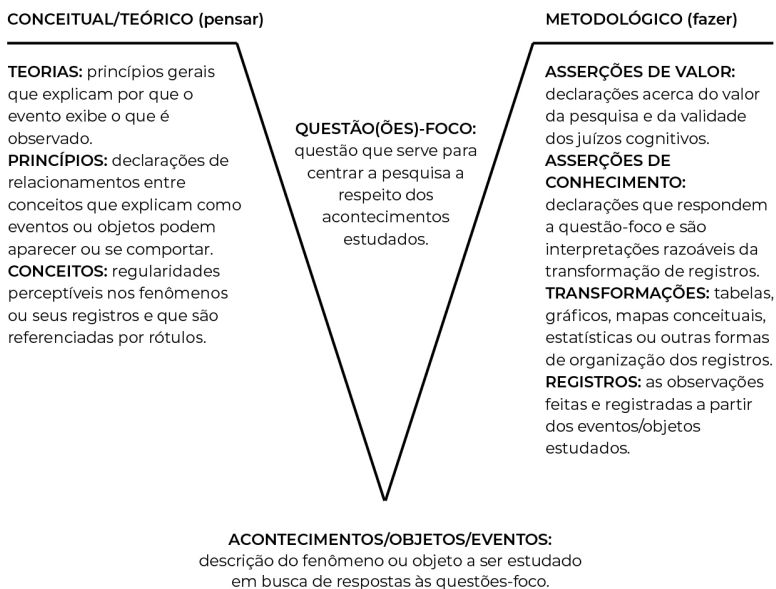
A respeito do uso do diagrama como instrumento de avaliação, Novak e Gowin (1984) o apresentam como uma valiosa ferramenta, uma vez que, apesar da natureza desafiadora da construção do V, os estudantes reagem positivamente perante a atividade, em especial quando comparada à elaboração dos tradicionais relatórios. Esse instrumento os auxilia na organização das ideias, e eles reconhecem que essa atividade os ajuda a compreender melhor os conteúdos. A avaliação com o diagrama de Gowin consiste na interpretação do nível de domínio da compreensão do conhecimento que os estudantes exibem ao elaborá-lo, na medida em que os significados externalizados por eles sejam aqueles que o professor pretende que atribuam aos conteúdos científicos (GOWIN; ALVAREZ, 2005; NOVAK; GOWIN, 1984; MOREIRA, 2006; VALADARES, 2014).

Muito raciocínio é necessário para elaborar um V. Tal processo força o estudioso a olhar para os eventos, a pensar, prestar atenção em acontecimentos que não estão totalmente sob controle. A construção de um V requer mais do que uma fórmula “pegue e faça”. Ele requer que a mente recorra a experiências passadas para refletir a respeito do conhecimento existente acerca de um dado problema ou situação (GOWIN; ALVAREZ, 2005). Assim, ele é mais complexo, do ponto de vista epistemológico e cognitivo, do que os mapas conceituais e, por isso, menos utilizado do que eles. Inclusive, é possível integrar os mapas no bloco epistemológico dos conceitos do V de Gowin. Em que pese essa complexidade, sua utilização promove uma experiência enriquecedora ao passo que permite uma aprendizagem não só da ciência, mas também da natureza da ciência, pois trata-se de um instrumento fundamentado em uma visão construtivista e humanista da produção do conhecimento (MOREIRA, 2012; VALADARES, 2014).

Visto seu potencial de facilitação da aprendizagem significativa, não existe um padrão rígido em relação aos elementos epistemológicos que devem ser abordados nas atividades educativas ou investigativas, pois, como citado anteriormente, na literatura há exemplos em que se omitem alguns elementos e se acrescentam outros com a finalidade de atender aos objetivos de uma investigação específica.

Diante disso, nesta pesquisa, por se tratar da primeira vez que os sujeitos investigados teriam contato com esse tipo de instrumento, optou-se por omitir os elementos “visão de mundo”, “filosofia” e “constructos”, o que resultou na seguinte versão do V de Gowin (Figura 2).

Figura 2 – Exemplificação do V de Gowin utilizado na abordagem didática proposta



Fonte: Costa (2019).

Estrutura da abordagem didática

A proposta de abordagem feita aqui foi elaborada para dar a estudantes uma ideia de práticas que envolvem história e filosofia da ciência, temas de FMC e simulações computacionais voltadas para a aprendizagem de conteúdos científicos e de noções de natureza da ciência.

As atividades são diversificadas para abordar o processo de desenvolvimento da Teoria Eletrofraca, ou parte dele. Então o público-alvo são docentes de Física Moderna ou de disciplinas correlatas, bem como estudantes de licenciatura que estejam cursando ou já tenham cursado essas disciplinas e desejem aprender mais a respeito de Física de Partículas, em especial a respeito da interação eletrofraca.

As simulações permitem que professores e estudantes tenham contato com experimentos históricos cuja reprodução real é inviável por aspectos sejam materiais, sejam financeiros, sejam espaciais. O material necessário apresenta baixo custo e a aplicação da abordagem é feita em sala de aula com facilidade, exigindo apenas computadores para os estudantes ou, em último caso, um projetor multimídia.

Optou-se por estruturar essa abordagem em três unidades, conforme detalhado no Quadro 1. O tempo sugerido para cada uma delas não é uma regra, podendo ser maior ou menor de acordo com o nível de conhecimento prévio dos estudantes. No caso de docentes que desejem utilizar somente uma das unidades didáticas, é necessário realizar adaptações ao início e ao final da estrutura para que ela fique condizente com o propósito.

Quadro 1 – Estrutura da abordagem didática

Atividade	Duração	
Apresentação	03 minutos	Atividades relacionadas à Teoria da Aprendizagem Significativa
Obtenção de conhecimentos prévios	40 minutos	
Organizador prévio: leitura do texto “Teoria Eletrofraca”	30 minutos	
Discussão do texto e retomada de pontos relevantes	12 minutos	
Introdução ao V de Gowin	15 minutos	
Atividades com o diagrama de Gowin	40 minutos	
Como tudo começou?	40 minutos	Unidade didática 1
Momento de consolidação 1	05 minutos	
Atividades com simulação* de “comportamento da paridade nas interações fracas”	40 minutos	
Momento de consolidação 2	10 minutos	
Continuando a história (parte 1)	50 minutos	Unidade didática 2
Momento de consolidação 3	05 minutos	
Continuando a história (parte 2)	30 minutos	
Atividades com simulação* de “detecção das correntes neutras”	40 minutos	
Vídeo: <i>Gargamelle</i>	05 minutos	
Momento de consolidação 4	10 minutos	
Continuando a história (parte 3)	25 minutos	Unidade didática 3
Vídeo: <i>Processo de aceleração das partículas</i>	05 minutos	
Atividades com simulação* de “detecção indireta dos bósons W^+ , W^- e Z^0 ”	40 minutos	
Atividades extraclasse	240 minutos	
Consolidação da Teoria Eletrofraca	10 minutos	
Momento de <i>feedbacks</i>	10 minutos	
V de Gowin a respeito da Teoria Eletrofraca	50 minutos	

Continua

Atividade	Duração	Atividades de consolidação
Unificação de teorias	15 minutos	
Animação do experimento ATLAS	08 minutos	
Atividade com o <i>software</i> Hypatia	30 minutos	
Consolidação final	15 minutos	
Questionários	50 minutos	
Encerramento	05 minutos	

*As simulações propostas no quadro estão descritas no capítulo anterior: “Simulações computacionais de experimentos históricos da Teoria Eletrofraca”.

Fonte: Costa (2019).

As unidades descritas no Quadro 1 discutem três dos experimentos que colaboraram para o processo de unificação das interações eletromagnética e fraca. As simulações desses experimentos foram abordadas cronologicamente. Convém ressaltar, no entanto, que houve mais um experimento relevante nesse processo, aquele que detectou a violação da paridade em átomos, porém, por falta de informações técnicas e históricas detalhadas, ele foi abordado, na unidade 3, apenas teoricamente.

Para os outros três experimentos, propôs-se uma sequência de atividades que se encaixam em passos propostos por Zabala (1998). Ao longo dessa trajetória de facilitação da elaboração do conhecimento, uma unidade leva a outra, e assim por diante. Ao final do percurso, será então possível explicitar que a dinâmica da construção do conhecimento científico — na qual uma questão científica leva a outra, que leva a outra, e assim por diante — assemelha-se à dinâmica da elaboração do conhecimento de aprendizes.

Atividades relacionadas à Teoria da Aprendizagem Significativa

As primeiras atividades, embasadas na Teoria da Aprendizagem Significativa, englobaram a apresentação, a obtenção dos conhecimentos

prévios, o organizador prévio, a discussão do texto e retomada de pontos relevantes, a introdução ao V de Gowin e as atividades com ele. Elas apresentaram os aspectos gerais do tema da oficina para os estudantes e o V de Gowin como um instrumento para o estudo de textos e experimentos.

Apresentação: momento de apresentação entre professores e alunos. Caso seja necessário, abordam-se os objetivos da aula e eventuais acordos.

Obtenção dos conhecimentos prévios: de acordo com a Teoria da Aprendizagem Significativa, os conhecimentos prévios influenciam o processo de aprendizagem. Dessa forma, por meio de um questionário, fez-se um levantamento dos conhecimentos prévios dos estudantes em relação às noções de natureza da ciência e aos conteúdos científicos a serem abordados durante a oficina. Esse questionário também serviu como um propositor de indagações acerca dos assuntos a serem discutidos, com a finalidade de instigar a curiosidade e motivar a participação ativa dos estudantes nas discussões e nas atividades propostas.

Seguem as questões que foram apresentadas aos estudantes nesta pesquisa em relação à NdC:

- a) Em sua opinião, o que é um experimento?
- b) Em sua opinião, o desenvolvimento do conhecimento científico requer experimentos? Explique sua resposta.
- c) Em sua opinião, qual a relevância do formalismo teórico e matemático no desenvolvimento de teorias?
- d) Em sua opinião, após os cientistas terem desenvolvido uma teoria científica, ela pode mudar ou ser invalidada? Explique sua resposta.
- e) Os cientistas realizam experimentos/investigações científicas quando estão tentando encontrar respostas para questões propostas por eles ou pela comunidade científica. Os cientistas usam sua criatividade e imaginação durante essas investigações? Explique.

- f) É possível que dois grupos de cientistas competentes da mesma área, que tenham acesso ao mesmo conjunto de dados, obtenham resultados diferentes? Explique.
- g) Quando você lê ou ouve o termo “cientista”, o que você pensa? Quem é esse profissional? Quais atividades esse profissional desenvolve? Descreva tudo o que imagina a respeito.

As demais questões apresentadas versavam acerca do conteúdo científico:

- a) De acordo com seus conhecimentos a respeito de fenômenos atômicos, descreva o que entende por “interação eletromagnética” ou “força eletromagnética”.
- b) De acordo com seus conhecimentos a respeito de fenômenos atômicos, descreva o que entende por “interação fraca” ou “força fraca”.
- c) Explique com suas palavras como ocorre o decaimento beta.
- d) O que você entende por paridade? Em sua opinião, a paridade é conservada ou violada nas interações fracas? Explique.
- e) Em sua opinião, o que são correntes neutras?
- f) De acordo com seus conhecimentos, descreva como as partículas subatômicas adquirem massa.
- g) Em sua opinião, o que são bósons mediadores?
- h) De acordo com seus conhecimentos, descreva o que é a teoria de gauge.
- i) De acordo com seus conhecimentos, o que a estrutura matemática $SU(2) \times U(1)$ representa?
- j) Em sua opinião, o que significa o termo “unificação de teorias científicas”?
- k) Descreva, de acordo com seus conhecimentos, como a Teoria Eletrofraca foi desenvolvida.

Organizador prévio: o texto “Teoria Eletrofraca”² foi elaborado para ser utilizado como organizador prévio do conteúdo a ser

2 Disponível no Apêndice A.

discutido. Trata-se de um texto com um nível mais elevado de abstração, generalidade e inclusão, que se inicia com ideias conhecidas pelos alunos, como as interações fundamentais e a unificação de teorias já discutidas em disciplinas do curso de Física, para introduzir o assunto de interesse, a unificação das interações fracas e eletromagnéticas. De acordo com Ausubel (2003), esse texto é uma ponte cognitiva entre o que aluno já sabe e o que ele deveria saber, para que o aprendizado acerca do conteúdo apresentado no novo material se dê de forma significativa. Os estudantes podem ler o texto com calma, cada um em seu ritmo.

Discussão do texto e retomada de pontos relevantes: após a leitura, recomenda-se retomar os pontos relevantes do texto que podem relacionar-se com os subsunçores³ dos estudantes ou representá-los. Assim, promoveu-se um momento de consolidação na tentativa de que os estudantes entendessem ou recordassem os conceitos necessários para a compreensão dos conteúdos que serão desenvolvidos.

Introdução ao V de Gowin: o V de Gowin foi escolhido como um dos facilitadores de aprendizagem, mas, como, de acordo com a literatura, ele é pouco utilizado e possivelmente os estudantes nunca trabalharam com esse instrumento, há a necessidade de apresentá-lo.

Atividades com o diagrama de Gowin: atividades práticas com o V de Gowin precisam ser desenvolvidas para que os estudantes se familiarizem com essa metodologia de ensino e aprendizagem. Nesse momento específico, sugere-se que o instrumento seja aplicado em exemplos com assuntos já estudados. No caso dessa oficina, propõe-se um exemplo com a Lei de Ohm, em um experimento que meça a

3 “Para Ausubel, aprendizagem significativa é um processo por meio do qual uma nova informação relaciona-se com um aspecto especificamente relevante da estrutura de conhecimento do indivíduo, ou seja, este processo envolve a interação da nova informação com uma estrutura de conhecimento específica, a qual Ausubel define como *conceito subsunçor*, ou simplesmente *subsunçor*, existente na estrutura cognitiva do indivíduo” (MOREIRA, 1999, p. 153).

resistência de um resistor X e analise se ele é ôhmico. Em seguida, é necessário que os estudantes pratiquem utilizar o V de Gowin aplicado ao texto “Teoria Eletrofraca” para tirar suas dúvidas, já que o diagrama também pode ser utilizado para estudar textos (GOWIN; ALVAREZ, 2005; MOREIRA, 2006; VALADARES, 2014).

Unidade didática 1

Como tudo começou?: essa etapa da oficina — que corresponde aos passos 1, 2 e 3 da primeira unidade de Zabala (1998) — inclui a exposição do tema e dos problemas que levaram ao experimento sobre o comportamento da paridade no decaimento beta. Ela é realizada após a introdução do tema com o organizador prévio, para promover a diferenciação progressiva dos conceitos abordados de forma geral no texto “Teoria Eletrofraca” e discutir noções da natureza da ciência, com o objetivo de situar o aluno no contexto em que tiveram início os questionamentos a respeito da conservação da paridade nas interações fracas e de contribuir com o entendimento do processo de elaboração científica que levou ao desenvolvimento do experimento.

A exposição do tema foi feita por meio de *slides* elaborados durante a pesquisa, e houve momentos de discussão a respeito de questões propostas pela pesquisadora implementadora da abordagem ou por estudantes participantes na implementação. Essas questões trataram tanto do conteúdo científico quanto de noções de NdC, entre as quais: a participação feminina na ciência, o trabalho colaborativo e o caráter provisório do conhecimento científico.

Momento de consolidação 1: nesse instante, propõe-se a retomada de alguns conceitos e situações relevantes para que os estudantes entendam a problematização para a realização do experimento que irão simular computacionalmente, bem como as possíveis implicações dos resultados obtidos. Dessa forma, as seguintes perguntas foram dirigidas aos estudantes: as teorias vigentes à época conseguem explicar o problema θ - τ ? O que se sabe a respeito do comportamento da

paridade nas interações fundamentais? Quais as possíveis implicações em relação ao resultado do experimento?

Ao final da primeira etapa de consolidação, os estudantes foram apresentados ao tema em discussão — o comportamento da paridade nas interações fracas —, ao mesmo tempo que encararam um problema para resolver: a conservação da paridade ocorre ou não?

Atividades com simulação de “comportamento da paridade nas interações fracas”: esta etapa corresponde aos passos 4, 5 e 6 da unidade 4 de Zabala (1998), que se utilizou como modelo. É um momento de proposição de fontes de informações, busca de informações e elaboração das conclusões a respeito do problema resolvido. Os estudantes receberam um texto⁴ (fonte de informação), elaborado nesta pesquisa para auxiliar na exploração da simulação computacional (busca da informação). Como resultado da atividade, elaboraram um V de Gowin (elaboração das conclusões) para registrar seu entendimento do processo de experimentação que estavam testando.

O texto que eles receberam a respeito do experimento contém informações teóricas que os ajudam a entender o contexto prévio ao experimento em termos de teorias, princípios e conceitos, bem como dicas para orientar a montagem do experimento na simulação computacional. Assim, o público-alvo pôde cruzar as informações contidas no texto com os elementos textuais da simulação e resolver os desafios impostos pela ela. O texto também auxiliou na elaboração do V de Gowin, uma vez que sua leitura foi feita no tempo individual necessário para o entendimento das informações teórico-conceituais.

Nessas etapas do processo, o docente desempenha o papel de orientador, apenas fornecendo uma breve explicação a respeito das simulações e auxiliando os estudantes na resolução de dúvidas, de maneira que eles assumam uma posição completamente ativa em relação às atividades.

4 Disponível no Apêndice B.

A simulação computacional da unidade didática 1 é dedicada ao experimento que levantou questionamentos a respeito da propriedade de paridade da interação fraca e cujos desdobramentos resultaram na formulação da Teoria Eletrofraca.

O primeiro que se fez foi testar as alternativas de montagem do experimento com base no texto e nas dicas da simulação para montá-lo corretamente⁵. Após a montagem, executou-se o experimento polarizando a amostra, detectando as partículas e analisando os resultados. Por fim, depois de visualizar fotos históricas do experimento original, os estudantes foram direcionados pelo próprio *software* para as próximas discussões e atividades, pois, ao responderem uma pergunta, outras surgiam, e assim o conhecimento científico foi se desenvolvendo. Esse processo foi guiado por mensagens que orientaram e fizeram advertências durante a exploração da simulação.

Momento de consolidação 2: as atividades dessa etapa compõem o passo 7 da unidade 4 de Zabala (1998), quando se discutem o resultado do experimento com os estudantes, abordando suas possíveis implicações, pois, caso não as tenham identificado no V de Gowin, esse é o momento mais oportuno.

Entre as noções de natureza da ciência que podem ser discutidas nesse momento está a questão da provisoriidade do conhecimento científico, uma vez que o resultado do experimento que simularam e de outros realizados posteriormente naquela época mudaram a ideia que se tinha a respeito do comportamento da paridade nas interações fracas. E, com base na síntese dos resultados, seria possível inferir o que pode acontecer com o conjunto de conhecimentos discutidos na solução do problema.

5 Aqui “corretamente” se refere a um modelo, que neste caso é o experimento histórico realizado pela cientista Chien-Shiung Wu e sua equipe em 1957.

Unidade didática 2

A unidade 2 aborda o desenvolvimento do conhecimento científico referente à realização do experimento que evidenciou a presença de correntes neutras. Essa unidade apresenta passos introdutórios mais extensos, pois trata do processo de desenvolvimento teórico-matemático da Teoria Eletrofraca.

Continuando a história (parte 1): nessa etapa, deu-se continuidade à explicação do processo histórico de desenvolvimento da Teoria Eletrofraca. O docente aborda a reformulação da Teoria de Fermi para a forma V-A, a teoria de gauge, a estrutura dos grupos de simetria, as primeiras ideias a respeito dos bósons mediadores, a participação do físico brasileiro José Leite Lopes, as correntes neutras, a teoria de gauge não abeliana, as tentativas de Glashow, Salam e Weinberg e, por último, o mecanismo de Higgs.

Esses assuntos foram abordados nas exposições de partes do processo que se sucederam à evidência experimental da violação da paridade nas interações fracas e à proposição da Teoria Eletrofraca até a detecção das correntes neutras. Foram feitas apresentações de *slides*, discussões, a leitura de um trecho da palestra “Sobre os bósons pesados e a existência do bóson neutro”, proferida pelo cientista brasileiro Leite Lopes (2000), a atividade Tricky Tracks, proposta por Lederman e Abd-El-Khalick (1998), e a exibição de um vídeo que explica o mecanismo de Higgs.

Essas atividades tiveram o objetivo de explicar o conteúdo científico e discutir noções da natureza da ciência, como o caráter humano dos cientistas, a diferença entre observações e inferências, o formalismo matemático na construção do conhecimento científico.

Momento de consolidação 3: após a introdução de todos os assuntos da unidade e antes de dar continuidade à exposição dos eventos históricos, convém retomar recursivamente pontos relevantes para que os estudantes compreendam como se chegou à proposição da Teoria Eletrofraca e das correntes neutras.

Continuando a história (parte 2): nessa etapa, foram expostas algumas das soluções encontradas para os problemas que impediam a formulação completa da Teoria Eletrofraca, entre elas: o motivo pelo qual as correntes neutras não eram observadas no decaimento de partículas estranhas e a renormalização da teoria. Enfatizou-se ainda a relevância do formalismo matemático para o desenvolvimento de teorias científicas e foram fornecidos detalhes a respeito da busca experimental pelas correntes neutras.

Ao final dessas três etapas, os conteúdos científicos envolvidos na elaboração da Teoria Eletrofraca foram apresentados, e o novo objetivo investigativo-pedagógico passou a ser a solução de outro problema: as correntes neutras existem?

Atividades com simulação de “detecção das correntes neutras”: os estudantes receberam um texto⁶ (fonte de informação), elaborado para esta pesquisa com o fim de auxiliar na exploração da simulação computacional (busca da informação) e na elaboração do V de Gowin (elaboração das conclusões).

A simulação desse experimento segue etapas parecidas com a feita na unidade 1. Pode-se testar várias montagens do experimento e, quando uma delas estiver correta, prossegue-se para as demais etapas tendo como guia as mensagens que orientam as atividades e que, além disso, advertem se houver erros, explicando o motivo deles. Aqui, há uma etapa nova: são disponibilizadas a fotografia do evento original que evidencia a presença das correntes neutras e informações a respeito dessa detecção.

Vídeo Gargamelle: após as atividades de simulação do experimento com a câmara Gargamelle, foi exibido um vídeo⁷ que explica

6 Disponível no Apêndice C.

7 Trata-se de uma versão editada do vídeo *Gargamelle: this film recalls design, construction and operation of this heavy liquid bubble chamber named thus for its size of giantess*. O vídeo original está disponível em: <https://videos.cern.ch/record/43141>.

o processo de construção e execução do experimento, com a finalidade de apresentar e descrever os registros históricos. Uma síntese dos resultados permitiu inferir próximos passos para o estabelecimento da Teoria Eletrofraca.

Momento de consolidação 4: nessa etapa o docente aborda o resultado do experimento e suas implicações na trajetória de partículas para a detecção dos bósons mediadores da interação fraca.

Unidade didática 3

A terceira unidade vai apresentar os esforços e desafios enfrentados para a realização do experimento que detectou indiretamente os bósons W^+ , W^- e Z^0 .

Continuando a história (parte 3): foram abordados os aprimoramentos tecnológicos e as parcerias para o desenvolvimento de um experimento que fosse capaz de detectar os bósons mediadores da interação fraca, os desafios enfrentados, a forma de detecção desses bósons, o detector UA1 e o processo de aceleração das partículas até a colisão no detector. Esses assuntos foram tratados com o auxílio de slides e um vídeo⁸ que explica o processo de aceleração das partículas. Entre as noções de NdC discutidas, estavam as atribuições de um cientista e o trabalho colaborativo.

Atividades com simulação de “detecção indireta dos bósons W^+ , W^- e Z^0 ”: um texto⁹ foi fornecido (fonte de informação) para auxiliar na exploração da simulação computacional (busca de informação) e elaboração do V de Gowin (elaboração das conclusões) referente ao experimento simulado.

8 Trata-se de uma versão editada do vídeo *Cern Control Centre “From LINAC to the LHC”*. O vídeo original está disponível em: <https://videos.cern.ch/record/1750702>.

9 Disponível no Apêndice D.

Nessa simulação, diferentemente das duas primeiras, a primeira etapa é mais informativa do que interativa. Obtém-se conhecimento do funcionamento do sistema de aceleração e detecção dos bósons para que, na segunda etapa, seja possível interagir com a simulação do processo desde a aceleração dos prótons, passando pela produção e aceleração de antiprótons, até a colisão e a detecção das partículas geradas nas colisões. Essa simulação apresentou fotografias de algumas etapas da montagem do detector UA1 e dos eventos originais que evidenciaram as detecções dos bósons da interação fraca.

Atividades extraclasse: como são vários os conteúdos abordados na oficina e as atividades em sala de aula podem não ser suficientes para a familiarização com o processo de desenvolvimento da teoria, sugere-se lançar mão de um material para que os estudantes façam uma revisão do conteúdo com calma. Para isso, elaborou-se um texto específico¹⁰, que diferencia progressivamente os conceitos apresentados no texto do primeiro encontro (“Teoria Eletrofraca”). Ao final da atividade, espera-se o alcance de uma compreensão mais aprofundada dos processos em estudo e o surgimento de dúvidas ou curiosidades a respeito do assunto, que podem ser discutidas na etapa seguinte.

Consolidação da Teoria Eletrofraca: nessa etapa, abordam-se os resultados do último experimento simulado e suas implicações, bem como se promove uma revisão geral de todos os fatores que contribuíram no processo de desenvolvimento da Teoria Eletrofraca.

Momento de feedbacks: é possível que o público-alvo incorra em alguns equívocos em relação às noções de NdC e à elaboração do V de Gowin. Assim, esse momento é reservado para a discussão dos pontos que eventualmente não tenham ficado claros no decorrer da implementação dessa abordagem, evitando talvez a reincidência desses equívocos em atividades posteriores ou retificando positivamente a estrutura cognitiva.

10 Disponível no Apêndice E.

V de Gowin a respeito da Teoria Eletrofraca: sugere-se a produção de um V de Gowin, mediada pelo texto fornecido para as atividades extraclasse, com o objetivo de incrementar o entendimento sobre o processo de elaboração da Teoria Eletrofraca e de examinar a trajetória de construção do conhecimento relativo à unificação das teorias eletromagnética e fraca.

Atividades de consolidação

Ao final, são discutidas as generalidades do tema, como a questão da unificação das teorias, a detecção de partículas em aceleradores, ideias de como são feitas as pesquisas em Física de Partículas, e retomam-se conhecimentos científicos e noções de NdC por meio de questionamentos que incentivem os aprendizes a expressarem o que entenderam do assunto.

Unificação de teorias: nessa etapa da oficina, discute-se o conceito de unificação de teorias e sua relação com o desenvolvimento científico.

Animação do experimento ATLAS: sugere-se uma atividade para explicar o funcionamento de sistemas de detecção de partículas. Para isso, nesta pesquisa foi utilizada uma animação interativa disponibilizada pelo experimento ATLAS¹¹ que mostrava as trajetórias de diferentes partículas em detectores.

Atividade com o software Hypatia: Hypatia¹² é um *software* desenvolvido pelo experimento ATLAS para o ensino de Física de Partículas.

11 A interação com essa animação já não é possível, em razão da descontinuação do programa Adobe Flash Player, no qual ela era executada. Na página <https://atlas.physicsmasterclasses.org/pt/index.htm>, entretanto, há uma série de materiais relacionados à Física de Partículas, que pode ser utilizada para substituir a atividade proposta.

12 Neste *link* é possível fazer download do *software* e encontrar informações sobre seu funcionamento: <http://hypatia.phys.uoa.gr/>. No site <https://atlas.physicsmasterclasses.org/pt/index.htm> também há o *link* para *download* e algumas dicas de uso.

Por meio dele, é possível analisar dados reais do CERN e fornecer aos estudantes um exemplo de como são desenvolvidas as pesquisas experimentais nessa área. Nessa etapa da oficina, o docente apresenta o *software* citado e sugere que os aprendizes realizem uma atividade de identificação de decaimentos do bóson Z^0 .

Consolidação final: esse é o momento de promover uma discussão a respeito dos conteúdos científicos e das noções de NdC que foram abordados no decorrer da oficina. A consolidação pode ser realizada por meio de questionamentos que levem os participantes da oficina a expressarem o que entenderam a respeito das questões e a discutir suas respostas com os demais colegas participantes.

Questionários: para finalizar as atividades, são distribuídos dois questionários, um composto pelas mesmas questões do questionário feito no início da abordagem, durante a realização das atividades relacionadas à Teoria da Aprendizagem Significativa, e um questionário de avaliação da abordagem em que aprendizes opinam a respeito da metodologia de ensino e dos recursos didáticos utilizados.

Observação da aplicação da abordagem em sala de aula

Essa abordagem foi desenvolvida com estudantes do curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual de Londrina, no formato de uma oficina de pesquisa, com três encontros presenciais de quatro horas e quatro horas de atividades extraclasse. Participaram da oficina nove alunos, que aqui se convencionou nomear por A1, A2, A3... A9 e que já tinham cursado ou estavam cursando a disciplina Física Moderna. Na oportunidade, foram analisados os dados que poderiam sinalizar indícios de aprendizagem significativa em relação aos conteúdos científicos abordados e às noções de natureza da ciência. Os dados oriundos de questionários e de diagramas de Gowin elaborados por estudantes foram analisados à luz da Análise de Conteúdo de

Bardin (2011), e, a título de exemplificação, alguns resultados serão apresentados nesta seção.

Em relação aos conteúdos científicos, os dados obtidos mostraram que a maioria dos conceitos discutidos era novidade para o público-alvo. Assim, os estudantes tiveram a oportunidade de assimilar conteúdos que podem vir a se tornar subsunçores para aprendizagens futuras. Por exemplo, inicialmente, ao serem indagados quanto a seu conhecimento a respeito das correntes neutras, eles não sabiam do que se tratava, como é possível notar pelas suas respostas:

A8: “Não conheço o termo”.

A4: “Não sei”.

A1: “Nem ideia”.

Enquanto, ao final da abordagem, a maioria desse público demonstrava ter conhecimento do assunto:

A8: “Correntes neutras são aquelas que não alteram a carga da partícula”.

A4: “Bósons de interação com carga neutra que não afetam a carga dos processos. Correntes carregadas alteram a carga do processo e são formadas por bósons carregados”.

A1: “São correntes de partículas que não alteram a carga, diferente das correntes carregadas que alteram a carga elétrica”.

Além disso, houve estudantes que passaram a apresentar reconciliação integradora em suas elaborações ao final da abordagem, ou seja, utilizaram conceitos novos, discutidos na oficina, para explicar outros conceitos sobre os quais eles já tinham algum conhecimento. Pode-se citar casos em que, após a abordagem, descreveram as interações eletromagnética e fraca e o decaimento beta com conceitos recém-aprendidos:

A3: “No decaimento beta, um quark *up* (*down*) do próton (nêutron) decai em um quark *down* (*up*), formando um nêutron (próton), e mais um bóson W^+ (W^-), que eventualmente decai em um pósitron (elétron) e um neutrino (antineutrino)”.

A5: “[A interação fraca é um] processo interativo mediado por W^+ , W^- e Z^0 ”.

A8: “[A interação eletromagnética] envolve prótons e elétrons e é descrita por $U(1)$, que descreve o comportamento do campo”.

Nessas respostas dos estudantes, os conceitos dos bósons W^+ , W^- e Z^0 e de $U(1)$ aparecem na explicação relacionados a algum conhecimento prévio. Desse modo, a abordagem contribuiu para que enriquecessem seus subsunçores e promoveu um aumento do vocabulário científico e da recursividade, aspectos evidenciados pelo uso de uma linguagem condizente com os assuntos estudados.

Ao refletir a respeito da contribuição dessa abordagem didática para a problematização de noções de NdC, percebe-se que os indícios de melhores resultados foram para as questões relacionadas às visões empírico-indutivistas da experimentação e ao papel dos experimentos na elaboração do conhecimento científico. Quanto à provisoriidade do conhecimento científico, à ciência não neutra e à participação da criatividade e imaginação no desenvolvimento científico, pode-se dizer que logo no início da abordagem a maioria dos participantes apresentava noções menos imprecisas. Isso pode ser justificado pela sua formação anterior, pois, em grande parte, eles já tinham tido contato com discussões relacionadas à história e filosofia da ciência em disciplina específica. Assim, para estudantes que não tenham tido esse contato prévio, pode ser que esta abordagem consiga um nível de sensibilização maior em relação às noções de natureza da ciência.

O V de Gowin se mostrou um instrumento efetivo para o entendimento do processo de desenvolvimento da Teoria Eletrofraca e auxiliou na compreensão dos desenvolvimentos experimentais que contribuíram ao longo da história da Física para a unificação das interações eletromagnética e fraca. Por meio dos diagramas, foi possível observar indícios de aprendizagem significativa pela identificação de reconciliação integradora entre conceitos científicos e, no caso de três estudantes, também foi possível notar indícios de aprendizagem de noções de natureza da ciência. No entanto, a ocorrência de algumas confusões do público-alvo entre princípios e conceitos

do V de Gowin foi identificada no início de sua adoção como instrumento pedagógico. Assim, recomenda-se que as atividades que visam a familiarização de aprendizes com os elementos epistemológicos do V de Gowin sejam bem detalhadas para dirimir quaisquer eventuais dúvidas.

A respeito da abordagem, as impressões dos aprendizes mostraram-se positivas, principalmente no que se refere às simulações computacionais dos experimentos. Entre os pontos positivos da abordagem citados, estão: permitir com as simulações que se aprenda mais em menos tempo; desmitificar cientistas e a ciência; empregar simulações e textos originais para o ensino de Física; apresentar experimentos históricos por meio das simulações.

Convém ressaltar que a ideia de que as simulações permitem que se aprenda mais em menos tempo é a opinião de um dos estudantes e não tem o objetivo de passar uma impressão ingênua de que as simulações são “salvadoras” do processo de ensino e de aprendizagem, mas, desde que elaboradas e utilizadas de maneira adequada, podem sim proporcionar resultados como a diminuição do tempo gasto na aprendizagem.

A metade dos participantes ainda sugeriu que encontros de quatro horas são cansativos e que as atividades poderiam ser realizadas em um número maior de encontros de menor duração. Dessa maneira, sugere-se que abordagens futuras levem em consideração esse aspecto.

Espera-se que os resultados alcançados nesta investigação possam inspirar docentes e que esta abordagem se torne uma alternativa para a disseminação de conhecimento científico, mediante a contextualização no ensino de Física, a compreensão da natureza da ciência e a promoção de aulas investigativas, desafiadoras e reflexivas, que proporcionem o protagonismo a estudantes no processo de aprendizagem, com foco numa educação científica contemporânea e de boa qualidade.

Referências

- ADÚRIZ-BRAVO, A.; IZQUIERDO, Y. M. Acerca de la didáctica de las ciencias como disciplina autónoma. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 1, n. 3, p. 130-140, 2002.
- ARAÚJO, I. S.; VEIT, E. A.; MOREIRA, M. A. Modelos computacionais no ensino-aprendizagem de física: um referencial de trabalho. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 341-366, 2012.
- AUSUBEL, D. P. **Aquisição e retenção de conhecimentos**: uma perspectiva cognitiva. Lisboa: Plátano, 2003.
- BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2011.
- BATISTA, I. L. O ensino de teorias físicas mediante uma estrutura histórico-filosófica. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 10, n. 3, p. 461-476, 2004.
- 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: Eduel, 2016. p. 157-167.
- CACHAPUZ, A. *et al.* A emergência da didáctica das ciências como campo específico de conhecimento. **Revista Portuguesa de Educação**, Minho, v. 14, n. 1, p. 155-195, 2001.
- CACHAPUZ, A.; PRAIA, J.; JORGE, M. Da educação em ciência às orientações para o ensino de ciências: um repensar epistemológico. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 10, n. 3, p. 363-381, dez. 2004.
- CHANG, H. How historical experiments can improve scientific knowledge and science education: the cases of boiling water and electrochemistry. **Science & Education**, Millsboro, v. 20, p. 317-341, 2011.
- 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.

- Tese (Doutorado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) – 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.
- GOWIN, D. B.; ALVAREZ, M. C. **The art of educating with V diagrams**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- HEERING, P. Analysing unsuccessful experiments and instruments with the replication method. **Éndoxa**, Madrid, n. 19, p. 315-340, 2005.
- LEBOEUF, H. A.; BATISTA, I. L. O uso do “V” de Gowin na formação docente em ciências para os anos iniciais do ensino fundamental. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 697-721, 2013.
- LEDERMAN, N. G.; ABD-EL-KHALICK, F. Avoiding de-natured science: activities that promote understandings of the nature of science. In: MCCOMAS, W. F. (ed.). **The nature of science in science education: rationales and strategies**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 83-126.
- LEITE LOPES, J. Sobre os bósons pesados e a existência do bóson neutro. In: ALVES, G. *et al.* (org.). **O mundo das partículas de hoje e de ontem**. Rio de Janeiro: CBPF, 2000. p. 59-65.
- METZ, D.; STINNER, A. A role for historical experiments: capturing the spirit of the itinerant lecturers of the 18th century. **Science & Education**, Millsboro, v. 16, n. 6, p. 613-624, 2007.
- MOREIRA, M. A. Diagramas V y aprendizaje significativo. **Revista Chilena de Educación Científica**, v. 6, n. 2, p. 3-12, 2007.
- MOREIRA, M. A. **Mapas conceituais e diagramas V**. Porto Alegre: o autor, 2006.
- MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: EPU, 1999.
- NOVAK, J. D.; GOWIN, D. B. **Learning how to learn**. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

- PEREIRA, P. A.; OSTERMANN, F. Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. **Investigação em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 393-420, dez. 2009.
- SILVA NETTO, J. S.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Estratégias discursivas adotadas por professores em formação na compreensão do fenômeno da complementaridade em atividades didáticas mediadas pelo interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 293-320, maio/ago. 2015.
- VALADARES, J. **Organizadores gráficos facilitadores da aprendizagem significativa**: diagramas em Vê e mapas de conceitos. Lisboa: UIED, 2014. (Coleção Educação e Desenvolvimento).
- ZABALA, A. **A prática educativa**: como ensinar. Porto Alegre: Artmed, 1998.



APÊNDICE A

ORGANIZADOR PRÉVIO

Teoria Eletrofraca: unificação das teorias eletromagnética e fraca

Com o passar do tempo, a Física conseguiu unificar fenômenos que pareciam distintos. Essas unificações derivam da compreensão de que fatos aparentemente diferentes podem ser interpretados como aspectos de um mesmo fenômeno fundamental (SALAM; DIRAC; HEISENBERG, 1991).

A primeira unificação refere-se às leis que determinam os movimentos terrestres e celestes, tendo sido Al-Biruni o primeiro pensador a afirmar que os fenômenos físicos no Sol, na Terra e na Lua obedeciam às mesmas leis, por volta de 990 a.C. (SALAM, 1991). Tal ideia foi reafirmada e demonstrada por Galileu, em 1610. Com ajuda de um telescópio, ele observou que o aparecimento de sombras na Lua e na Terra seguia o mesmo padrão. Depois, em 1680, Newton estabeleceu que a força gravitacional terrestre, que atrai os objetos para o centro da Terra, e a força gravitacional celeste, que mantém os planetas se movimentando em torno do Sol, são as mesmas.

Cento e cinquenta anos mais tarde foi a vez da eletricidade e do magnetismo. Em 1820, Faraday e Ampère defenderam que essas duas forças podiam ser unificadas numa única força fundamental, a eletromagnética. As interações eletromagnéticas atuam entre partículas carregadas elétrica e magneticamente, com ação tanto repulsiva

quanto atrativa a depender do sinal das cargas interagentes. Elas possibilitam a ligação de átomos e moléculas para formar matéria e são mediadas por bósons chamados de fótons, responsáveis pela formação dos campos eletromagnéticos. Trata-se de uma interação de longo alcance e relativamente forte, que está presente na explicação de uma gama de dispositivos, que vão desde o *laser* até o rádio. Essa unificação foi o que permitiu inclusive a construção de estações geradoras de eletricidade, já que o eletromagnetismo foi a base da tecnologia de correntes e motores elétricos.

O eletromagnetismo também foi estudado por Maxwell, que sugeriu, cerca de cinquenta anos depois de Faraday, que, se uma carga elétrica fosse acelerada, ela emitiria energia eletromagnética. Ele utilizou um dispositivo experimental para demonstrar que, no vácuo, a velocidade da radiação eletromagnética poderia ser expressa em termos de duas constantes que descreviam as propriedades elétricas e magnéticas. Muitas tecnologias do século XX, como o rádio, a televisão e os raios X, têm essa unificação como base, porém a tese só foi comprovada pelo físico alemão Heinrich Hertz em 1888, dez anos após a morte de Maxwell. Os estudos que Maxwell realizou também forneceram uma evidência indireta da unificação do eletromagnetismo e da óptica.

Outra unificação da Física é a Teoria da Relatividade Restrita, de Albert Einstein. Em 1905, ele relacionou tempo e espaço em uma equação, indicando que, do ponto de vista de um observador em repouso, o tempo passa mais lentamente para um corpo que se desloca próximo à velocidade da luz. Passados dez anos, Einstein geometrizou a Física com a Teoria da Relatividade Geral, relacionando massa a energia ao postular que a curvatura do espaço-tempo gerada nas proximidades de corpos massivos é o que determina a interação gravitacional. A curvatura do espaço já fora um palpite de Gauss, há cerca de cem anos, mas seus experimentos, aplicados a distâncias da ordem de quilômetros, não puderam validar tal hipótese.

Einstein via uma possível ligação também entre as interações gravitacional e eletromagnética, pois, embora suas intensidades,

comparadas a uma mesma distância, fossem diferentes, elas apresentavam uma simetria: ambas obedeciam à Lei do Inverso do Quadrado. Essa relação havia sido considerada anteriormente por Faraday, em 1849, mas nem ele, à época, nem Einstein, no século XX, obtiveram êxito em seus experimentos. Isso levou Dirac e outros cientistas a pensarem que a unificação das forças fundamentais não era uma possibilidade viável (SALAM, 1991). Tampouco a hipótese para unificar a gravidade e o eletromagnetismo de Kaluza e Klein, de um espaço-tempo com cinco dimensões, foi aceita por outros pesquisadores daquela época, e os estudos acerca de dimensões do espaço-tempo adicionais foram descontinuados por Kaluza. Atualmente, no entanto, a teoria das supercordas sugere a existência de dez dimensões, de modo a acomodar sob uma única força fundamental todas as outras (SALAM, 1991).

Diferentemente das interações eletromagnéticas e das gravitacionais, as interações fracas e fortes só foram conhecidas no desenrolar do século XX. No entanto, ainda no fim do século XIX, os conhecimentos a respeito da constituição e das propriedades fundamentais da matéria haviam-se expandido com a descoberta da radioatividade (BATISTA, 1999). Criara-se assim um novo campo de estudo na Física e, em 1898, Rutherford já havia distinguido as radiações alfa e beta. Em 1900, os pesquisadores sabiam que as partículas beta eram elétrons provenientes de núcleos atômicos instáveis (BATISTA, 1999), porém algo os instigava...

O produto do decaimento beta não apresentava a mesma quantidade de energia do núcleo original. Alguns cientistas cogitaram a ideia da violação do princípio da conservação de energia, outros — entre os quais, o primeiro foi Pauli — defendiam o surgimento de uma nova partícula. Então Enrico Fermi, aderindo à tese de Pauli, elaborou em 1933 uma teoria que previa a produção dessa nova partícula (neutrino) no decaimento beta. Surgiam desse modo as primeiras noções a respeito da interação de Fermi ou interação fraca (BATISTA, 2005). A Teoria de Fermi permaneceu inalterada por mais de vinte

anos, mas seu campo de aplicação foi expandido na década de 1950, quando foi aperfeiçoada por Sudarshan, Marshak, Lee, Yang, Feynman, Gell-Mann, entre outros cientistas contemporâneos.

A interação fraca é mediada pelos bósons vetoriais intermediários W^+ , W^- e Z^0 e age sobre os dois tipos de férmions: léptons e quarks. Ela realiza a transformação de um tipo de quark em outro por meio da emissão de partículas no decaimento radioativo e desempenha um papel decisivo na produção de energia pelo sol. Essa interação é 10^5 vezes menos intensa que a interação eletromagnética e seu alcance é menor que o da interação forte por um fator de 1.000, não passando de 10^{-16} m (SALAM, 1991), porém é a única força que os neutrinos experimentam.

A interação forte, por sua vez, é uma das forças responsáveis pela existência da matéria como se conhece, pois ela mantém os nêutrons e os prótons coesos no núcleo do átomo, evitando que os prótons o destruam por repulsão eletromagnética, o que impossibilitaria a constituição da matéria. Essa interação foi proposta por Hideki Yukawa em 1935, embora não tenha sido formalizada nessa época. A princípio, Yukawa acreditava que ela poderia explicar todas as interações nucleares, porém, mais tarde, os estudos de Bethe (1940) e Bethe e Nordheim (1940) provaram inválida essa hipótese (BATISTA, 1999).

A Teoria Eletrofraca unifica as interações eletromagnéticas e fracas. Descrevendo a mistura dos dois campos por meio da estrutura $SU(2) \times U(1)$, ela resulta da aplicabilidade da teoria de gauge e dos princípios de simetria, num quadro matemático que criou não só o contexto, mas também o mecanismo para gerar uma unificação sintética e não redutora do eletromagnetismo e da interação fraca.

Sua proposição deriva de questionamentos a respeito da conservação da paridade nas interações fracas. Uma vez evidenciada a violação de tal princípio nessas interações por meio de um experimento em 1956, foi necessário reformular a Teoria de Fermi, que as descrevia. Essa reformulação contou com a participação de vários cientistas, trazendo a hipótese da existência de partículas mediadoras da interação fraca e a proposta da forma V-A para expressá-la. Como

a natureza vetorial das interações fracas era compatível com a natureza vetorial das interações eletromagnéticas, surgiu entre cientistas o questionamento a respeito de uma possível relação entre as duas, para a qual foram feitas diferentes formulações. Entre elas, destacaram-se as estimativas de massa dos bósons mediadores da interação fraca e a hipótese da existência de um bóson neutro para compor os mediadores da interação fraca.

Essas hipóteses criavam problemas, pois os bósons mediadores da interação fraca, pelas estimativas teóricas, eram massivos e carregados, enquanto o mediador da interação eletromagnética era desprovido de massa e carga. Outra previsão era que correntes neutras seriam ocasionadas pela interação do bóson neutro, mas até o momento elas não haviam sido detectadas. Os resultados não eram coerentes, pois, para relacionar as interações, era usada a teoria de gauge, da qual resultavam bósons sem massa, diferentes dos bósons da interação fraca. E colocar a massa manualmente nos cálculos tornava a teoria não renormalizável e destruía seu poder preditivo. Parecia interromper-se aí qualquer indício de relação entre as interações fracas e o eletromagnetismo.

O problema, no entanto, foi resolvido com a hipótese de que a quebra espontânea de simetria deveria ser local, e não global, como se considerava até então. Esse mecanismo, que explicava a presença dos bósons massivos, ficou conhecido como mecanismo de Higgs.

Esses conhecimentos foram sistematizados e a Teoria Eletrofraca foi formalizada, independentemente, por Weinberg, em 1967, e por Salam, em 1968. No entanto, ambas as formalizações não levavam em consideração os quarks, cuja inclusão foi feita somente em 1970 por Glashow — que já havia publicado, em 1961, algumas ideias que participam da formulação da Teoria Eletrofraca — em colaboração com Iliopoulos e Maiani (GLASHOW, 1980; SALAM, 1980; WEINBERG, 1980). No entanto, nem tudo estava resolvido, pois ainda não havia indícios experimentais das correntes neutras nem a teoria havia sido renormalizada.

A fim de renormalizá-la, ela foi colocada numa base matemática extremamente sólida, para que ganhasse atenção de físicos experimentais e da comunidade científica em geral, o que aconteceu em 1971 (‘T HOOFT, 1997). Essa formalização matemática não somente eliminou os infinitos como também permitiu que a teoria passasse a ter um potencial preditivo a altas energias. A partir disso, houve um crescente interesse dos físicos experimentais na detecção das partículas mediadoras da interação fraca e das correntes neutras.

Os esforços da época foram compensados em 1973, com a evidência experimental das correntes neutras, detectadas numa câmara de bolhas denominada Gargamelle (HASERT *et al.*, 1973, 1974). Essa se tornou a primeira evidência experimental da Teoria Eletrofraca e deu impulso para novas investigações, como a busca por evidências da violação da paridade em átomos devido às correntes neutras.

Em 1978, um experimento enfim demonstrou que as interações eletromagnéticas e fracas agiam juntas (PRESCOTT *et al.*, 1978), convencendo a comunidade científica a respeito da Teoria Eletrofraca, e em 1979 seus proponentes foram laureados com o Prêmio Nobel.

Os bósons mediadores da interação fraca, W^+ , W^- e Z^0 , foram detectados algum tempo depois, em 1983, no experimento UA1, completando assim os bósons mediadores da interação eletrofraca juntamente com o fóton (ARNISON, 1983).

Assim, de acordo com a Teoria Eletrofraca, inicialmente, as interações eletromagnética e fraca eram uma só, a interação eletrofraca, cujas partículas teriam massa nula e estariam sujeitas à simetria de gauge. No entanto, por meio do mecanismo de Higgs, houve a quebra espontânea de simetria e os bósons da interação fraca adquiriram massa da interação com o campo de Higgs, o fóton permanece sem massa e surgiu um bóson escalar de spin 0, o bóson de Higgs. Esse fenômeno teria ocorrido após uma transição de fase eletrofraca, quando a temperatura do universo era aproximadamente 10^{15} K $\approx 3 \times 10^{15}$ °C, dez a doze segundos após o Big Bang. Assim, antes da transição de fase, quando a temperatura era maior, havia a interação

eletrofraca e, após essa transição, ela se dividiu nas interações eletromagnética e fraca (SALAM, 1991).

Esse episódio da história da Física permitiu uma melhor compreensão da natureza da matéria e das interações fundamentais, foi o primeiro passo na formulação teórica de um modelo conhecido como Modelo Padrão, além de ilustrar noções da natureza do desenvolvimento científico.

Referências

- ARNISON, G. *et al.* Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at $s=540$ GeV. **Physics Letters B**, v. 122, n. 1, p. 103-116, 1983.
- BATISTA, I. L. **A teoria universal de Fermi**: da sua formulação inicial até a reformulação V-A. 1999. Tese (Doutorado em Filosofia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- BATISTA, I. L. As partículas estranhas e a teoria universal de Fermi. *In*: PIETROCOLA, M.; FREIRE JR., O. (org.). **Filosofia, ciência e história**: uma homenagem aos 40 anos de colaboração de Michel Paty com o Brasil. São Paulo: Discurso Editorial, 2005. p. 437-471.
- BETHE, H. A. The meson theory of nuclear forces. **Physical Review**, v. 57, p. 260-272, 1940.
- BETHE, H. A.; NORDHEIM, L. W. On the theory of meson decay. **Physical Review**, v. 57, p. 998-1006, 1940.
- GLASHOW, S. L. Towards a unified theory: threads in a tapestry. **Review of Modern Physics**, v. 52, n. 3, p. 539-543, 1980.
- HASERT, F. J. *et al.* Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the Gargamelle neutrino experiment. **Nuclear Physics B**, v. 73, n. 1, p. 1-22, 1974.
- HASERT, F. J. *et al.* Search for elastic muon-neutrino electron scattering. **Physics Letters**, v. 46B, n. 1, p. 121-124, 1973.

- PRESCOTT, C. *et al.* Parity non-conservation in inelastic electron scattering. **Physics Letters B**, v. 77, n. 3, p. 347-352, Aug. 1978.
- SALAM, A. Gauge unification of fundamental forces. **Review of Modern Physics**, v. 52, n. 3, p. 525-538, 1980.
- SALAM, A. Unificação das forças fundamentais. *In*: SALAM, A.; DIRAC, P.; HEISENBERG, W. **Em busca da unificação**. Lisboa: Gradiva, 1991. p. 7-72.
- SALAM, A.; DIRAC, P.; HEISENBERG, W. **Em busca da unificação**. Lisboa: Gradiva, 1991.
- 'T HOOFT, G. Renormalization of gauge theories. *In*: HODDESON, L. *et al.* (ed.). **The rise of the standard model**: a history of particle physics from 1964 to 1979. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 179-198.
- WEINBERG, S. Conceptual foundations of the unified theory of weak and electromagnetic interactions. **Review of Modern Physics**, v. 52, n. 3, p. 515-523, 1980.
- WU, C. S. *et al.* Experimental test of parity conservation in beta decay. **Physical Review**, v. 105, p. 1413-1415, 1957.

APÊNDICE B

MATERIAL DE APOIO PARA A REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO 1

Paridade nas interações fracas

Na década de 1950, surgiu um problema que colocou em dúvida a conservação da paridade nas interações fracas. Duas novas partículas, theta (θ) e tau (τ), com massa e tempo de vida idênticos, eram tidas como produto do decaimento da partícula K, hoje denominada káon, e, pelas características identificadas, poderiam ser partículas iguais. Theta decaía em dois píons e tau em três, no entanto os valores já observados de paridade e spin dessas partículas eram diferentes, o que, na época, não era admitido teoricamente.

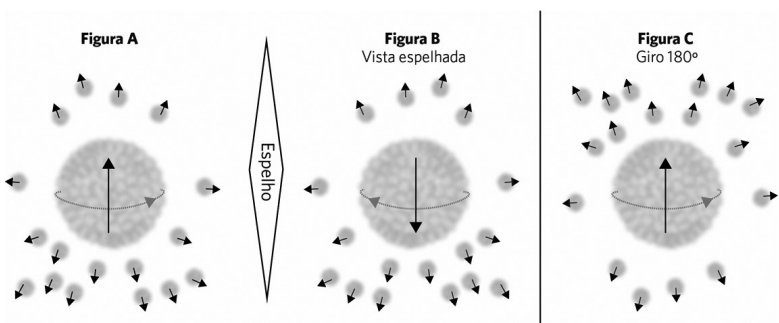
A teoria que então explicava os decaimentos radioativos e como estes se comportavam era a Teoria de Fermi. Porém, não havia explicação para o que acontecia com estas duas partículas, θ e τ , e as discussões a respeito continuaram até 1956, quando uma dupla de físicos teóricos, Tsung-Dao Lee e Chen Ning Yang, propuseram que a paridade não se conserva nas interações fracas. Estudando intensivamente, principalmente os casos de decaimento beta, eles perceberam que, nos decaimentos beta, a conservação da paridade e as demais características dos isótopos radioativos eram uma hipótese extrapolada das

interações forte e eletromagnética. Não havia nenhuma evidência empírica de que o mesmo ocorria nas interações fracas: o problema das partículas θ e τ estava resolvido.

O conceito de paridade em Física remete a simetria. Na Física Quântica, mais especificamente na Física de Partículas, a paridade é 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, gera-se uma nova função $\psi'(-x, -y, -z)$. Essa reflexão de coordenadas é chamada de transformação de paridade. Quando não ocorre mudança de sinal na função ψ' , diz-se que a paridade é positiva, caso contrário, a paridade é dita negativa. Convém ressaltar que a paridade de um grupo de partículas é dada pelo produto e não pela soma das paridades das partículas individuais.

A transformação de paridade (Figura 1) é equivalente a uma reflexão de espelho seguida por uma rotação de 180 graus paralela ao espelho.

Figura 1 – Representação de uma transformação de paridade



Fonte: Costa (2019).

Na parte A da Figura 1, um núcleo gira no sentido anti-horário e tem o sentido de seu eixo de rotação para cima. Ao espelhar essa imagem, o sentido do giro se inverte e consequentemente o sentido

do eixo de rotação também (Figura 1B). O próximo passo é girar a imagem espelhada em 180 graus, assim o sentido do giro e do eixo de rotação retoma a direção original (Figura 1C), completando uma transformação de paridade.

Ao analisar as imagens A e C, observa-se que o número de partículas emitidas durante o decaimento é igual tanto na direção do eixo de rotação quanto na direção oposta. Isso representa a conservação da paridade, quando um processo físico decorre exatamente da mesma maneira ao ser submetido a uma inversão de coordenadas, uma vez que, sendo o número de emissões uniforme em todas as direções, os decaimentos com alinhamento para cima e para baixo são indistinguíveis.

Em outras palavras, duas partículas radioativas semelhantes que giram em sentidos opostos, em torno do mesmo eixo, devem emitir igual intensidade de radioatividade em qualquer direção dada. Alguns físicos da época, no entanto, acreditavam na ideia de violação da conservação da paridade nas interações fracas, embora, para a maioria deles, essa não fosse uma alternativa frutuosa, já que não era contemplada pela Teoria de Fermi.

O primeiro teste experimental que evidenciou a quebra da conservação da paridade foi desenvolvido pela física Chien-Shiung Wu e sua equipe no National Bureau of Standards (NBS), nos Estados Unidos. A cientista, após uma conversa com Lee, na qual discutiram avanços nos experimentos relacionados ao decaimento beta e à conservação da paridade, começou a investigar o assunto. O que se sabia na época era que o decaimento beta era um processo no qual um núcleo instável decaía em um núcleo estável pela transformação de um nêutron em um próton com a emissão de um elétron e seu antineutrino ou pela transformação de um próton em um nêutron com a emissão de um pósitron e um neutrino.

Wu levou em conta o fato de que todos os prótons do núcleo têm momentos magnéticos, o que significa que eles podem atuar como um conjunto de minúsculos ímãs. Assim, se fossem colocados em um campo magnético, os núcleos se alinhariam tal qual um

conjunto de ímãs. De tal modo, a ideia do experimento foi alinhar os spins nucleares em duas direções, para cima e para baixo, e observar o número de emissões em cada caso. Se a paridade fosse conservada, então as partículas emitidas surgiriam em iguais quantidades tanto para cima quanto para baixo.

O processo de decaimento estudado foi o seguinte: ${}_{27}^{60}\text{Co} \rightarrow {}_{28}^{60}\text{Ni} + e^{-} + \bar{\nu}_e + 2\gamma$. Nesse caso, um dos nêutrons do núcleo do cobalto decai para um próton por emissão de um elétron e seu antineutrino, transformando-se em um núcleo de níquel, que por sua vez decai para seu estado fundamental com a emissão de dois raios gama (2γ , fótons).

Ao iniciar as investigações, Wu já sabia que precisaria trabalhar com baixas temperaturas, pois a energia térmica dos átomos de cobalto é demasiadamente alta, o que destruiria o alinhamento dos prótons. Suas previsões teóricas apontavam para a necessidade de uma temperatura de aproximadamente 0,01 K, e, como ela não dominava as técnicas de alinhamento nessas condições, convidou outros cientistas para a investigação.

O experimento exigia a combinação inédita de duas técnicas experimentais sofisticadas: 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.

A polarização da amostra foi feita por desmagnetização adiabática. Nesse processo a amostra é misturada a um material paramagnético, um composto magnético que, por meio de variação de entropia, esfria ao ser submetido à ação de um campo magnético e absorve calor quando esse campo é removido. Assim, sob a ação do campo magnético, a amostra foi magnetizada até se obter uma polarização quase total do sistema e, ao se retirar suavemente o campo, a amostra foi resfriada pela ação do material paramagnético.

Para realizar as medidas, foi necessário colocar a amostra e o detector de partículas beta dentro de um equipamento que garantisse

um suficiente isolamento térmico para o controle e a manutenção de baixas temperaturas.

A detecção das partículas beta nessas condições só foi possível porque Wu e sua estudante de pós-graduação, Marion Biavati, observaram, utilizando o método de cintiladores, que partículas beta ainda produziam sinais luminosos mesmo em baixas temperaturas. Um material cintilador é um tipo de detector que, quando é atingido por uma partícula carregada, emite um sinal luminoso.

Para obter as informações a respeito das partículas emitidas, o sinal luminoso precisou ser convertido num sinal elétrico com auxílio de um dispositivo. Tal dispositivo não funcionava em baixas temperaturas, e, por isso, logo acima do cintilador dentro do recipiente, foi colocado um tubo acrílico transparente pelo qual os sinais luminosos podiam ser transmitidos para fora. Então, fora do recipiente, o dispositivo convertia o sinal e o enviava para um analisador de altura de pulsos, que fornecia as informações necessárias a respeito da emissão das partículas no decaimento.

O alinhamento da amostra em duas direções opostas se deu por meio do controle do sentido de correntes elétricas. Sabendo que campos magnéticos podem ser produzidos por correntes elétricas circulando em fios, bobinas, solenoides, toroides etc., Wu escolheu colocar um desses aparatos em torno do recipiente que continha a amostra, garantindo que fosse gerado um campo magnético uniforme em seu interior.

Por fim, para verificar o grau de polarização e a temperatura da amostra durante as medidas, posicionaram-se dois detectores de radiação gama em torno do dispositivo de baixas temperaturas. Esses detectores também eram cintiladores e emitiam um sinal luminoso que precisava ser convertido em sinal elétrico.

Resumindo, a amostra era misturada com um material paramagnético, colocada dentro do recipiente de baixas temperaturas junto com o cintilador detector de partículas beta e o tubo de acrílico, polarizada e resfriada pelo método de desmagnetização adiabática. Em seguida, um dispositivo posicionado em torno do recipiente

de baixas temperaturas provocava o alinhamento da amostra para cima ou para baixo no sentido do campo magnético, e as medidas do decaimento eram feitas: as partículas emitidas atingiam o cintilador, que transmitia um sinal luminoso pelo tubo de acrílico até um dispositivo onde o sinal era convertido e enviado para um analisador de altura de pulsos. Após esse processo, o campo magnético era invertido, a amostra se alinhava e as medidas eram tomadas novamente. O controle de temperatura e de polarização era feito por dois detectores de radiação gama que enviavam sinais luminosos para dispositivos onde esses sinais eram convertidos em sinais elétricos e enviados para o analisador de altura de pulso. Com todos os dados, o analisador de altura de pulso fornecia as informações a respeito da quantidade e da direção de partículas emitidas no processo.

Agora é sua vez de realizar esse experimento!!! Encontre os dispositivos adequados e responda à pergunta que inquietou os cientistas: a paridade se conserva nas interações fracas?

Referências

- FORMAN, P. The fall of parity. **The Physics Teacher**, v. 20, n. 5, p. 281-288, 1982.
- FRANKLIN, A. **Experiment, right or wrong**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- FRANKLIN, A. **The neglect of experiment**. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- HAMMOND, R. **Chien-Shiung Wu: pioneering nuclear physicist**. New York: Chelsea House Publications, 2010.
- LEE, T. D.; YANG, C. N. Mass degeneracy of the heavy mesons. **Physical Review**, v. 102, n. 1, p. 290-291, 1956.
- WU, C. S. *et al.* Experimental test of parity conservation in beta decay. **Physical Review**, v. 105, p. 1413-1415, 1957.

APÊNDICE C

MATERIAL DE APOIO PARA A REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO 2

Correntes neutras

Após ser comprovada a violação da paridade nas interações fracas, houve a necessidade de aprimorar a Teoria de Fermi. Assim, surgiu a teoria V-A, que explicava todos os eventos envolvendo interações fracas até aquele momento.

Uma vez que tanto a interação fraca quanto a eletromagnética apresentavam uma forma vetorial, alguns cientistas cogitaram haver uma relação entre elas, para a qual fizeram muitas formulações teóricas. A maioria dessas formulações se baseava em teorias de gauge, uma classe da Teoria Quântica de Campos que envolve mecânica quântica e relatividade especial para descrever partículas atômicas e seus campos.

Depois de proposta a teoria de gauge, Yang e Mills, em 1954, elaboraram uma teoria de gauge não abeliana, em que as transformações dependem da ordem em que são realizadas, com o propósito de que se tornasse uma teoria das interações fortes. Um trabalho parecido foi desenvolvido por Ronald Shaw, aluno de Abdus Salam

e, em virtude disso, em alguns casos essa proposta é conhecida como teoria de Yang-Mills-Shaw.

Foi em algumas dessas reformulações que se aventaram as hipóteses da existência de bósons mediadores da interação fraca, uma possível unificação das interações eletromagnética e fraca, e de um bóson neutro, também mediador da interação fraca, que daria origem às correntes neutras.

Os processos de decaimento conhecidos até então provocavam mudança de carga elétrica, por isso se acreditava que eram causados por correntes carregadas. Porém, a hipótese de um bóson neutro implicava a existência de correntes neutras, que não provocam mudança de carga elétrica, apenas transferência de momento. É o caso de um neutrino espalhado por um elétron; ambos apresentam mudanças no momento linear.

No entanto, a teoria de gauge, na proposta de Yang-Mills-Shaw, gerava bósons sem massa e, pelas estimativas, os bósons mediadores da interação fraca deveriam ser massivos. Assim, não parecia que essa teoria poderia descrever as interações fracas e eletromagnéticas, pois o fóton era o único bóson desprovido de massa nesse sistema e não havia, até aquele momento, como explicar a massa dos outros bósons.

Esse problema só começou a ser contornado em 1960, após alguns cientistas perceberem que a quebra espontânea de simetria também gerava bósons sem massa. Juntos, esses bósons e aqueles bósons sem massa da teoria de Yang-Mills-Shaw resolviam o problema das massas pelo mecanismo de Higgs, proposto em 1964.

Assim, depois de muitas tentativas para descrever a unificação das interações fracas e eletromagnéticas, Glashow, Weinberg e Salam, independentemente, elaboraram uma teoria que explicava essas interações: a Teoria Eletrofraca. Tal formulação levava em consideração a estrutura $SU(2) \times U(1)$ para descrever a estrutura do grupo de transformações de gauge. Juntas, essas estruturas distintas descrevem a unificação das interações envolvidas e sugerem a existência de quatro bósons mediadores da interação eletrofraca, um da eletromagnética

e três da fraca. No entanto, embora o problema das massas houvesse sido contornado, as correntes neutras ainda não tinham sido observadas e a renormalização da teoria não havia sido feita por nenhum dos seus propositores.

Os estudos da interação fraca, na época, eram feitos em processos de decaimento de partículas estranhas, os quais se sabia serem causados exclusivamente pelas interações fracas. No entanto, como foi esclarecido em 1970, as correntes neutras não agem nesses processos e por isso os resultados iniciais dessas pesquisas foram frustrantes. Desse modo, a busca experimental só se intensificou após a renormalização da Teoria Eletrofraca.

A renormalização é um processo da Teoria Quântica de Campos que consiste em eliminar os termos infinitos de uma teoria que aparecem no cálculo de quantidades físicas, como carga e massa. A contribuição da renormalização foi vital para a Teoria Eletrofraca, colocando-a em uma base matemática extremamente sólida. Além disso, somente depois de se verificar que a teoria era renormalizável é que o interesse da comunidade de físicos teóricos e experimentais por ela aumentou. A relevância da renormalização não consistia somente na eliminação dos infinitos, mas também no potencial que a teoria passava a ter de descrever as interações envolvidas em energias superiores a 300 GeV.

Como o decaimento de partículas estranhas não era o caminho para detectar as correntes neutras, uma das maneiras de investigar a interação fraca, sugerida em 1959, foi disparar feixes de neutrinos em um alvo fixo e observar o que acontecia. Porque os neutrinos experimentam somente a ação da interação fraca, essas experiências prometiam revelar propriedades dessa interação de maneira muito mais clara do que as experiências utilizando decaimentos, uma vez que estes também sofriam efeitos das interações fortes e eletromagnéticas. Entretanto, também era claro que os experimentos exigiam feixes intensos de neutrinos e detectores muito grandes para que pudesse ser observado qualquer efeito, dado que a interação do neutrino com a matéria era de difícil detecção.

Apesar dessa evidente dificuldade, os experimentos com neutrinos começaram no início da década de 1960, nos dois principais laboratórios de Física de Partículas da época, o Laboratório Nacional de Brookhaven, nos Estados Unidos, e o CERN, localizado na fronteira entre a França e a Suíça.

Nesse período, enquanto os primeiros experimentos com neutrinos eram feitos, um grupo de físicos franceses, liderado por Lagarrigue, estava construindo uma enorme câmara de bolhas, chamada Gargamelle. Essa câmara era basicamente um tanque cheio de um líquido superaquecido e mantido sob pressão para evitar a fervura. Quando um feixe de neutrinos, por exemplo, era disparado no tanque, a pressão era liberada e pequenas bolhas se formavam ao longo de trilhas de partículas carregadas, que em algum momento começavam a se mover no interior do tanque. Essas trilhas eram fotografadas e podiam ser analisadas posteriormente. O motivo para a construção de uma câmara grande era aumentar a taxa de interação do neutrino com o líquido que preenchia seu interior. Além disso, a Gargamelle foi projetada para ser preenchida com um líquido muito denso, o que também aumentava a taxa de interação.

A ideia de construir a Gargamelle surgiu na Conferência de Siena em 1963, logo após a apresentação dos primeiros resultados do experimento com neutrinos no CERN utilizando a câmara Nuclear Physics Apparatus (NPA). A primeira proposta desse detector foi apresentada em fevereiro de 1964, por Lagarrigue, Musset e Rousset, e a decisão de iniciar o programa foi tomada em dezembro de 1965. A equipe de *design*, construção e execução do projeto era composta por integrantes de diferentes instituições e países. As imagens registradas na Gargamelle eram analisadas por uma colaboração de sete grupos: Aachen, Bruxelas, CERN/TCL, Londres, Milão, Orsay e Paris.

A câmara ficava sob ação de um campo magnético para que fosse possível observar os desvios das partículas carregadas. A fim de evitar ruídos nos resultados, alguns cuidados foram tomados, entre eles a blindagem de radiações externas, que era feita por ímãs, bobinas e escudos.

Outro cuidado foi em relação ao comprimento da câmara, escolhido para que os eventos pudessem ser identificados sem ambiguidade. Sabia-se que o feixe de neutrinos poderia interagir com os materiais ao redor da câmara e gerar um número desconhecido de nêutrons dentro dela. Ao se chocarem com um núcleo, esses nêutrons poderiam ocasionar um chuva de hádrons, suscetível de ser confundido com os eventos de interesse. Nesse aparato, os nêutrons eram absorvidos mais rapidamente e os eventos provocados por eles se produziam na parte inicial da câmara. O comprimento da câmara, portanto, era suficiente para que esses eventos pudessem ser diferenciados.

Convém ressaltar que o foco das pesquisas, na época, não eram as correntes neutras. Somente após 1971 se iniciou a análise de possíveis eventos de corrente neutra (CN), mas não como prioridade, embora os grupos do CERN e de Milão tenham começado a medi-los sistematicamente. Durante maio de 1972, uma coleção de candidatos a eventos de CN foi cuidadosamente examinada no CERN por vários físicos da colaboração e parecia provável que eles existissem. Em julho do mesmo ano, foi recomendado que todos os grupos extraíssem sistematicamente candidatos a eventos de corrente neutra e fizessem fotografias em grande escala para serem analisadas numa reunião em agosto, na cidade de Paris.

Alguns teóricos também influenciaram o interesse pelas correntes neutras. No CERN, um grupo elaborou um seminário, no final de 1971, para os experimentadores da colaboração Gargamelle. Esses teóricos trabalhavam no modelo de unificação das interações fraca e eletromagnética e, para levar adiante os seus argumentos, eles necessitavam da ajuda de seus companheiros experimentais. Assim, enfatizaram a relevância de uma busca ativa pelas correntes neutras. Nos Estados Unidos, o próprio Weinberg convenceu físicos do Fermilab, ou Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL), da necessidade de se procurarem as correntes neutras. Atendendo tal necessidade, a colaboração E1A — composta por grupos das universidades de Harvard,

de Wisconsin e da Pensilvânia, muitas vezes abreviada como colaboração HWPF (GALISON, 1983) — adaptou o experimento HPWF1 para esse novo objetivo.

Alguns físicos da colaboração começaram a olhar para os candidatos de correntes neutras que satisfizessem as características das seguintes reações semileptônicas ou leptônicas:

$$\nu_{\mu} \text{ ou } \bar{\nu}_{\mu} + \text{núcleons} \rightarrow \nu_{\mu} \text{ ou } \bar{\nu}_{\mu} + \text{hádrons}$$

Essa reação representa um neutrino ou antineutrino sendo espalhado por um núcleon e provocando um chuva de hádrons.

Ou:

$$\nu_{\mu} \text{ ou } \bar{\nu}_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} \text{ ou } \bar{\nu}_{\mu} + \text{hádrons}$$

Trata-se agora de um neutrino ou antineutrino sendo espalhado por um elétron, que adquire momento linear.

Esses dois eventos de correntes neutras deveriam ser distinguidos dos eventos de corrente carregada, correspondentes às seguintes reações:

$$\nu_{\mu} \text{ ou } \bar{\nu}_{\mu} + \text{núcleons} \rightarrow \mu^{+} \text{ ou } \mu^{-} + \text{hádrons}$$

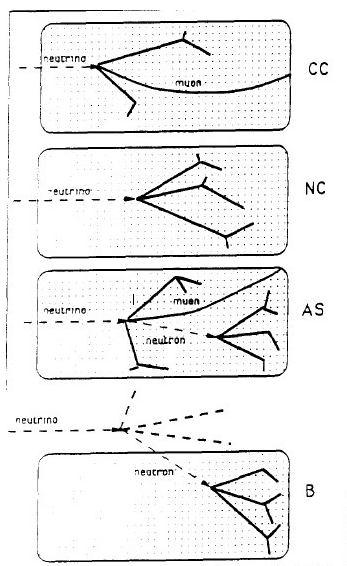
Nesse caso, um neutrino ou antineutrino colide com um núcleon e é transformado em um múon ou antimúon e um chuva de hádrons.

Esses eventos eram contabilizados para que se fizesse uma comparação da taxa de eventos de correntes neutra e de corrente carregada.

Nessa etapa, surgiu outro problema: como resolver os ruídos, eventos que imitariam os eventos de interesse? Estariam presentes para análise os eventos de corrente neutra (CN), os de corrente carregada (CC) e os eventos de ruído ou de *background* (B), que têm efeitos semelhantes aos eventos de corrente neutra e são provocados pelos nêutrons produzidos em torno da Gargamelle ao entrarem na

câmara. Além deles, havia os eventos associados (AS), caracterizados por uma interação de neutrino, visível na câmara, seguida por uma interação neutra, também detectada na câmara. Nesse caso, a partícula neutra que ocasiona o segundo evento seria um hádron secundário, vindo da primeira interação. Os eventos AS podem fornecer informações importantes para a determinação dos efeitos de *background*, cujo cálculo é refinado com um método Monte Carlo¹. Na Figura 1 estão representados os quatro tipos de eventos supracitados, em que os traços representam trajetórias de partículas carregadas.

Figura 1 – Representação dos eventos de CN, CC, AS e B



Fonte: Rousset (1994).

1 Na literatura científica, há outra grande classe de simulações de computador chamada de simulações Monte Carlo (MC). As simulações de MC são algoritmos de computador que usam aleatoriedade para calcular as propriedades de um modelo matemático e em que a aleatoriedade do algoritmo não é uma característica do modelo de destino (WINSBERG, 2015).

Na análise dos processos leptônicos, as interações de interesse para análise dos grupos de pesquisa eram caracterizadas por um único elétron (e), originário do líquido, não acompanhado por fragmentos nucleares, hádrons ou raios gama correlacionados ao vértice. A cinemática das reações é tal que o elétron seria emitido em um ângulo pequeno, θ_e , em relação ao feixe de neutrino; esperava-se que o elétron transportasse um terço da energia do neutrino incidente, equivalente a um pico entre 1 e 2 GeV. Como as interações de neutrinos com o imã e o sistema de blindagem produzem uma radiação de fundo de baixa energia de fótons e elétrons, um limite inferior na energia eletrônica foi estabelecido em 300 MeV. Este corte de energia garantia que todos os elétrons das reações esperadas teriam $\theta_e < 5^\circ$.

Na intenção de excluir os eventos que imitariam as correntes neutras, somente foram analisados aqueles que ocorreram dentro de dimensões de 3,75 m de comprimento por 1 m de diâmetro da câmara, o que representa cerca de 40 % do volume total visível.

Durante o processo de análise, foi tomado cuidado para não se confundirem os eventos de corrente neutra com eventos associados ou eventos de corrente neutra gerados por eventos de corrente carregada. Além disso, os ruídos foram reduzidos ao máximo, para evitar uma medida equivocada. As possíveis fontes de ruído avaliadas foram: raios cósmicos; múons μ^- lentos; partículas que entram com o feixe e interagem com a câmara; nêutrons e káons vindos de fora da câmara, gerados por neutrinos; e káons gerados por efeitos regeneradores na matéria.

Um total de 375 mil imagens de eventos com neutrinos e 360 mil imagens de eventos com antineutrinos foi analisado duas vezes pela colaboração Gargamelle.

Agora é sua vez de realizar esse experimento e analisar fotografias da câmara Gargamelle que você irá construir!

Referências

- 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.
- GALISON, P. How the first neutral-current experiments ended. **Reviews of Modern Physics**, v. 55, n. 2, p. 477-509, Apr. 1983
- Haidt, D. The discovery of neutral currents. **European Physical Journal C**, v. 34, n. 1, p. 25-31, 2004.
- Haidt, D. P. The weak neutral current-discovery and impact. **La Rivista del Nuovo Cimento**, v. 36, n. 8, p. 335-395, 2013.
- HASERT, F. J. *et al.* Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the Gargamelle neutrino experiment. **Nuclear Physics B**, v. 73, n. 1, p. 1-22, 1974.
- HASERT, F. J. *et al.* Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the Gargamelle neutrino experiment. **Physics Letters**, v. 46B, n. 1, p. 138-140, Sept. 1973.
- ROUSSET, A. The discovery of weak neutral currents. **Nuclear Physics B**, v. 36, p. 339-362, 1994.
- WINSBERG, E. Computer simulations in science. **Stanford Encyclopedia of Philosophy**. 2015. Disponível em: <https://plato.stanford.edu/entries/simulations-science/>. Acesso em: 16 jun. 2023.



APÊNDICE D

MATERIAL DE APOIO PARA A REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO 3

Observação dos bósons W e Z^0

Após a detecção das correntes neutras, houve um aumento no interesse dos físicos tanto teóricos quanto experimentais pela Teoria Eletrofraca.

Foi levantada a hipótese de possível violação da paridade em átomos, pois, quando ocorre a troca de fótons por meio da interação eletromagnética, a paridade é conservada, ou seja, os elétrons espalhados aparecem em uma razão 50:50, tanto para a direita quanto para a esquerda, no entanto, com a troca de Z^0 , esse equilíbrio fica perturbado, já que as interações fracas violam a paridade.

Esse efeito foi observado em alguns experimentos, entre os quais um de dispersão de elétron-núcleon no Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) em 1978 (PRESCOTT *et al.*, 1978), no qual se demonstrou, de maneira convincente, que as interações eletromagnética e fraca agiam juntas no processo de dispersão inelástica de elétrons polarizados. Depois disso, a maioria dos físicos tomou como certa a Teoria Eletrofraca.

Além disso, obteve-se uma medida mais precisa do ângulo de mistura eletrofraco, o que melhorou as previsões de massa das partículas mediadoras da interação fraca (PRESCOTT, 1997).

Dadas as previsões teóricas de massas, os laboratórios de Física de Partículas existentes na época não possuíam aceleradores com energia suficiente para realizar experimentos que possibilitassem a observação dessas partículas.

Na época, os maiores aceleradores de partículas eram máquinas em que um único feixe de prótons era elevado a alta energia e, em seguida, direcionado para um alvo fixo. Nesse tipo de experimento, apenas uma pequena fração da energia do feixe é disponibilizado para a criação de novas partículas. Assim, para gerar partículas com massas, na ordem das massas dos bósons W e Z^0 , a única chance parecia ser utilizar uma máquina de colisão de feixes em que as partículas aceleradas colidissem de frente, transformando essencialmente toda a sua energia em novas partículas.

Nesse sentido, uma das alternativas era promover colisões de elétrons e pósitrons, em um acelerador circular. A vantagem de empregar elétrons e pósitrons é que um único anel de ímãs e cavidades de radiofrequência pode, simultaneamente, acelerá-los em direções opostas. Por outro lado, pelo fato de serem muito leves, essas partículas rapidamente dissipam sua energia quando obrigadas a circular em no anel, uma vez que, quando uma partícula carregada é desviada, ela emite um fóton para conservar o momento. Em um acelerador circular, a partícula é continuamente desviada por campos magnéticos, de modo que o elétron estaria continuamente emitindo fótons e perdendo energia. Trocar elétrons por prótons atenua essa perda de energia, pois prótons são mais pesados e permitem que aceleradores com energias mais altas operem com menor consumo de energia.

Dessa maneira, não parecia eficiente construir uma máquina de elétron-pósitron grande o suficiente para alcançar a energia dos bósons vetoriais intermediários. O plano foi, em vez disso, construir anéis de armazenamento nos quais os prótons colidiriam de

frente com antiprótons. Dois anéis entrelaçados seriam necessários para organizar essas colisões.

Em 1976, David Cline, da Universidade de Wisconsin, Carlo Rubbia e Peter McIntyre, da Universidade de Harvard, sugeriram uma alternativa para a detecção dos bósons. Eles propuseram que, em vez de construir uma máquina de colisão do feixe inteiramente nova, seria viável e muito mais barato converter um acelerador de próton com alvo fixo, existente, numa máquina de colisão. Tal opção não exigia um novo acelerador e poderia, se bem-sucedida, produzir resultados dentro de cinco anos. A proposta envolveu o aprimoramento de um síncrotron de prótons de alta energia para acelerar simultaneamente um feixe de antiprótons e um feixe de prótons no anel de aceleração, que posteriormente seriam levados a colidir de frente.

Como o maior síncrotron disponível tinha uma energia máxima de várias centenas de GeV, ele já proporcionava uma energia de colisão grande o suficiente para evidenciar a existência ou não dos bósons W e Z^0 . No entanto, também existiam desvantagens em comparação com o uso de colisões elétron-pósitron.

Cada próton é composto por três quarks, glúons e pares quark-antiquark, ao passo que cada antipróton contém três antiquarks juntamente com glúons e pares quark-antiquark. Assim, quando um próton colide com um antipróton ocorre uma interação complicada entre várias partículas diferentes. Isso implica um estudo teórico e experimental que possibilite a distinção entre os produtos da colisão. Além disso, a proposta só funcionaria se um feixe de antiprótons altamente compacto com um impulso precisamente definido fosse produzido.

Ao contrário dos prótons, os antiprótons não estão prontamente disponíveis a partir de qualquer fonte natural, eles devem ser criados em colisões de alta energia. Para isso, um feixe de prótons de alta energia é dirigido a um alvo de metal. Nessa colisão os antiprótons são gerados e precisam ser dirigidos, magneticamente, para um anel de armazenamento projetado de uma certa forma específica. O

processo é extremamente ineficiente; em média, um antipróton de baixa energia é produzido para cada milhão ou mais de prótons de alta energia que atingem o alvo.

Criar antipartículas suficientes não era o único problema. Os antiprótons emergem a partir do alvo com velocidades e direções variadas. Se a temperatura for demasiadamente elevada, algumas das partículas vão atacar as paredes do acelerador e o feixe será dissipado. Portanto, é necessário um método para “esfriar” o feixe de antipróton, isto é, para reduzir os seus movimentos aleatórios, de modo a mantê-lo tão concentrado quanto possível antes da sua entrada no anel acelerador.

A saída foi utilizar outro método de resfriamento mais adequado para as necessidades da máquina de prótons e antiprótons do CERN. Esse processo foi inventado em 1968 por Van der Meer: o arrefecimento estocástico. Nesse método, os antiprótons são armazenados em um depósito circular, em pacotes isolados. Os antiprótons que entram no acumulador circulam por uma pista mais externa e sensores eletrônicos medem o desvio médio das partículas da órbita ideal, essas medidas são convertidas em um sinal de correção que é transmitido para outro dispositivo, onde um campo elétrico é aplicado para empurrar o centro de massa das partículas de volta para dentro da órbita ideal. Assim que esse feixe está suficientemente resfriado, ele é encaminhado para uma pista mais interna do acumulador, enquanto outro feixe de antiprótons desordenados assume a pista externa. Dessa maneira, são acumulados vários pacotes de antiprótons, até que se tenha um feixe denso o bastante para a realização das colisões.

Todo o complexo experimento que foi projetado para a detecção dos bósons tinha início com um cilindro de hidrogênio, que fornecia os átomos, cujos prótons eram utilizados na experiência. Esse cilindro ficava em uma das pontas de um acelerador linear, o linac. Nele os prótons eram injetados e acelerados, até obterem uma energia de 50 MeV, antes de serem direcionados para os aceleradores circulares. Em seguida, esses prótons eram direcionados para um síncrotron

impulsionador, o booster, composto por quatro anéis que recebiam o feixe de prótons do linac, os aceleravam até 800 MeV e então os direcionavam para o Proton Synchrotron (PS).

No acelerador PS, os prótons eram novamente acelerados até obterem uma energia de 26 GeV e depois direcionados para colidirem com um alvo fixo de metal, produzindo um jato de partículas, incluindo um pequeno número de antiprótons com uma energia de 3,5 GeV.

Esses antiprótons eram recolhidos e transferidos para um anel de armazenamento circular, chamado acumulador de antipróton, onde eram, em primeiro lugar, pré-resfriados pelo método estocástico e, em seguida, transferidos para uma órbita ligeiramente menor, na qual eram empilhados com os grupos previamente injetados e submetidos a mais resfriamento. Depois de algumas centenas de bilhões de antiprótons serem recolhidos, eles eram enviados de volta ao anel PS e acelerados a 26 GeV, antes de serem injetados no Super Proton Synchrotron (SPS).

Enquanto isso, prótons de 26 GeV do anel PS eram injetados no anel SPS para serem acelerados até obterem uma energia de 270 GeV. Os antiprótons, acelerados no PS, também eram enviados para o SPS, porém injetados de forma a se moverem na direção oposta de circulação dos prótons. Quando os dois feixes obtinham a energia adequada para a colisão, eles eram direcionados para colidirem no interior de dois detectores, o UA1 e o UA2.

Depois de os prótons e antiprótons passarem por todo esse processo, eles estavam prontos para a colisão. Nesse ponto, entrava uma questão: como detectar a presença dos bósons vetoriais produzidos em tais colisões?

Uma partícula com curto tempo de vida pode ser detectada indiretamente pelos produtos de seu decaimento. Os bósons W e Z^0 decaem pela interação fraca, então se espera que o decaimento ocorra. Porém, a grande massa dos bósons dificulta sua produção, isso significa que eles decaem muito mais rápido do que partículas mais leves. No decaimento de um W ou Z^0 , há uma enorme liberação de energia

e, nessas colisões de alta energia, frequentemente são produzidas mais de cem partículas diferentes (WATKINS, 1986). Como selecionar então os produtos de decaimento dos bósons W e Z^0 ?

Quanto ao produto dos decaimentos, como Z^0 é neutro, espera-se que ele decaia em um par lépton-antilépton, ou seja, dois léptons com cargas opostas, por exemplo um elétron e um antielétron ($Z^0 \rightarrow e^- + e^+$), um múon e um antimúon ($Z^0 \rightarrow \mu^- + \mu^+$). Como tanto o elétron quanto o múon têm massas bem menores do que o Z^0 , a previsão é de que os decaimentos produzam partículas com alta energia, pois toda a energia de repouso do Z^0 é transmitida para elas.

O decaimento de Z^0 em um par elétron-pósitron ou múon-antimúon representa apenas 6 % das possibilidades totais de decaimento dessa partícula. No entanto, esses modos de decaimento são os mais úteis na busca por sua existência em colisões próton-antipróton (WATKINS, 1986).

Já os W^+ e W^- com carga elétrica +1 ou -1 devem decair em um lépton ou antilépton, que possuem carga elétrica, e neutrinos ou antineutrinos, que não possuem carga elétrica. Por exemplo, o W^- pode decair em um elétron e um antineutrino do elétron, um múon e um antineutrino do múon. Já o W^+ pode decair, por exemplo, em um antielétron e o neutrino do elétron, antimúon e o neutrino do múon, etc. Como o neutrino não pode ser detectado nas colisões, a identificação desses decaimentos é feita pela conservação do momento das partículas resultantes da colisão. Os decaimentos em lépton ou antilépton acompanhados de neutrinos ou antineutrinos representam aproximadamente 8 % das possibilidades de decaimento dos bósons W , no entanto, assim como no caso do decaimento do Z^0 , são os mais úteis na busca.

Os cálculos realizados para estimar a produção das partículas mediadoras W^+ , W^- e Z^0 , em colisões de prótons e antiprótons a 540 GeV, fizeram uma estimativa de um decaimento de W a cada 10 milhões de colisões. No caso do Z^0 , essa previsão era de uma taxa de decaimento dez vezes menor. Assim, seriam necessários meses de

trabalho contínuo nos aceleradores e detectores para que se conseguisse detectar alguns desses eventos.

Como o acelerador era subterrâneo, cada detector no colisor teve que ser instalado em uma área subterrânea. Desde o início, tudo foi acompanhado por grupos de pesquisa de muitos países diferentes, que formaram duas colaborações. Uma delas era a colaboração da Área Subterrânea 1 (UA1), formada para projetar e construir o detector que identificaria e registraria colisões energéticas próton-anti-próton na busca dos bósons W e Z^0 .

Como a colisão iria gerar muitas partículas diferentes, seria necessário projetar vários detectores para procurar os produtos da decomposição dos bósons vetoriais. O detector UA1 foi o resultado de um esforço colaborativo de uma equipe de mais de cem físicos de onze instituições na Europa e nos EUA: da Universidade de Aachen, do Laboratório de Física de Partículas Annecy, da Universidade de Birmingham, do CERN, do Queen Mary College (Londres), do Collège de France (Paris), da Universidade da Califórnia (Riverside), da Universidade de Roma, do Laboratório Rutherford, do Centro de Pesquisa Nuclear Saclay e da Universidade de Viena. A máquina tinha dez metros de comprimento por cinco de largura, e sua massa total era de aproximadamente 2 mil toneladas (RUBBIA; VAN DER MEER; CLINE, 1982).

O detector UA1 era um dispositivo polivalente, feito para detectar vários tipos de partículas e para recolher informações de um largo ângulo sólido em torno do ponto onde os feixes se chocavam. Ele media a energia das partículas por vários meios, incluindo a curvatura dos seus caminhos em um campo magnético.

Esse detector era formado por outros detectores, como o detector central, o calorímetro eletromagnético, o calorímetro hadrônico, bobinas de alumínio e detectores de múons, todos especialmente projetados para detectarem partículas específicas e suas propriedades.

Sua vez de realizar esse experimento!!! Encontre os dispositivos adequados e responda à pergunta que inquietou os cientistas: os bósons W e Z^0 existem?

Referências

- ARNISON, G. *et al.* Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at $s = 540$ GeV. **Physics Letters B**, v. 122, n. 1, p. 103-116, 1983.
- PRESCOTT, C. Weak-electromagnetic interference in polarized electron-deuteron scattering. *In*: HODDESON, L. *et al.* (ed.). **The rise of the standard model: a history of particle physics from 1964 to 1979**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 459-477.
- PRESCOTT, C. *et al.* Parity non-conservation in inelastic electron scattering. **Physics Letters B**, v. 77, n. 3, p. 347-352, 1978.
- RUBBIA, C.; VAN DER MEER, S.; CLINE, D. B. The search for intermediate vector bosons. **Scientific American**, v. 246, n. 3, p. 48-59, 1982.
- WATKINS, P. **Story of the W and Z**. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.

APÊNDICE E

TEXTO FINAL

Teoria Eletrofraca: unificação das teorias eletromagnética e fraca

Com o passar do tempo, a Física conseguiu unificar fenômenos que pareciam distintos. Essas unificações derivam da compreensão de que fatos aparentemente diferentes podem ser interpretados como aspectos de um mesmo fenômeno fundamental (SALAM; DIRAC; HEISENBERG, 1991).

A primeira unificação refere-se às leis que determinam os movimentos terrestres e celestes, tendo sido Al-Biruni o primeiro pensador a afirmar que os fenômenos físicos no Sol, na Terra e na Lua obedeciam às mesmas leis, por volta de 990 a.C. (SALAM, 1991). Tal ideia foi reafirmada e demonstrada por Galileu, em 1610. Com a ajuda de um telescópio, ele observou que o aparecimento de sombras na Lua e na Terra seguia o mesmo padrão. Depois, em 1680, Newton estabeleceu que a força gravitacional terrestre, que atrai os objetos para o centro da Terra, e a força gravitacional celeste, que mantém os planetas se movimentando em torno do Sol, são as mesmas.

Cento e cinquenta anos mais tarde, foi a vez da eletricidade e do magnetismo. Em 1820, Faraday e Ampère defenderam que essas duas forças podiam ser unificadas numa única força fundamental, a eletromagnética. As interações eletromagnéticas atuam entre partículas carregadas elétrica e magneticamente, com ação tanto repulsiva

quanto atrativa a depender do sinal das cargas interagentes. Elas possibilitam a ligação de átomos e moléculas para formar matéria e são mediadas por bósons chamados de fótons, responsáveis pela formação dos campos eletromagnéticos. Trata-se de uma interação de longo alcance e relativamente forte, que está presente na explicação de uma gama de dispositivos, que vão desde o *laser* até o rádio. Essa unificação foi o que permitiu inclusive a construção de estações geradoras de eletricidade, já que o eletromagnetismo foi a base da tecnologia de correntes e motores elétricos.

O eletromagnetismo também foi estudado por Maxwell, que sugeriu, cerca de cinquenta anos depois de Faraday, que, se uma carga elétrica fosse acelerada, ela emitiria energia eletromagnética. Ele utilizou um dispositivo experimental para demonstrar que, no vácuo, a velocidade da radiação eletromagnética poderia ser expressa em termos de duas constantes que descreviam as propriedades elétricas e magnéticas. Muitas tecnologias do século XX, como o rádio, a televisão e os raios X, têm essa unificação como base, porém a tese só foi comprovada pelo físico alemão Heinrich Hertz em 1888, dez anos após a morte de Maxwell. Os estudos que Maxwell realizou também forneceram uma evidência indireta da unificação do eletromagnetismo e da óptica.

Outra unificação da Física é a Teoria da Relatividade Restrita, de Albert Einstein. Em 1905, ele relacionou tempo e espaço em uma equação, indicando que, do ponto de vista de um observador em repouso, o tempo passa mais lentamente para um corpo que se desloca próximo à velocidade da luz. Passados dez anos, Einstein geometrizou a Física com a Teoria da Relatividade Geral, relacionando massa e energia ao postular que a curvatura do espaço-tempo gerada nas proximidades de corpos massivos é o que determina a interação gravitacional. A curvatura do espaço já fora um palpite de Gauss, há cerca de cem anos, mas seus experimentos, aplicados a distâncias da ordem de quilômetros, não puderam validar tal hipótese.

Einstein via uma possível ligação também entre as interações eletromagnética e gravitacional, pois, embora suas intensidades,

comparadas a uma mesma distância, sejam diferentes, elas apresentavam uma simetria: obedeciam à Lei do Inverso do Quadrado. Essa relação havia sido considerada anteriormente por Faraday, em 1849, mas nem ele, à época, nem Einstein, no século XX, obtiveram êxito em seus experimentos. Isso levou Dirac e outros cientistas a pensar que a unificação das forças fundamentais não era uma possibilidade viável (SALAM, 1991). Tampouco a hipótese para unificar a gravidade e o eletromagnetismo de Kaluza e Klein, de um espaço-tempo com cinco dimensões, foi aceita por outros pesquisadores daquela época, e os estudos acerca de dimensões adicionais do espaço-tempo foram descontinuados por Kaluza. Atualmente, no entanto, a teoria das supercordas sugere a existência de dez dimensões, de modo a acomodar sob uma única força fundamental todas as outras (SALAM, 1991).

Diferentemente das interações eletromagnéticas e das gravitacionais, as interações fracas e fortes só foram conhecidas no desenrolar do século XX. No entanto, ainda no fim do século XIX, os conhecimentos a respeito da constituição e das propriedades fundamentais da matéria haviam-se expandido com a descoberta da radioatividade (BATISTA, 1999). Criara-se assim um novo campo de estudo na Física, e em 1898, Rutherford já havia distinguido as radiações alfa e beta. Em 1900, estabelecidos pesquisadores sabiam que as partículas beta eram elétrons provenientes de núcleos atômicos instáveis (BATISTA, 1999), porém algo os instigava...

O produto do decaimento beta não apresentava a mesma quantidade de energia do núcleo original. Alguns cientistas cogitaram a ideia da violação do princípio da conservação de energia, outros — entre os quais, o primeiro foi Pauli — defendiam o surgimento de uma nova partícula. Então Enrico Fermi, aderindo à tese de Pauli, elaborou em 1933 uma teoria que previa a produção dessa nova partícula (neutrino) no decaimento beta. Surgiam desse modo as primeiras noções a respeito da interação de Fermi ou interação fraca (BATISTA, 2005). A Teoria de Fermi permaneceu inalterada por mais de vinte

anos, mas seu campo de aplicação foi expandido na década de 1950, quando foi aperfeiçoada por Sudarshan, Marshak, Lee, Yang, Feynman, Gell-Mann, entre outros cientistas contemporâneos.

A interação fraca é mediada pelos bósons vetoriais intermediários W^+ , W^- e Z^0 e age sobre os dois tipos de férmions: léptons e quarks. Ela realiza a transformação de um tipo de quark em outro por meio da emissão de partículas no decaimento radioativo e desempenha um papel decisivo na produção de energia pelo sol. Essa interação é 10^5 vezes menos intensa que a interação eletromagnética e seu alcance é menor que o da interação forte por um fator de 1.000, não passando de 10^{-16} m (SALAM, 1991), porém é a única força que os neutrinos experimentam.

A interação forte, por sua vez, é uma das forças responsáveis pela existência da matéria como se conhece, pois ela mantém os nêutrons e os prótons coesos no núcleo do átomo, evitando que os prótons o destruam por repulsão eletromagnética, o que impossibilitaria a constituição da matéria. Essa interação foi proposta por Hideki Yukawa em 1935, embora não tenha sido formalizada na época. A princípio, Yukawa acreditava que ela poderia explicar todas as interações nucleares, porém, mais tarde, os estudos de Bethe (1940) e Bethe e Nordheim (1940) provaram inválida essa hipótese (BATISTA, 1999).

A Teoria Eletrofraca unifica as interações eletromagnética e fraca, descrevendo a mistura dos dois campos por meio da estrutura matemática do grupo de gauge $SU(2) \times U(1)$. Ela foi desenvolvida em razão de um problema que estava sendo investigado, o problema theta-tau (θ - τ). Theta e tau são duas partículas com tempos de vida e massas iguais, logo se acreditava tratar-se de uma mesma partícula. Porém, o produto do decaimento dessas partículas era diferente, θ decaía em dois píons, o que lhe conferia uma paridade positiva, e τ decaía em três píons, o que lhe conferia uma paridade negativa. O problema em questão era que esse tipo de fenômeno não era explicado pela Teoria de Fermi.

As discussões a respeito do problema θ - τ continuaram até que, em 1956, uma dupla de físicos teóricos, Lee e Yang, propuseram que a paridade não se conservava nas interações fracas, pois, estudando intensivamente, principalmente os casos de decaimento beta, perceberam que a conservação da paridade em isótopos radioativos era uma hipótese extrapolada das interações forte e eletromagnética, porém não havia nenhuma evidência empírica que o mesmo ocorria nas interações fracas (LEE; YANG, 1956). Assim, o problema das partículas θ e τ estaria resolvido.

Em Física, o conceito de paridade está relacionado ao conceito de simetria. Na Física Quântica, mais especificamente na Física de Partículas, a paridade é 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, gera-se uma nova função $\psi'(-x, -y, -z)$. Quando não ocorre mudança de sinal na função ψ' , 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 dita negativa (FRANKLIN, 1986, 1990).

Para decidir inequivocamente a respeito da conservação ou não da paridade nas interações fracas, foi necessário realizar alguns testes. O primeiro teste experimental que evidenciou a quebra da conservação da paridade foi desenvolvido pela física Chien-Shiung Wu e sua equipe no National Bureau of Standards (NBS).

Após uma conversa com Lee acerca dos avanços nos experimentos relacionados ao decaimento beta e à conservação da paridade, Wu começou a investigar o assunto. O que se sabia na época era que o decaimento beta era um processo no qual um núcleo instável decaía em um núcleo estável pela transformação de um nêutron em um próton com a emissão de um elétron e seu antineutrino ou pela transformação de um próton em um nêutron com a emissão de um pósitron e um neutrino.

Wu levou em conta o fato de que todos os prótons do núcleo têm momentos magnéticos, o que significa que eles podem atuar

como um conjunto de minúsculos ímãs. Assim, se forem colocados em um campo magnético, os núcleos podem alinhar-se, da mesma maneira que um conjunto de ímãs faria. De tal modo, a ideia do experimento era observar o número de partículas emitidas ao alinhar os spins nucleares em duas direções, para cima e para baixo. Uma delas corresponderia à imagem real, e a outra corresponderia à imagem espelhada. Se a paridade fosse conservada, então as partículas emitidas deveriam surgir em iguais quantidades tanto para cima quanto para baixo (LEE; YANG, 1956).

O processo de decaimento estudado foi ${}_{27}^{60}\text{Co} \rightarrow {}_{28}^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e + 2\gamma$, em que um dos nêutrons do núcleo do cobalto decai para um próton por emissão de um elétron e seu antineutrino, transformando-se em um núcleo de níquel, que por sua vez decai para seu estado fundamental com a emissão de dois raios gama (2γ , fótons).

Como Wu pretendia alinhar 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 e, por isso, envolveu outros cientistas na investigação (WU, 1957).

Os resultados que então obtiveram indicavam evidências da violação da paridade nas interações fracas, pois o número de emissões de elétrons era maior em uma direção específica do que nas demais. Tratava-se afinal de uma mesma partícula que decaía de maneira diferente, o que demonstrava a violação da paridade nas interações fracas. O experimento também motivou a reformulação da Teoria de Fermi, já que ela não explicava a violação da paridade.

Entre as reformulações, surgiram uma teoria para descrever o comportamento dos neutrinos, o conceito de helicidade, e a nova forma da teoria que explicava as interações fracas, a teoria V-A. Essa nova forma da interação fraca levou alguns físicos a levantarem hipóteses de

relação entre as interações eletromagnética e fraca, devido à compatibilidade da forma vetorial de ambas (CREASE; MANN, 1996).

Essas reformulações da interação fraca levaram em consideração a teoria de gauge, uma classe da Teoria Quântica de Campos que envolve a mecânica quântica e a relatividade especial, usada para descrever partículas atômicas e seus campos. Nessa teoria, há um grupo de transformações, as transformações de gauge, que não alteram as características físicas básicas do campo quântico. E essa invariância de gauge dá para a teoria uma simetria que rege suas equações.

A estrutura dos grupos de transformações de gauge é descrita pela matemática, o que implica restrições gerais a respeito do modo como o campo descrito por essa teoria interage com outros campos e partículas elementares. A maneira de representação desses grupos advém da Teoria de Grupos, na qual $U(n)$ representa um grupo unitário cujo número de geradores é dado por n^2 , $SU(n)$ representa um grupo unitário especial, com número de geradores $n^2 - 1$.

Assim, cada grupo de gauge possui seu campo de gauge e seus geradores. Por exemplo: $U(1)$ é o grupo de gauge do eletromagnetismo cujo campo tem um gerador ($n^2 = 1^2 = 1$), o fóton; $SU(2)$ é o grupo de gauge da interação fraca cujo campo tem três geradores ($n^2 - 1 = 2^2 - 1 = 3$), os W^+ , W^- e Z^0 ; $SU(3)$ é o grupo de gauge da interação forte com oito geradores ($n^2 - 1 = 3^2 - 1 = 8$), que são os glúons. Dessa forma, $SU(2) \times U(1)$ é o grupo de gauge da interação eletrofraca, com quatro geradores, um da interação eletromagnética e três da interação fraca (BASSALO; CATTANI, 2011).

Os geradores, conhecidos também como bósons mediadores da interação fraca, foram previstos já em 1938, por Klein; ele os chamou de B^\pm . Também foram previstos por Schwinger em 1957, que levantou a hipótese de unificação das interações eletromagnética e fraca, na qual os mediadores seriam dois da interação fraca e o fóton da interação eletromagnética (GLASHOW, 1980).

Em 1958, as reformulações da teoria das interações fracas incluíam os trabalhos de Marshak, Sudarshan, Sakurai e Feynman

e Gell-Mann. Foi no trabalho de Feynman e Gell-Mann que surgiu a hipótese dos bósons mediadores da interação fraca, com spin 1. Seriam bósons carregados e massivos, pois, na época, sabia-se que, nos decaimentos, havia mudança de carga elétrica, ou seja, correntes carregadas (FEYNMAN; GELL-MANN, 1958).

O físico José Leite Lopes, inspirado no trabalho de Feynman e Gell-Mann, publicou em 1958 um trabalho no qual também propôs a unificação das interações fraca e eletromagnética. Nesse trabalho ele fez a primeira estimativa de massa dos bósons carregados e apresentou a hipótese de um bóson neutro (correntes neutras). Era a primeira vez que aparecia a hipótese do bóson neutro, hoje conhecido como Z^0 (LEITE LOPES, 1958).

Os processos de decaimento conhecidos até então provocavam mudança de carga elétrica, por isso se dizia que o processo era causado por correntes carregadas. A hipótese de um bóson neutro, no entanto, implicava a existência de correntes neutras, ou seja, processos em que não havia mudança de carga elétrica, apenas transferência de momento. Por exemplo, se um neutrino é espalhado por um elétron, ambos apresentam mudanças no momento linear.

Nessa mesma época, havia trabalhos semelhantes ao de Leite Lopes, como os de Bludman, Feinberg, Schwinger, Salam e Ward e Glashow. Em 1960, Lee e Yang também publicaram um trabalho no qual pela primeira vez apareciam os símbolos W^- e W^+ para definir os bósons carregados. Todos abordavam cautelosamente a relação entre as interações fraca e eletromagnética e/ou a hipótese das correntes neutras (BASSALO, 1994; BATISTA, 1999).

Depois da proposta da teoria de gauge, Yang e Mills, em 1954, elaboraram uma teoria de gauge não abeliana, na qual as transformações dependem da ordem em que são realizadas, com o propósito de que se tornasse uma teoria das interações fortes. Em alguns casos, essa teoria é chamada de teoria de Yang-Mills-Shaw, pois um trabalho parecido foi desenvolvido por Ronald Shaw, aluno de Abdus Salam (SALAM, 1980).

Contudo, a massa das partículas mediadoras era um problema para a aplicação da teoria de Yang-Mills-Shaw às interações fracas, pois a invariância de gauge, ou simetria de gauge, implicava a geração de bósons sem massa, enquanto os bósons mediadores da interação fraca eram massivos. Na tentativa de colocar a massa manualmente na teoria, a lógica da teoria de gauge era destruída, perdia-se poder preditivo e a teoria se tornava não renormalizável (WEINBERG, 2004).

Em 1960, a teoria voltou a ser estudada por Yoichiro Nambu, que percebeu nela a quebra espontânea de simetria. Nambu e Jona-Lasinio e Goldstone mostraram em seus trabalhos que a quebra espontânea de simetria era acompanhada de uma ou mais partículas sem massa, as quais receberam o nome de bósons de Nambu-Goldstone. Até então, não havia nenhuma possibilidade de usar essas teorias para descrever as interações fracas (WEINBERG, 1980, 2004).

Em 1961, Glashow, inspirado por Schwinger, elaborou uma teoria unificando as interações fraca e eletromagnética, utilizando como base a teoria de Yang-Mills-Shaw. Na primeira tentativa, continuou com a hipótese de três bósons mediadores, dois da interação fraca e um da interação eletromagnética. Mas falhou!

Na segunda tentativa, considerou a existência do bóson neutro com a estrutura $SU(2) \times U(1)$, porém o problema das massas persistia. Como a teoria de Yang-Mills-Shaw implicava bósons vetoriais sem massa, e as predições teóricas da interação fraca implicavam bósons massivos, Glashow tentou colocar o termo das massas “a mão”, mas tampouco obteve sucesso (BROWN *et al.*, 1997; CREASE; MANN, 1996).

Glashow não conseguiu unificar as interações, mas observou que, quando elas agiam juntas, a contribuição de cada uma para a interação total expressava uma razão. Ele então propôs um ângulo de mistura dessas interações, hoje conhecido como ângulo de Weinberg, já que este o reinventou sete anos após o lançamento do trabalho de Glashow, ao qual ninguém tinha prestado muita atenção. A mistura dos campos de gauge é realmente a essência da unificação, e

o ângulo de Weinberg, que a representa, concebe a combinação das constantes de acoplamento para processos fraco e eletromagnético (MORRISON, 2000).

Weinberg conversava com Salam e Goldstone, em 1962, a respeito da quebra espontânea de simetria. Na ocasião, Weinberg e Salam tentaram encontrar alguma falha na ideia de Nambu e Goldstone, porém não conseguiram. Goldstone também falou com Glashow, que não conseguiu relacionar a quebra espontânea de simetria com sua tentativa de unificação em 1960. Lembrando que ambas implicavam bósons sem massa (BASSALO, 1994).

Em 1964, independentemente, os físicos Higgs, Englert e Brout, Guralnik e Hagen e Kibble encontraram um mecanismo que tornava massivos os bósons de Nambu-Goldstone, partindo da hipótese de que a quebra de simetria deveria ser local e não global. Esse mecanismo ficou conhecido como mecanismo de Higgs. Os bósons sem massa da teoria de Yang-Mills-Shaw e os bósons de Nambu-Goldstone se combinariam para formar as partículas massivas e, no fim, ainda sobrava uma partícula, conhecida como bóson de Higgs (WEINBERG, 1980, 2004).

Após tomar conhecimento do mecanismo de Higgs, de 1965 a 1967, Weinberg tentou usar a teoria de Yang-Mills-Shaw para desenvolver uma teoria das interações fortes. Porém não funcionou: a teoria não era renormalizável. Então, ele percebeu que estava usando uma teoria certa na interação errada e aplicou a teoria para descrever as interações fraca e eletromagnética. Depois de testar outras estruturas, chegou à estrutura $SU(2) \times U(1)$, mas, mesmo assim, não conseguiu mostrar que era uma teoria renormalizável, além de ela incluir apenas os léptons (WEINBERG, 1980, 2004).

Salam e Ward, além de um trabalho de 1959, publicaram na mesma temática em 1961 e 1964 e propuseram novamente a estrutura de grupo $SU(2) \times U(1)$. Tampouco eles conseguiram resolver o problema das massas e da renormalização. Somente em 1968, após entender a quebra espontânea de simetria pelo mecanismo de Higgs, Salam

foi capaz de completar seu formalismo. Tentou ainda, sem sucesso, superar Weinberg, estendendo o modelo para mésons e bárions para incluir os quarks (SALAM, 1980, 1991; WEINBERG, 1980, 2004).

Embora Glashow, Weinberg e Salam tenham chegado à estrutura $SU(2) \times U(1)$, Glashow não havia resolvido o problema com as massas, enquanto Weinberg e Salam não conseguiram incluir os quarks, explicar a ausência das correntes neutras e mostrar que a teoria era renormalizável. Tal cenário só começou a mudar em 1970.

Infelizmente, os cientistas da época estavam apostando todas as suas fichas em caminhos errados. Para buscar as correntes neutras das interações fracas, os experimentalistas estudavam reações com partículas estranhas, pois o decaimento delas era regido exclusivamente pelas interações fracas — o que faz sentido!

Porém, reações com partículas estranhas constituíam o único caso em que as correntes neutras não se manifestavam! Isso só foi percebido em 1970, por Glashow, Iliopoulos e Maiani. Sua hipótese expandia a Teoria Eletrofraca para incluir os quarks e sugeria a existência de um quarto quark, o charm, que explicava a não observação das correntes neutras nos processos envolvendo partículas estranhas. Essa nova consideração possibilitou a inclusão do estudo das interações forte, fraca e eletromagnética no que hoje é conhecido como Modelo Padrão das partículas elementares e influenciou a investigação teórica e experimental (FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007). No entanto, como ainda não se havia conseguido mostrar que a teoria era renormalizável, o interesse de físicos teóricos e experimentais era limitado.

A renormalização da Teoria Eletrofraca, de acordo com 't Hooft, que foi quem a realizou, consiste em eliminar os termos infinitos de uma teoria, ao tratar da Teoria Quântica de Campos. Essa técnica elimina os infinitos que aparecem no cálculo de quantidades físicas, como carga e massa ('T HOOFT, 1997).

Já em 1962, Veltman começou a estudar a probabilidade de renormalização da teoria de Yang-Mills-Shaw. Ele chegou a elaborar um

programa computacional para ajudar no processo, mas não obteve sucesso. Em 1969, quando 't Hooft tornou-se aluno de doutorado de Veltman, este lhe deu o desafio da renormalização da Teoria Eletrofraca. 'T Hooft começou a estudar possibilidades e tentou primeiro renormalizar a teoria com bósons sem massa, como previsto na teoria de Yang-Mills-Shaw. Depois de obter êxito com os bósons sem massa, ele tentou renormalizar a teoria com os bósons massivos, adquirindo massa pelo mecanismo de Higgs na quebra espontânea de simetria. Em 1971, saiu a primeira publicação de que a teoria era renormalizável. Em 1972, com aprimorações, a renormalização foi confirmada por ele e outros pesquisadores (WEINBERG, 2004).

A contribuição de 't Hooft e Veltman foi vital para a Teoria Eletrofraca, colocando-a em uma base matemática extremamente sólida. A superioridade teórica do modelo eletrofraco em relação à teoria V-A tornou-se óbvia, não pelo seu poder unificador, mas porque era, ao contrário de V-A, renormalizável. Além disso, depois de provar-se que a teoria era renormalizável, o interesse da comunidade de físicos teóricos e experimentais por ela aumentou. A relevância da renormalização não consistia somente na eliminação dos infinitos, mas a teoria passava a ter um potencial de descrever as interações envolvidas em energias superiores a 300 GeV (MORRISON, 2000).

Com a renormalização da teoria e a explicação da ausência de correntes neutras nos processos até então estudados, surgiu o interesse experimental na detecção dos bósons mediadores. A busca pelas correntes neutras era um objetivo secundário, não era o foco das investigações experimentais. Entretanto, o avanço nas atividades experimentais com neutrinos de alta energia influenciou o desenvolvimento experimental para a detecção das correntes neutras (FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007).

Os experimentos que procuravam a observação de eventos de corrente neutra foram realizados por duas colaborações experimentais, a colaboração Gargamelle no CERN e a colaboração E1A no Fermilab (GALISON, 1983).

Neutrinos agem exclusivamente por meio da interação fraca, portanto são um caminho para investigá-la. Por outro lado, o neutrino interage muito pouco com a matéria, assim seriam necessários feixes intensos e detectores enormes para realizar detecções.

Experimentos com neutrinos estavam sendo realizados em dois laboratórios de Física de Partículas, o Laboratório Nacional de Brookhaven, nos Estados Unidos, e o CERN, localizado na fronteira entre a França e a Suíça. Paralelamente aos experimentos com neutrinos, um grupo de pesquisadores franceses, liderado por Lagarrigue, estava construindo uma enorme câmara de bolhas para trabalhar com experimentos de neutrinos (GALISON, 1983).

A Gargamelle era um tanque cheio de um líquido superaquecido, mantido sob pressão. Quando um feixe de neutrinos entrava na câmara, a pressão era liberada e pequenas bolhas começavam a se formar ao longo de trilhas de partículas carregadas. Esses caminhos de bolhas eram registrados em fotografias que podiam ser analisadas posteriormente.

A câmara de bolhas tinha que apresentar algumas características para a realização do experimento: ser preenchida com um líquido suficientemente denso para promover o maior número de interações possíveis; ter um tamanho suficientemente grande para que os eventos pudessem ser identificados com uma precisão maior; estar sob a ação de um campo magnético para que fosse possível observar a curvatura da partículas carregadas no interior da câmara; dispor de blindagem, feita com alguns escudos, ímãs e bobinas, para que radiação externa interferisse o mínimo possível nas interações dentro da câmara; e ter feixes de neutrino e antineutrinos para se chocarem com o líquido dentro dela (PICKERING, 1984).

Os cientistas procuravam eventos de corrente neutra no experimento observando casos em que um elétron começava a se movimentar na câmara, supostamente devido à ação de um neutrino. Pelas previsões teóricas, esse elétron deveria aparecer desacompanhado de fragmentos nucleares em seu vértice. Pela cinemática da reação, ele

deveria ser emitido em um ângulo menor que cinco graus em relação ao feixe de neutrinos e antineutrinos e, além disso, carregar aproximadamente um terço da energia do feixe incidente, o que equivaleria a uma energia em torno de 300 MeV (HASERT *et al.*, 1973, 1974).

Ao final, a equipe da colaboração Gargamelle encontrou 102 eventos de corrente neutra (CN) com neutrinos e 64 com antineutrinos. Em relação às correntes carregadas (CC), foram encontrados 428 eventos com neutrinos e 148 com antineutrinos. Esses dados foram apresentados ao CERN em junho de 1973 e enviados para publicação por 51 colaboradores (HAIDT, 2004; ROUSSET, 1994). Somente depois da publicação desses resultados é que se percebeu que já havia indícios das correntes neutras em experimentos realizados anteriormente.

Essa foi a primeira evidência empírica da Teoria Eletrofraca, ela detectou a presença das correntes neutras e permitiu que as práticas experimentais das equipes Gargamelle e da equipe E1A fossem incorporadas em pesquisas futuras com neutrinos. A detecção das correntes neutras coroou o programa de pesquisa do CERN, desencadeou uma série de atividades experimentais e teóricas a respeito da Teoria Eletrofraca, permitiu uma previsão mais precisa do valor da massa dos bósons mediadores, por meio das primeiras medidas experimentais do ângulo de mistura eletrofraco θ_w , e abriu caminho para investigações a respeito das interações fracas provocadas pelo Z^0 (HAIDT, 2004, 2013).

Depois da identificação das correntes neutras, levantou-se a hipótese da violação da paridade em átomos, pois, quando ocorre a troca de fótons por meio da interação eletromagnética, a paridade é conservada, ou seja, os elétrons espalhados aparecem em uma razão 50:50 tanto para a direita quanto para a esquerda. No entanto, com a troca de Z^0 , esse equilíbrio poderia ficar perturbado, já que as interações fracas violam a paridade.

Esse efeito foi observado por alguns experimentos, entre eles um experimento de dispersão de elétron-núcleon no Centro de

Aceleração Linear de Stanford (SLAC), em 1978. Esse experimento demonstrou, de maneira convincente, que as interações eletromagnética e fraca agiam juntas. Isso ajudou a provar que a Teoria Eletrofraca estava correta, além de fornecer uma medida mais precisa do ângulo de mistura eletrofraco θ_w e aperfeiçoar as previsões de massa dos bósons mediadores (PRESCOTT, 1997).

Faltava então encontrar evidências diretas dos bósons mediadores da interação fraca, os bósons W e Z . Porém, os laboratórios da época não podiam gerar colisões com energias suficientemente altas para gerar os bósons mediadores. Assim, em 1976, David Cline, Carlo Rubbia e Peter M. McIntyre sugeriram uma alternativa para a detecção dos bósons W e Z . Em vez de construir uma máquina nova, eles propuseram converter um acelerador de prótons em uma máquina de colisão (RUBBIA; VAN DER MEER; CLINE, 1982; WATKINS, 1986).

Um síncrotron de prótons foi aprimorado para que pudesse acelerar, simultaneamente, feixes de prótons e antiprótons. Embora alguns peritos dos experimentos do síncrotron de prótons tivessem receio de realizar essa transformação, foram convencidos pelos embasamentos teórico e conceitual apresentados por Carlo Rubbia (DARRIULAT, 2004).

Composto por uma equipe de pesquisadores, engenheiros e outros profissionais em uma escala nunca vista anteriormente, o experimento que tinha como objetivo a detecção dos bósons mediadores da interação fraca foi realizado com o auxílio de aceleradores de partículas, anéis de armazenamento e um sofisticado sistema de detectores.

Em 1981, depois de alguns anos de aprimoramento dos aceleradores e da construção de detectores capazes de identificar a variada quantidade de partículas que poderia surgir durante as colisões, o experimento começou a funcionar. Os dados das colisões eram armazenados em uma rede de computadores que fazia uma seleção inicial dos possíveis eventos de interesses. Esses eventos consistiam em reconstruções gráficas das trajetórias das partículas geradas nas colisões e suas características. Entre esses registros, esperava-se

identificar eventos em que estivessem presentes os produtos dos decaimentos dos bósons W e Z .

Depois de inúmeras colisões, registros e análises, em 25 de janeiro de 1983 foram anunciados oficialmente os primeiros registros do bóson W . Porém, as evidências do bóson Z só vieram a ser registradas em abril de 1983 e anunciadas em junho desse mesmo ano, pois a taxa de ocorrência desse bóson era menor (ARNISON, 1983). Essas detecções foram novas evidências empíricas conclusivas da Teoria Eletrofraca, permitiram as medidas das massas dos bósons e estimularam o interesse no Modelo Padrão das partículas elementares.

Assim, de acordo com a Teoria Eletrofraca, a interação eletrofraca é mediada por quatro partículas, o fóton — partícula sem massa e mediadora da interação eletromagnética — e os bósons mediadores massivos da interação fraca, W^- , W^+ e Z^0 .

Inicialmente essas partículas teriam massa nula, estando sujeitas à simetria de gauge e somente adquirindo massa por meio do mecanismo de Higgs, do qual fazem parte o dubleto Higgs (H^+ , H^0) e seu antidubleto (H^- , \bar{H}^0). A quebra espontânea de simetria ocorreu após uma transição de fase eletrofraca, que deve ter ocorrido quando o universo tinha uma temperatura de cerca de 3×10^{15} °C. Antes da transição de fase, havia a interação eletrofraca, quando a temperatura era mais elevada. Logo após, a interação fraca e a eletromagnética se dividiram e os bósons mediadores adquiriram massa. Com a quebra espontânea da simetria, o fóton (γ) permaneceu com massa nula. O W^+ e o W^- adquiriram massas por incorporação dos bósons carregados (H^\pm), ao passo que Z^0 adquiriu massa de uma parte dos bósons neutros ($H^0 + \bar{H}^0$), ficando a outra parte ($H^0 - \bar{H}^0$) como uma nova partícula bosônica escalar de spin 0, o chamado bóson de Higgs (SALAM, 1991).

A Teoria Eletrofraca já havia sido aceita pela comunidade científica mesmo antes da detecção dos bósons W^+ , W^- e Z^0 , com seus propositores ganhando o Prêmio Nobel de 1979. Por fim, em 2012, foi anunciada a evidência experimental de uma partícula que provavelmente

seria o bóson de Higgs. Com esse anúncio, iniciou-se um intenso trabalho dos pesquisadores para obter mais medidas e informações a respeito dessa partícula até que fosse confirmada a detecção.

Esse episódio da história da Física permitiu uma melhor compreensão da natureza da matéria e das interações fundamentais, pois esclareceu a questão do comportamento da paridade nas interações fracas, a renormalização da teoria, a existência das correntes neutras, a violação da paridade em átomos e a detecção dos bósons W e Z , entre outras questões. Além disso, foi o primeiro passo na formulação teórica de um modelo conhecido como Modelo Padrão das partículas elementares, que explica as interações eletromagnética, fraca e forte, gerando, naquela época, novos questionamentos sobre, por exemplo, a existência do bóson de Higgs, além de ilustrar noções da natureza do desenvolvimento científico.

Referências

- ARNISON, G. *et al.* Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at $s = 540$ GeV. **Physics Letters B**, v. 122, n. 1, p. 103-116, 1983.
- BASSALO, J. M. F. Partículas elementares: do átomo grego à supercorda. In: CARUSO, F.; SANTORO, A. (org.). **Do átomo grego à física das interações fundamentais**. Rio de Janeiro: Aia-fex, 1994. p. 87-165.
- BASSALO, J. M. F.; CATTANI, M. S. D. **Teoria de grupos para físicos**. São Paulo: Instituto de Física/Universidade de São Paulo, 2011. *E-book*.
- BATISTA, I. L. **A teoria universal de Fermi: da sua formulação inicial até a reformulação V-A**. 1999. Tese (Doutorado em Filosofia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- BATISTA, I. L. As partículas estranhas e a teoria universal de Fermi. In: PIETROCOLA, M.; FREIRE JR., O. (org.). **Filosofia**,

- ciência e história:** uma homenagem aos 40 anos de colaboração de Michel Paty com o Brasil. São Paulo: Discurso, 2005. p. 437-471.
- BETHE, H. A. The meson theory of nuclear forces. **Physical Review**, v. 57, p. 260-272, 1940.
- BETHE, H. A.; NORDHEIM, L. W. On the theory of meson decay. **Physical Review**, v. 57, p. 998-1006, 1940.
- BROWN, L. M. *et al.* The rise of the standard model: 1964-1979. In: HODDESON, L. *et al.* (ed.). **The rise of the standard model:** a history of particle physics from 1964 to 1979. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 3-35.
- CREASE, R. P.; MANN, C. C. **The second creation:** makers of the revolution in twentieth-century physics. New Jersey: Rutgers University Press, 1996.
- DARRIULAT, P. The discovery of the W & Z, a personal recollection. **European Physical Journal C**, v. 34, n. 1, p. 33-40, 2004.
- FEYNMAN, R. P.; GELL-MANN, M. Theory of the Fermi interactions. **Physical Review**, v. 109, p. 193-198, 1958.
- 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.
- FRANKLIN, A. **Experiment, right or wrong.** Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- FRANKLIN, A. **The neglect of experiment.** Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- GALISON, P. How the first neutral-current experiments ended. **Reviews of Modern Physics**, v. 55, n. 2, p. 477-509, Apr. 1983.
- GLASHOW, S. L. Towards a unified theory: threads in a tapestry. **Reviews of Modern Physics**, v. 52, n. 3, p. 539-543, 1980.
- HADT, D. The discovery of neutral currents. **European Physical Journal C**, v. 34, n. 1, p. 25-31, 2004.
- HADT, D. P. The weak neutral current-discovery and impact. **La Rivista del Nuovo Cimento**, v. 36, n. 8, p. 335-395, 2013.

- HASERT, F. J. *et al.* Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the Gargamelle neutrino experiment. **Physics Letters**, v. 46B, n. 1, p. 138-140, Sept. 1973.
- HASERT, F. J. *et al.* Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the Gargamelle neutrino experiment. **Nuclear Physics B**, v. 73, n. 1, p. 1-22, 1974.
- LEE, T. D.; YANG, C. N. Mass degeneracy of the heavy mesons. **Physical Review**, v. 102, n. 1, p. 290-291, 1956.
- LEITE LOPES, J. A model of the universal Fermi interaction. **Nuclear Physics**, v. 8, p. 234-236, 1958.
- MORRISON, M. **Unifying scientific theories**: physical concepts and mathematical structures. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- PICKERING, A. Against putting the phenomena first: the discovery of the weak neutral current. **Studies in History and Philosophy of Science Part A**, v. 15, n. 2, p. 85-117, 1984.
- PRESCOTT, C. Weak-electromagnetic interference in polarized electron-deuteron scattering. *In*: HODDESON, L. *et al.* (ed.). **The rise of the standard model**: a history of particle physics from 1964 to 1979. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 459-477.
- ROUSSET, A. The discovery of weak neutral currents. **Nuclear Physics B**, v. 36, p. 339-362, 1994.
- RUBBIA, C.; VAN DER MEER, S.; CLINE, D. B. The search for intermediate vector bosons. **Scientific American**, v. 246, n. 3, p. 48-59, 1982.
- SALAM, A. Gauge unification of fundamental forces. **Review of Modern Physics**, v. 52, n. 3, p. 525-538, 1980.
- SALAM, A. Unificação das forças fundamentais. *In*: SALAM, A.; DIRAC, P.; HEISENBERG, W. **Em busca da unificação**. Lisboa: Gradiva, 1991. p. 7-72.
- SALAM, A.; DIRAC, P.; HEISENBERG, W. **Em busca da unificação**. Lisboa: Gradiva, 1991.

- 'T HOOFT, G. Renormalization of gauge theories. *In*: HODDESON, L. *et al.* (ed.). **The rise of the standard model**: a history of particle physics from 1964 to 1979. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 179-198.
- WEINBERG, S. Conceptual foundations of the unified theory of weak and electromagnetic interactions. **Review of Modern Physics**, v. 52, n. 3, p. 515-523, 1980.
- WEINBERG, S. The making of the standard model. **The European Physical Journal C**: particles and fields, v. 34, n. 1, p. 5-13, 2004.
- WU, C. S. *et al.* Experimental test of parity conservation in beta decay. **Physical Review**, v. 105, p. 1413-1415, 1957.

ÍNDICE REMISSIVO

B

bósons W e Z, experimento 159-165

C

CERN 46, 47, 48, 49, 53, 54, 58, 59, 66,
68, 69, 162, 178, 179, 180

composição histórica 9, 104

correntes neutras 174, 177, 178, 179,
180, 183

correntes neutras, experimento 156

D

decaimento beta 14, 15, 16, 20, 21, 22,
30, 31, 32, 137, 143, 169, 171

E

eletromagnetismo 11, 13, 14, 17, 19, 32,
33, 35, 41, 42, 55, 56, 135, 136, 139,
141, 159, 167, 168, 173, 180, 181, 182

F

Fermilab 46, 49, 53, 58, 63, 178

G

Gargamelle 46, 47, 48, 49, 50, 52, 53,
54, 140, 156, 178, 179, 180

H

helicidade 20, 30, 31

I

interação eletromagnética, *ver*
eletromagnetismo

interação forte 14, 15, 17, 18, 19, 36, 37,
38, 43, 137, 138, 169, 170, 173, 174,
176

interação fraca 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22,
31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 40, 41, 45,
46, 47, 55, 56, 61, 69, 137, 138, 139,
140, 143, 159, 160, 163, 169, 170, 171,
172, 173, 175, 177, 179, 180, 181, 182,
183

M

Modelo Padrão 45, 54, 81, 141, 177, 182,
183

P

paridade 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 29,
30, 31, 55, 159, 170, 171, 172, 180, 183
paridade, experimento 143

R

reconciliação integradora 129

S

simulações de experimentos 79-96, 113,
120-121, 123, 124-125, 130

T

Teoria da Aprendizagem Significativa
83, 102, 103, 115, 116

Teoria da Relatividade Geral 12, 136,
168

Teoria da Relatividade Restrita 12, 136,
168

teoria das supercordas 13, 137, 169

Teoria de Fermi 14, 15, 16, 17, 31, 32,
137, 138, 143, 169, 170, 172

teoria de gauge 33, 34, 36, 38, 44, 138,
139, 173, 174, 175

teoria de gauge não abeliana 36, 42, 174

teoria de Yang-Mills 36, 37, 39, 42, 43,
174, 175, 176, 177

Teoria Eletrofraca

renormalização 38, 39, 40, 41, 42,
43, 44, 46, 139, 140, 175, 176,
177, 178, 183

Teoria Quântica de Campos 33, 39, 42,
173, 177

teoria V-A 31, 32, 36, 138, 178

theta- τ puzzle 18-22, 143, 170

U

UA1 (Underground Area 1) 61, 63, 64,
67, 68, 69, 95, 140, 163, 165

UA2 (Underground Area 2) 61, 63, 68,
69, 163

unificação de teorias físicas 11, 12, 13,
14, 32, 33, 35, 36, 40, 44, 49, 81, 103,
129, 135-141, 167-183

V

V de Gowin 105-112, 128

W

WU, Chien-Shiung 21, 22, 24, 25, 26,
28, 29, 31, 171, 172

SOBRE AS AUTORAS E OS AUTORES

Etiane Ortiz – Professora adjunta do curso de Ciências Biológicas da Universidade Estadual do Paraná, *campus* Paranavaí. Doutora e mestra em Ensino de Ciências e Educação Matemática pela Universidade Estadual de Londrina. Especialista em Educação Especial pelo Instituto de Estudos Avançados e Pós-Graduação. Especialista em Auditoria e Educação Ambiental pela Faculdade de Tecnologia e Ciências do Norte do Paraná. Graduada em Licenciatura em Ciências pela Faculdade Estadual de Educação, Ciências e Letras de Paranavaí, Licenciatura em Ciências Biológicas pela Universidade Norte do Paraná e Pedagogia pela Faculdade Educacional da Lapa. Realiza pesquisas nas áreas de história e filosofia da ciência, formação de professores em ciências e ensino por investigação.

Irinéia de Lourdes Batista – Graduada em Licenciatura em Física pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Mestre em Ensino de Ciências (Modalidade Física e Química) pela Universidade de São Paulo, doutora em Filosofia pela Universidade de São Paulo/ Université Paris VII, com pós-doutorado em Ciência, Tecnologia e Sociedade no Massachusetts Institute of Technology (MIT). Atualmente é professora associada no Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina, com atuação em cursos de graduação em Física, de especialização em Ensino de Física e em História e Filosofia da Ciência, e no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências

e Educação Matemática. É pesquisadora nas interfaces disciplinares de Física/Ciências/História e Filosofia da Ciência/Educação em Ciências e Matemática, nos seguintes temas: formação de professores e aprendizagem em ciências (física, biologia e química) e matemática; história e filosofia da física; história e filosofia das ciências; interdisciplinaridade, complexidade, questões de gênero e ensino de ciências e matemática.

Jacques Duílio Brancher – Graduado em Ciência da Computação pela Pontifícia Universidade Católica (RS), mestre em Engenharia Mecânica, com ênfase em Fenômenos de Transporte, e doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Iniciou suas atividades acadêmicas na Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, *campus* de Erechim, onde orientou dezenas de estudantes em trabalhos de iniciação científica e de conclusão de curso. Conta com um número expressivo de publicações em congressos brasileiros e internacionais na área de jogos e de educação. Atualmente é professor associado do Departamento de Computação da Universidade Estadual de Londrina.

Márcia da Costa – Professora do curso de Física na Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus* Realeza/PR. Já atuou como professora na Universidade Federal do Espírito Santo, na Universidade Estadual do Centro-Oeste e na Educação Básica do estado do Paraná. Mestre e doutora em Ensino de Ciências e Educação Matemática pela Universidade Estadual de Londrina. Licenciada em Física pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Atua em pesquisas com os seguintes temas: história e filosofia da ciência; inserção de temas de Física Moderna no ensino médio e superior; Teoria da Aprendizagem Significativa; ensino por investigação; alfabetização científica e tecnológica; e TDICs no ensino de Física.

Murilo Crivellari Camargo – Mestre em Ciência da Computação pela Universidade Estadual de Londrina (UEL) e especialista em Gestão

de Marketing Digital e em Game Design. Graduou-se em Design Gráfico pela UEL, com período sanduíche na Ontario College of Arts and Design (Toronto, Canadá). Participou de projetos de pesquisa, ensino e extensão, com artigos publicados tanto no Brasil quanto no exterior. Atua como designer de produto e também foi professor assistente no Departamento de Design da UEL. Atualmente, é doutorando em Design na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

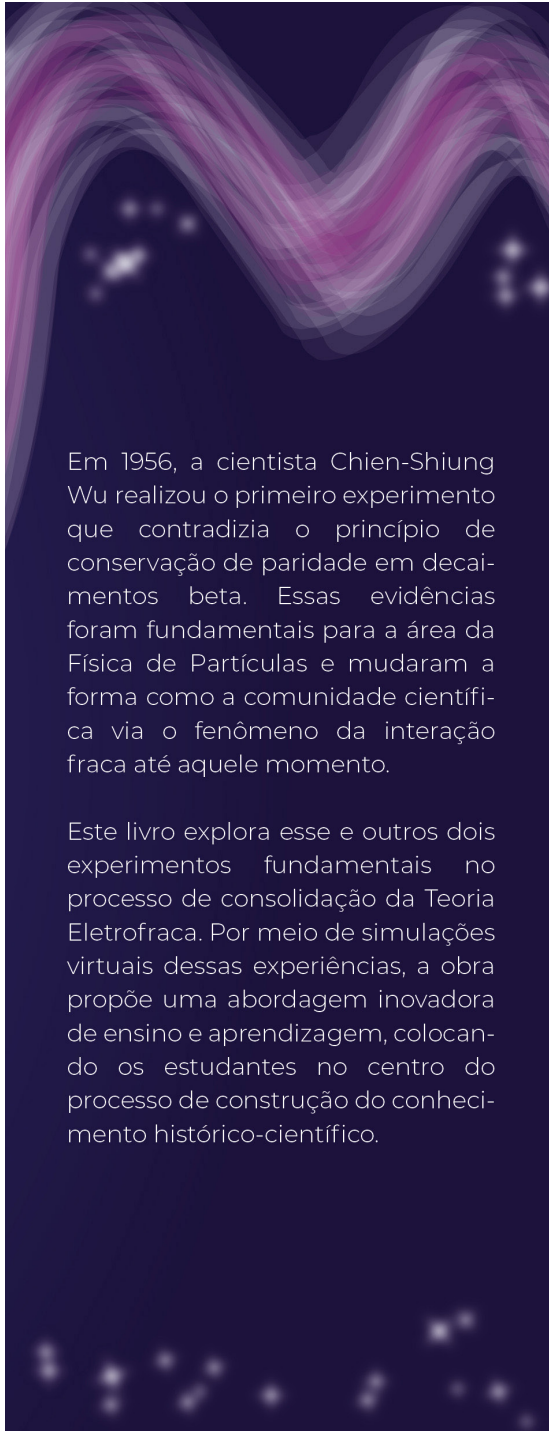
Yago Henrique Pereira – Especialista em Ciência da Computação, mestre pela Universidade Estadual de Londrina, doutorando na Universidade Estadual de Maringá, com formação inicial em Jogos Digitais (Fatec Ourinhos). Também é especialista em Perícia Forense Computacional pela Universidade Cruzeiro do Sul. No mercado atua como programador pleno na empresa CSG, trabalhando com pipelines robustos de coleta e processamento de logs.

Márcia da Costa

Professora adjunta da Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus* Realeza/PR, trabalhou até 2022 na Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Mestre e doutora em Ensino de Ciências e Educação Matemática pela Universidade Estadual de Londrina. Licenciada em Física pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Atua em pesquisas com os seguintes temas: história e filosofia da ciência; inserção de temas de Física Moderna no ensino médio e superior; Teoria da Aprendizagem Significativa; ensino por investigação; alfabetização científica e tecnológica; e TDICs no ensino de Física.

Irinéa de Lourdes Batista

Professora associada do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina. Doutora em Filosofia pela Universidade de São Paulo/ Université Paris VII, mestre em Ensino de Ciências pela Universidade de São Paulo, graduada em Física pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Atua nos seguintes temas: formação de professores; ensino e aprendizagem em ciências e matemática; história e filosofia das ciências; interdisciplinaridade, complexidade e questões de gênero.



Em 1956, a cientista Chien-Shiung Wu realizou o primeiro experimento que contradizia o princípio de conservação de paridade em decaimentos beta. Essas evidências foram fundamentais para a área da Física de Partículas e mudaram a forma como a comunidade científica via o fenômeno da interação fraca até aquele momento.

Este livro explora esse e outros dois experimentos fundamentais no processo de consolidação da Teoria Eletrofraca. Por meio de simulações virtuais dessas experiências, a obra propõe uma abordagem inovadora de ensino e aprendizagem, colocando os estudantes no centro do processo de construção do conhecimento histórico-científico.

O conteúdo apresentado neste livro é inovador no cenário nacional, uma vez que, até o momento de sua elaboração, não se teve conhecimento a respeito de outros estudos que apresentassem de forma integral uma abordagem histórica a respeito da Teoria Eletrofraca e simulações de experimentos relevantes no processo de construção dessa teoria que unifica duas das quatro forças fundamentais da natureza, a interação eletromagnética e a interação fraca.

A abordagem é adequada à formação inicial e continuada de professores e comprometida com a atualização e a integração de conteúdos de Física Contemporânea a novas linguagens tecnológicas e a didáticas desenvolvidas a partir de bases científicas. Espera-se, portanto, que este material sirva de guia de estudo para o estudante de licenciatura em Física, bem como de inspiração para o professor da disciplina, aproximando ambos de tópicos da Física Moderna Contemporânea.