

# ENSINO & MULTIDISCIPLINARIDADE

Jan. | Jun. 2021 - Volume 7, Número 1, p. 57-77.

## Composição histórica da teoria eletrofraca: da reformulação V-A à detecção dos bósons $W^+$ , $W^-$ e $Z^0$

*Historical composition of electroweak theory: from V-A reformulation to detection of  $W^+$ ,  $W^-$  and  $Z^0$  bosons*

Márcia da Costa<sup>1</sup> - <https://orcid.org/0000-0001-6402-5766>

Irinéa de Lourdes Batista<sup>2</sup> - <https://orcid.org/0000-0001-8690-2344>

<sup>1</sup> Doutora pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Professora na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alegre, Espírito Santo, Brasil. E-mail: marcia.costa.21@ufes.br

<sup>2</sup> Doutora pela Universidade de São Paulo (USP). Professora na Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina, Paraná, Brasil. E-mail: irinea2009@gmail.com

### Resumo

Este trabalho tem o objetivo de apresentar uma Composição Histórica a respeito de estudos que culminaram na elaboração da teoria de unificação das interações eletromagnéticas e fracas, a Teoria Eletrofraca. Entende-se que as contribuições teóricas e experimentais envolvidas nesse processo constituíram novos rumos para a Física de Partículas daquela época e elucidaram questões relevantes para o entendimento da estrutura da matéria. Neste artigo, serão apresentados estudos que partem da Teoria V-A, apresentam as primeiras hipóteses de bósons mediadores para a interação fraca, possíveis relações entre as interações fracas e eletromagnéticas, e as contribuições teóricas e experimentais que consolidaram a Teoria Eletrofraca. Este artigo foi elaborado com base em encaminhamentos metodológicos de pesquisas em História da Ciência e pressupostos da elaboração de uma Composição Histórica, considerando fontes primárias e seguindo os princípios de inteligibilidade, valores cognitivos e fidedignidade, que resultam em um material que reúne elementos históricos, epistemológicos, axiológicos e científicos para a inteligibilidade de um conteúdo científico com objetivos pedagógicos e de disseminação de conhecimentos.

**Palavras-chave:** Teoria Eletrofraca. Composição Histórica. Unificação. Experimentos Históricos.

### Abstract

This paper aims to present a Historical Composition about studies that culminated in the elaboration of the theory of unification of weak and electromagnetic interactions, the Electroweak Theory. It is understood that the theoretical and experimental contributions involved in this process constitute new directions for Particle Physics

**Como citar:** COSTA, M.; BATISTA, I. L. Composição histórica da teoria eletrofraca: da reformulação V-A à detecção dos bósons  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ . *Ensino & Multidisciplinaridade*, v. 7, n. 1, p. 57-77, 2021.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

of that time and clarified relevant issues for the understanding of the structure of matter. In this article we will present studies that depart from Theory V-A, present the first hypothesis of mediating bosons for the weak interaction, possible relations between weak and electromagnetic interactions, and the theoretical and experimental contributions that consolidated the Electro-Theory Theory. This article was elaborated based on methodological referrals of research in History of Science and assumptions of the elaboration of a Historical Composition, considering primary sources and following the principles of intelligibility, cognitive values and reliability, which result in a material that brings together historical, epistemological elements axiological and scientific for the intelligibility of a scientific content with pedagogical purpose and knowledge dissemination.

**Keywords:** Electroweak Theory. Historical Composition. Unification. Historical Experiments.

## Introdução

Ao estudar o desenvolvimento da Física, pode-se perceber que, com o passar do tempo, ela consegue unificar fenômenos que pareciam distintos. A unificação, na Física, representa uma maneira de compreender como fatos aparentemente diferentes podem ser interpretados como aspectos de um fenômeno fundamental (SALAM; DIRAC; HEINSENBERG, 1991).

Este trabalho é componente de uma Composição Histórica a respeito da Unificação Eletrofraca, elaborada com o objetivo de proporcionar, aos estudantes de Física e aos professores que atuam em salas de aula, uma alternativa para abordar conceitos de Física Moderna por meio de uma Abordagem Histórica. Neste artigo, abordar-se-á: uma parte dessa composição, partindo das primeiras hipóteses de bósons mediadores para a interação fraca; das primeiras hipóteses da relação entre essas duas interações; e contribuições teóricas e experimentais que permitiram a consolidação de uma teoria de unificação, a Teoria Eletrofraca. Além disso, dar-se-á uma ênfase à descrição de dois experimentos históricos que podem ser explorados em sala de aula por meio de simulações virtuais.

O termo Composição Histórica foi definido por Batista (2016) como uma construção textual, em várias possíveis mídias, que agrega elementos históricos e historiográficos, epistemológicos, axiológicos e científicos para a inteligibilidade de conteúdos científicos, que adota a *histoire-problème* de F. Braudel, e com um papel pedagógico de disseminação de conhecimentos histórico-epistemológicos. Assim, uma composição histórica se difere de reconstruções históricas por seu foco e compromisso pedagógico em mediar conteúdos histórico-científicos a públicos-alvo de diferentes níveis educacionais. A composição histórica apresentada a seguir se dirige ao público-alvo de licenciatura em Física e busca trazer exemplares e episódios históricos que contribuam para o entendimento do conhecimento físico como um processo de construção coletiva, teórico e experimental, com seus sucessos, revezes e desdobramentos.

## Origens da Teoria Eletrofraca: as implicações da reformulação V-A

As evidências da violação da conservação da paridade, em 1957, implicaram reformulações na Teoria de Fermi, que até então descrevia as interações fracas; esta foi reformulada e passou a ser conhecida com Teoria V-A<sup>1</sup>. A Teoria de Fermi na forma V-A foi resultado de reformulações para se adequar às questões da paridade e da carga, e teve a contribuição de físicos como Sudarshan e Marshak, Feynmann e Gell-Mann, e Sakurai (BATISTA, 1999). Foi no trabalho de Feynmann e Gell-Mann que surgiu a hipótese dos bósons mediadores da interação fraca, com spin 1. Seriam bósons carregados e massivos, pois, na

<sup>1</sup>Uma teoria que explicava os fenômenos da interação fraca, com contribuições de vetores (V) e de pseudovetores ou vetores axiais (A) (PLEITZ, 2008; BATISTA, 1999; 2005).

época, sabia-se que nos decaimentos havia mudança de carga elétrica – correntes carregadas (FEYNMANN, GELL-MANN, 1958).

Essa nova forma da interação fraca levou alguns físicos a levantarem hipóteses de relação entre as interações eletromagnéticas e fracas, devido à compatibilidade da forma vetorial de ambas (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, tais mésons, que ele chamou de X, deveriam estar relacionados às interações eletromagnéticas, transmitidas por partículas vetoriais, os fótons. Essa proposta de Leite Lopes admitia que a intensidade das interações eletromagnéticas com as correntes carregadas seria igual àquelas das interações fracas com as correntes correspondentes, considerando a mesma natureza geométrica para os fótons e os bósons da interação fraca (LEITE LOPES, 1958; BATISTA, 1999).

Leite Lopes considerou que 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 60 vezes a massa do próton. Assim, surge a primeira estimativa do valor da massa das partículas mediadoras da interação fraca. Nesse mesmo trabalho, ele propôs que a interação elétron-nêutron só poderia ser realizada por intermédio de um bóson vetorial neutro, hoje conhecido como  $Z^0$  (LEITE LOPES, 1958; 1988; BASSALO, 1994; BATISTA, 1999; 2005).

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

Convém ressaltar que, ainda em 1958, trabalhos semelhantes a esses foram realizados pelos físicos norte-americanos Bludman, Feinberg, Schwinger, e Glashow que estava em fase de doutoramento sob orientação de Schwinger. Já 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 (LEE; YANG, 1960; BASSALO, 1994; BATISTA, 1999; 2005). Trabalhos em que 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, já em 1956, acreditava na relação entre as interações, que elas deveriam ser combinadas em uma Teoria de Gauge, na qual o fóton e o bóson maciço deveriam ser os intermediadores (GLASHOW, 1979).

A Teoria de Gauge, uma classe da Teoria Quântica de Campos, que envolve a Mecânica Quântica e a Relatividade Especial, é usada para descrever partículas atômicas e seus campos. Nessa teoria há um grupo de transformações, 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. É a matematização que descreve a estrutura dos grupos de transformações de gauge e implica restrições gerais a respeito do modo como o campo descrito por essa teoria pode interagir com outros campos e partículas elementares. A maneira de representação desses grupos é advinda 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 eletromagnéticas e fracas, na qual os mediadores seriam dois bósons da interação fraca e o fóton da interação eletromagnética (GLASHOW, 1979; SALAM, 1979; FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007).

Depois da proposta da teoria de gauge, Yang e Mills, em 1954, elaboraram uma teoria de gauge não abeliana, ou seja, quando as transformações dependem da ordem em que são realizadas, com a ideia que se tornasse uma teoria das interações fortes. Um trabalho parecido foi desenvolvido por Ronald Shaw, aluno de Abdus Salam e em alguns casos essa teoria é conhecida como Teoria Yang-Mills-Shaw (SALAM, 1979).

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

Em 1960, essa teoria voltou a ser estudada por Yoichiro Nambu, que percebeu uma quebra espontânea de simetria na teoria. Nambu e Jona-Lasínio e Goldstone, mostraram em seus trabalhos que a quebra espontânea de simetria era acompanhada de uma ou mais partículas sem massa, chamados 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 fracas e eletromagnéticas, 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 (CREASE; MANN, 1996; BROW et al., 1997). Na segunda tentativa, considerou a existência do bóson neutro, com a estrutura  $SU(2) \times U(1)$ . Porém, o problema das massas persistia, a teoria de Yang-Mills-Shaw implicava em bósons vetoriais sem massa e as previsões teóricas da interação fraca implicavam em bósons massivos. Glashow tentou colocar o termo das massas “à mão”. Porém, não funcionava (CREASE; MANN, 1996; BROWN, et al. 1997).

Em 1964, independentemente, os físicos, Higgs, Englert e Brout, Guralnik e Hagen e Kibble, encontraram um mecanismo, que ficou conhecido como mecanismo de Higgs, que tornava massivos os bósons de Nambu-Goldstone. 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; BROWN, et al. 1997).

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, a teoria não era renormalizável. Então percebeu que estava usando uma teoria certa na interação errada, aplicou a teoria para descrição das interações fracas e eletromagnéticas. Depois de testar outras estruturas, chegou na estrutura  $SU(2) \times U(1)$ , na qual 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). Mas, não conseguiu mostrar que era uma teoria renormalizável e incluía apenas os léptons (WEINBERG, 1980; 2004).

Em 1967, após Salam tomar conhecimento do mecanismo de quebra espontânea de simetria, por meio do mecanismo de Higgs, ele foi capaz de completar a formulação da teoria  $SU(2) \times U(1)$ . Isso tornou a teoria bastante preditiva. Permitiu que as massas de W e Z, assim como seus acoplamentos, fossem calculadas em termos de um único ângulo desconhecido, theta. Independentemente do valor de theta, as massas de W e Z foram previstas com valores altos, grandes o suficiente para ter escapado à detecção. Nessa teoria, inicialmente as partículas teriam massa nula e estariam sujeitas à simetria “gauge”. No entanto, por intermédio do mecanismo de Higgs, do qual participam o dubleto Higgs ( $H^+$ ,  $H^0$ ) e seu antidubleto ( $H^-$ ,  $(H^0)^-$ ), há a quebra espontânea de simetria, na qual o fóton ( $\gamma$ ) 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 ( $H^0+H^0$ ), ficando a outra parte ( $H^0 - H^0$ ) como um novo bóson escalar (spin 0), o bóson de Higgs (SALAM, 1979; 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  $3 \times 10^{15}$  °C. Antes que a transição de fase ocorresse, quando a temperatura era maior que  $3 \times 10^{15}$  °C, havia apenas a interação eletrofraca. Ao atingir essa temperatura, ela se divide em duas interações, a fraca e a eletromagnética, em um processo no qual os W e  $Z^0$  adquirem massa. (SALAM, 1979; 1991; WEINBERG, 1980; 2004).

Glashow, Weinberg e Salam chegaram na estrutura  $SU(2) \times U(1)$ , no entanto, Glashow não havia conseguido resolver o problema com as massas. Weinberg e Salam resolveram o problema das massas, mas não conseguiram incluir os quarks, explicar a ausência das correntes neutras e mostrar que a teoria era renormalizável. Esse cenário só começou a mudar em 1970.

Outro fator que dificultou o fortalecimento dessa ideia, na época, foi o procedimento experimental utilizado para estudar a interação fraca. Os experimentadores estudavam casos de decaimento de partículas estranhas, pois esse processo ocorre devido a interação fraca. Porém, nas reações com partículas estranhas, é o único caso em que as correntes neutras não se manifestavam! Isso só foi percebido em 1970, por Glashow, Iliopoulos e Maiani, que explicaram o motivo de não observação das correntes neutras nas interações de partículas estranhas por meio da hipótese de um quarto quark. Essa nova hipótese, expandia a Teoria Eletrofraca para incluir os quarks, e sugeriu 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 da interação forte, fraca e eletromagnéticas, no que hoje é conhecido como Modelo Padrão das Partículas Elementares e também influenciou a busca teórica e experimental (FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007).

A proposta da Teoria Eletrofraca foi ignorada por mais alguns anos, pois previa a existência das correntes neutras e não era renormalizável, o que dificultou o interesse de físicos experimentais para testarem 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).

Ambos, Salam e Weinberg, imaginavam que a Teoria Eletrofraca era renormalizável, porém nenhum deles testou isso. Weinberg afirma que não o fez por não gostar do método, usado na época, pelo qual era possível fazer o teste, a integração de caminho. De acordo com Weinberg, como muitos teóricos daquela geração, ele aprendeu a fazer cálculos na teoria quântica de campo 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).

Embora ele não entendesse as potencialidades da integração do caminho, Veltman e seu aluno 't Hooft o fizeram. Em 1971, 't Hooft usou a integração de caminho para definir um indicador em que era explícito 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 há apenas um número finito de infinitos (WEINBERG, 1996).

Essa 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. Essa dificuldade poderia ser resolvida por meio da renormalização da teoria ['t HOOFT, 1997; BASSALO, 2012).

't Hooft e seu orientador, Veltman, trabalharam com esse problema de pesquisa e conseguiram resolver a grande dificuldade do modelo de Salam-Weinberg, ou seja, a 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 é de importância vital para a teoria das partículas elementares, colocando-a numa base matemática 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 os teóricos houve um aumento de interesse por esse tipo de teoria. A relevância da renormalização não consistia só na eliminação dos infinitos, pois a teoria passava a ter um potencial de descrever as interações fracas e eletromagnéticas a energias superiores a 300 GeV. E, após essa etapa, as implicações experimentais da teoria passaram a ser mais estudadas (WEINBERG, 2004).

Em termos das características das unificações de teorias científicas, a unificação requer a presença de uma estrutura matemática e de um parâmetro teórico específico. No caso da Teoria Eletrofraca, esse papel é desempenhado especificamente pela Teoria de Gauge e pelo ângulo de Weinberg. Nesse caso, trata-se de uma unificação do tipo sintética, pois a teoria fornece uma estrutura unificada, na qual as interações eletromagnéticas e fracas podem ser integradas, porém, as partículas mediadoras permanecem distintas. Tratam-se de duas teorias, cada uma regida por grupos de simetria independentes e que são combinadas sob uma estrutura de simetria maior, produzindo uma nova teoria que introduz um parâmetro necessário, ângulo de Weinberg, para apresentar essas teorias de forma unificada (MORRISON, 2000).

O problema, então, 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 possíveis indicações de que a teoria estivesse correta, mas, na época, esse não era o principal interesse dos físicos experimentais.

### **Observação das correntes neutras**

A teoria de Glashow, Salam e Weinberg permitiu que a massa das partículas W e Z fossem previstas 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 (WEINBERG, 1980; FORTES; TIJERO; PLEITEZ, 2007).

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

Os experimentos que procuravam a observação de eventos de correntes neutras foram realizados por duas colaborações experimentais, a colaboração Gargamelle no CERN e a Colaboração E1A no FERMILAB (GALISON, 1983).

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 os primeiros experimentos com neutrinos aconteciam nesse período, 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, mantido sob pressão para evitar que ele ferva. Quando um feixe de neutrinos, por exemplo, é disparado no tanque, pequenas bolhas começam a se formar ao longo de trilhas de partículas carregadas, produzidas na interação entre o neutrino e o núcleo do líquido superaquecido. Essas trilhas são fotografadas e podem ser analisadas posteriormente. O motivo para a construção de uma câmara grande era para aumentar a taxa de interação do neutrino com o líquido que preencheria seu interior. Além disso, a Gargamelle foi projetada para ser preenchida com um líquido muito denso, o freon, o que aumentaria ainda mais a taxa de interação (PICKERING, 1984).

A primeira proposta desse detector foi escrita em fevereiro de 1964, por Lagarrigue, Musset e Rousset, e a decisão de iniciar o programa foi 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; ROUSSET, 1994; HAIDT, 2004). Na Figura 1 está representado um esquema, da visão lateral, da câmara de bolhas Gargamelle<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Detalhes do experimento que utilizou a câmara de Gargamelle são descritos neste artigo para que possam ser utilizados em abordagens didáticas envolvendo a simulação virtual de um dos experimentos que evidenciou a presença das correntes neutras (<https://drive.google.com/drive/folders/1d2S4zlokYL9AZchc3dremIPQtSaEgrsI?usp=sharing>). Na pasta compartilhada pelo *link* também se encontram as instruções.

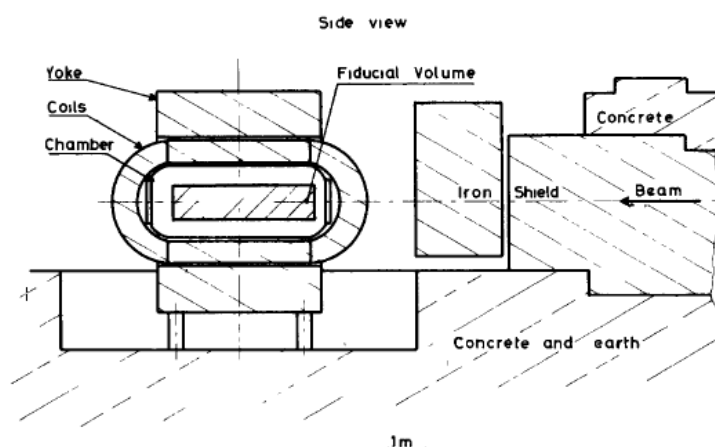


Figura 1 – Representação esquemática da visão lateral da câmara Gargamelle.

Fonte: Hasert et al. (1974).

A câmara de bolhas Gargamelle possuía um volume útil de  $6,2 \text{ m}^3$ , com diâmetro de 1,8 m, preenchido com aproximadamente 10 toneladas de freon ( $\text{CF}_3\text{Br}$ ) com uma densidade de  $1,5 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ , comprimento de radiação de 11 cm e comprimento de interação de aproximadamente 0,75 m, exposto a feixes de neutrinos e antineutrinos do CERN. Ela possuía um comprimento de 4,8 metros, isso assegurou que os eventos fossem identificados inequivocamente (HASERT et al., 1973; 1974).

A câmara ficava sob ação de um campo magnético de 2 Teslas para que fosse possível observar os desvios das partículas carregadas e desta forma medir seu *momentum*. A fim de evitar ruídos nos resultados alguns cuidados foram tomados, entre eles a blindagem de radiações externas que era feita por ímãs, por bobinas de cobre e escudos de ferro e concreto (HASERT et al., 1974).

Outro cuidado foi em relação ao comprimento da câmara; ele foi escolhido para que os eventos pudessem ser identificados sem ambiguidade. Sabia-se que o feixe de neutrinos pode interagir com os materiais ao redor da câmara e gerar um número desconhecido de nêutrons dentro desta, que ao se chocarem com um núcleo poderia ocasionar um chuveiro de hádrons, o que poderia ser confundido com os eventos de interesse. Nesse aparato, os nêutrons são absorvidos mais rapidamente e os eventos provocados por eles se localizam na parte inicial da câmara. Logo, esse é um motivo para que o comprimento da câmara seja suficiente para que esses eventos possam ser diferenciados (HASERT et al., 1974).

Convém ressaltar que o foco das pesquisas, na época, não eram as correntes neutras. Somente após 1971 é decidido começar a análise de possíveis eventos de correntes neutras, mas não como prioridade. Os grupos do CERN e Milão começaram a medir sistematicamente esses candidatos a eventos de Correntes Neutras, NC. Durante maio de 1972, uma coleção de candidatos a eventos de NC é cuidadosamente examinada no CERN, por vários físicos da colaboração, e parecia provável que eles existiam. Em julho do mesmo ano, foi recomendado que todos os grupos extraíssem sistematicamente todos os candidatos de eventos de NC e fizessem fotografias em grande escala para serem analisadas em uma reunião em agosto, em Paris. Assim, todos os grupos voltaram sua atenção para esse tipo de evento (GALISON, 1987; ROUSSET, 1994).

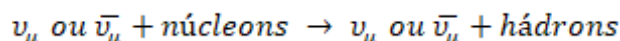
Alguns teóricos também influenciaram nesse interesse pelas correntes neutras. No CERN, um grupo de teóricos elaborou um seminário, no final de 1971, para os experimentadores da colaboração Gargamelle. Esses teóricos trabalhavam no modelo de



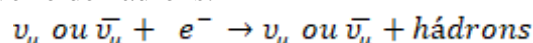
unificação das interações fraca e eletromagnética, e, para levar adiante os seus argumentos, necessitaram da ajuda de seus companheiros experimentais. Assim, enfatizaram a relevância de uma busca ativa pelas correntes neutras (PICKERING, 1984). Nos Estados Unidos, o próprio Weinberg convenceu físicos do Fermilab ou FNAL (*Fermi National Accelerator Laboratory*) da necessidade de procurar as correntes neutras. Atendendo a essa necessidade, a colaboração E1A adaptou o experimento HPWF<sup>3</sup> para esse novo objetivo (Ibidem).

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

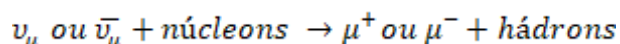
1) Um neutrino ou antineutrino sendo espalhados por um núcleon e provocando um chuva de hádrons:



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



Esses dois eventos de correntes neutras deveriam ser distinguidos dos eventos de corrente carregada, correspondentes à reação na qual um neutrino ou antineutrino colidem 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 correntes neutras e carregadas.

Na análise dos processos leptônicos, as interações de interesse para estudo 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,  $\theta_e$ , 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 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  $\theta_e < 5^\circ$  (HASERT, 1974).

Ao levar em consideração o comprimento da câmara para excluir eventos que imitariam as correntes neutras, somente foram analisados os eventos que ocorreram 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, 1974).

Um total de 375.000 imagens de eventos com neutrinos e 360.000 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. Estava isolado e bem dentro do volume visível mensurável da câmara, tinha uma energia alta o suficiente que não poderia ter sido atingida por um dos portadores neutros, ejetados em eventos carregados.

Na Figura 2, o antineutrino entra pela esquerda, sem deixar vestígios, atinge um elétron que passa a se mover horizontalmente para a direita, emitindo dois fótons que produzem um par elétron-pósitron.

<sup>3</sup> 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).

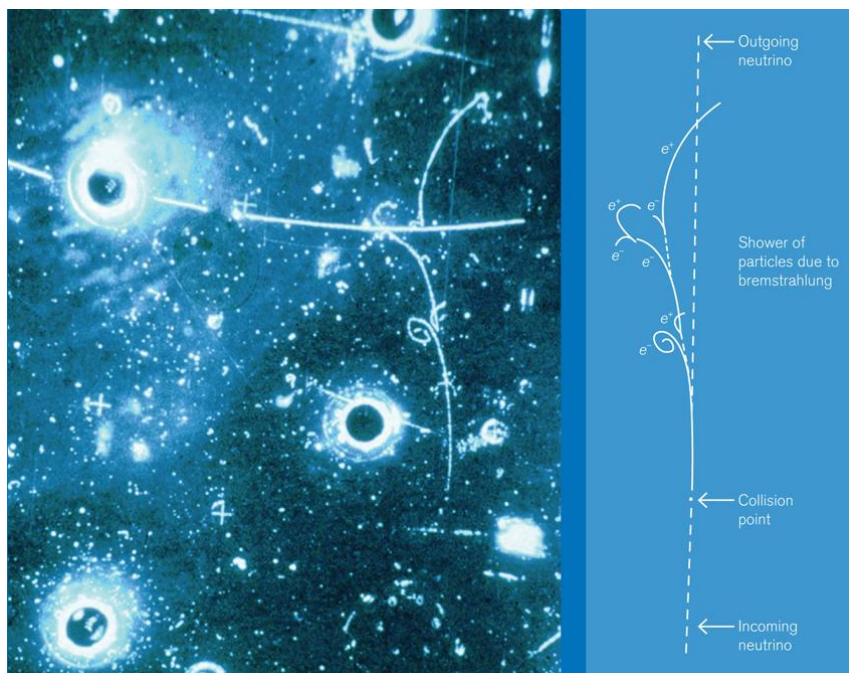


Figura 2 – Fotografia do primeiro evento de correntes neutras registrado e uma ilustração da identificação das partículas.

Fonte: Cortesia do CERN, Riesselmann (2009).

A curvatura no início do traço mostra que se trata de uma partícula de carga negativa e o efeito *bremstrahlung*, que resulta na produção de fótons de alta energia, evidencia que o traço é de um elétron. A energia do elétron era de  $385 \pm 100 \text{ MeV}$  e o ângulo de  $1,4^{\circ} \pm 1,6$ . O vértice do surgimento do elétron estava a 60 cm do início do volume visível da câmara e 16 cm do seu eixo. Assim, não tinham chances de ser um registro de um evento gerado por radiação de fundo (HASERT et al., 1973).

Essa primeira evidência fortaleceu as buscas e, em julho de 1973, após os esforços para medir os eventos de NC, a colaboração Gargamelle coletou amostras de 102 eventos NC nas fotografias com neutrinos e 64 nas fotos com antineutrinos. As amostras correspondentes de eventos de CC foram, respectivamente, 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 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 (ROUSSET, 1994; HAIDT, 2004).

A evidência das correntes neutras fracas coroou o programa de pesquisa de neutrinos iniciado pelo CERN no início dos anos 60 e levou o CERN 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 enorme atividade no CERN e em todo o mundo, tanto experimental como teoricamente (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  $\theta_w$ . Obteve-se um valor de 70 GeV, o que indicava que os experimentos com neutrinos não seriam capazes de realizar essa detecção. Seria necessário realizar experimentos de colisões de alta energia (HAIDT, 2004; HAIDT; PULLIA,

2013).

As evidências das correntes neutras, de acordo com Dieter Haidt e Pullia (2013), deram substância à Teoria Eletrofraca, tornando-se a primeira evidência experimental dessa teoria. Além disso, trouxeram um impulso para a Astrofísica e aplicações na Biologia, bem como um novo campo de interações de neutrinos, agora mediado pelo bóson  $Z^0$ .

Outra questão que foi discutida novamente, após as correntes neutras se estabelecerem, foi a possível violação da paridade em átomos. Essa hipótese foi testada por alguns experimentos, dentre eles um experimento de dispersão de elétron-núcleon no SLAC (*Stanford Linear Accelerator Center*) 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 certo que a Teoria Eletrofraca estava correta. Além disso, também 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, disponíveis na época, não possuíam aceleradores com energia suficiente para realizarem experimentos que possibilitassem a observação dessas partículas.

### **Deteccção indireta dos bósons W e $Z^0$**

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 deteção dos bósons W e Z. Ao invés de construir uma máquina nova, foi proposto converter um acelerador de prótons, em uma máquina de colisão (CLINE et al., 1982; WATKINS, 1986)

Houve o aprimoramento de um Síncrotron de prótons PS, para que pudesse acelerar, simultaneamente, feixes de prótons e antiprótons – SPS. Embora alguns peritos dos experimentos do Síncrotron de Prótons tivessem receio de realizar essa transformação, foram convencidos pelos embasamentos teórico e conceitual apresentado por Carlo Rubbia (DARRIULAT, 2004).

O experimento que tinha como objetivo a deteção dos bósons mediadores da interação fraca, foi realizado com o auxílio de aceleradores de partículas, anéis de armazenamento e um sofisticado sistema de detectores. Composto por uma equipe de pesquisadores, engenheiros e demais envolvidos, em uma escala nunca vista anteriormente. Depois de alguns anos de aprimoramento dos aceleradores e construção de detectores capazes de identificar a variada quantidade de partículas que poderia surgir durante as colisões, em 1981 o experimento começou a funcionar.

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 (CLINE et al., 1982).

Para colocar essa taxa de produção em perspectiva, foi calculado 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 (Ibidem).

Criar antipartículas suficientes não era o único problema. Os antiprótons emergem do alvo com uma variedade de velocidades e direções. Se a energia 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 seriam 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, que aplica um campo elétrico para empurrar o centro de massa das partículas de volta para dentro da órbita ideal. Assim que esse feixe esteja 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 (CLINE et al., 1982; WATKINS, 1986).

Na Figura 3 é representado um esquema de todo o processo de aceleração e produção dos prótons e antiprótons, de acordo com Cline et al. (1982) e Watkins (1986). Os itens desse complexo de aceleradores estão indicados por números e sua respectiva legenda está na figura.

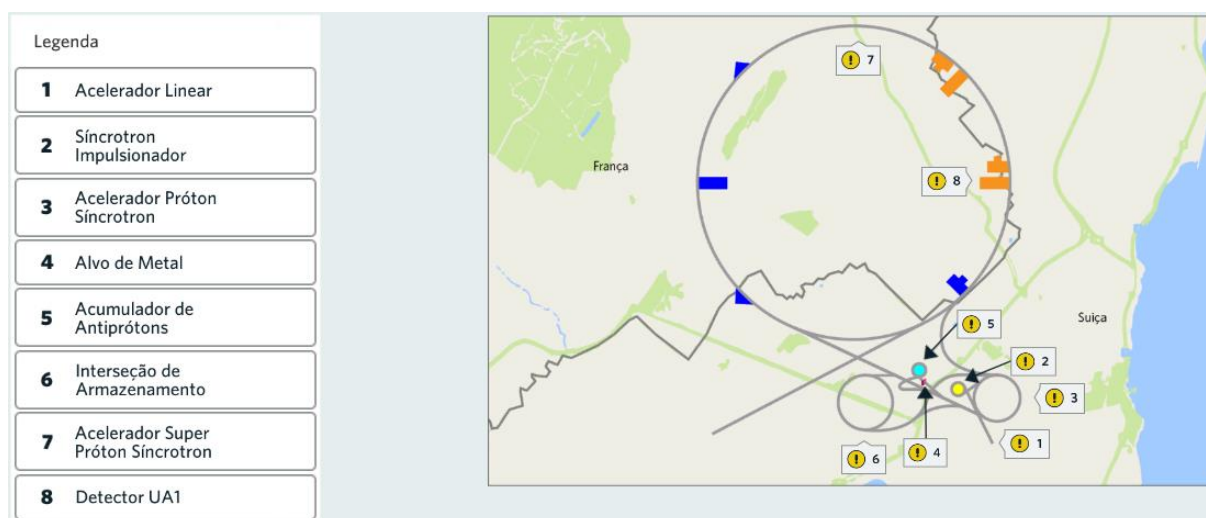


Figura 3 – Representação do processo de produção e aceleração de prótons e antiprótons até o momento da colisão

Fonte: adaptado de Cline et al. (1982) e Watkins (1986).

Todo o complexo experimento<sup>4</sup>, que foi projetado para a detecção dos bósons, tem início com um cilindro de hidrogênio, que irá fornecer os átomos, cujos prótons serão utilizados na experiência. Esse cilindro fica em uma das pontas de um acelerador linear, o LINAC. É nele

<sup>4</sup> Detalhes desse experimento são descritos neste artigo para que possam ser utilizados em abordagens didáticas envolvendo a simulação virtual de um dos experimentos que evidenciou a detecção indireta dos bósons da interação fraca (<https://drive.google.com/drive/folders/1d2S4zlokYL9AZchc3dremIPQtSaEgrsI?usp=sharing>). Na pasta compartilhada pelo *link* também se encontram as instruções.



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 sincrotron impulsor, o BOOSTER, composto por quatro anéis que recebem o feixe de prótons do LINAC e aceleram os mesmos até 800 MeV para então direcionar para o Próton Síncrotron (PS).

No acelerador PS os prótons são novamente acelerados, até obterem uma energia de 26 GeV, quando são 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 (AA), onde eles eram, em primeiro lugar, pré-resfriados pelo método estocástico, e, em seguida, transferidos para uma órbita ligeiramente menor, na qual eles 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, onde eram acelerados a 26 GeV, antes de serem injetados no Super Próton Síncrotron (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 eles são injetados de forma a circular na direção oposta de circulação dos prótons. Quando os dois feixes possuem a energia adequada para a colisão, são direcionados para colidirem no interior de dois detectores, o UA1 (Underground Area 1) e o UA2 (Underground Area 2).

Depois que os prótons e antiprótons passaram por todo esse processo, eles estão prontos para a colisão. Nesse ponto, entram outras questões. 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 pode-se esperar que o decaimento ocorra. Porém, sua massa os torna difíceis de produzir, 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 100 partículas diferentes (WATKINS, 1986). Como selecionar 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 pósitron ( $Z^0 \rightarrow e^- + e^+$ ), um múon e um antimúon ( $Z^0 \rightarrow \mu^- + \mu^+$ ). Como, tanto o elétron quanto o múon possuem massas bem menores do que o  $Z^0$ , a previsão é de que os decaimentos produzam partículas com altas energias, pois toda a energia de repouso do  $Z^0$  é transmitida para elas.

O decaimento do  $Z^0$  em um par elétron-pósitron ou múon-antimúon representa apenas 6% das possibilidades totais de decaimento de  $Z^0$ . 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  $W^-$  que possuem 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 antilépton 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 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 nesta 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 10 vezes menor. Assim, seriam necessários meses de trabalho contínuo nos aceleradores e detectores para que se conseguisse detectar alguns desses eventos (WATKINS, 1986).

Como o acelerador é subterrâneo, cada detector no colisor teve que ser instalado em uma área subterrânea. Desde o início, tudo foi acompanhado por uma série de grupos de pesquisa de países diferentes, que formaram duas colaborações, uma delas era a colaboração da Área Subterrânea 1 (UA1). A colaboração foi formada para projetar e construir um detector para identificar e registrar colisões energéticas próton-antipróton na busca dos bósons  $W$  e  $Z^0$ . Além da colaboração UA1, também foi aprovado um segundo experimento, o UA2, que apresentava os mesmos objetivos do UA1 e colaborou na comprovação das evidências obtidas no UA1.

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 é o resultado de um esforço colaborativo de uma equipe de mais de 100 físicos de 11 instituições na Europa e nos EUA: 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 (Paris), da Universidade da Califórnia em Riverside, da Universidade de Roma (I), do Laboratório Rutherford, do Centro de Pesquisa Nuclear Saclay e da Universidade de Viena. O UA1 tinha 10 metros de comprimento por cinco metros de largura, e massa total de aproximadamente 2.000 toneladas (CLINE et al. 1982).

O detector UA1 é um dispositivo polivalente, feito para detectar vários tipos de partículas e para recolher informações sobre um largo ângulo sólido em torno do ponto onde os feixes colidem. Ele mede a energia das partículas por vários meios, incluindo a curvatura dos seus caminhos em um campo magnético (CLINE et al. 1982).

Desde o início do projeto até o início dos experimentos, muitos testes foram realizados, à medida que os aceleradores e detectores eram adaptados e instalados para promoverem as colisões (CLINE et al. 1982; WATKINS, 1986)

As adaptações para a realização do experimento terminaram em 1981 e, em julho daquele 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 250.000 colisões como estas 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 foi detectado nessas primeiras séries. Esta situação mudou na próxima fase de experiências, em que a intensidade dos feixes e a taxa de colisão foram aumentadas (CLINE et al. 1982).

Os primeiros dados de outubro de 1982 não apresentaram nenhum indício dos bósons procurados. Esse cenário mudou no início de novembro, quando, durante uma dessas sessões de rotina, um candidato ao bóson  $W^-$  foi encontrado. Isso criou grande entusiasmo e em breve havia dezenas de físicos, ansiosos para olhar para todas as características do evento, na área de digitalização. No entanto, ao analisar detalhadamente o evento, percebeu-se que não era possível afirmar que se tratava de um decaimento do bóson  $W$ . Assim, a emoção se conteve 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 estudos detalhados de todos os

aspectos desse novo evento. Cópias do evento, vistas de todos os ângulos, foram feitas e distribuídas para integrantes da colaboração UA1 rapidamente. Cada pessoa que estudou o evento tentou detectar um problema que poderia ter passado despercebido pelos demais, mas nenhum problema foi detectado após uma inspeção por especialistas, o que caracterizou esse evento como um excelente candidato para um bóson  $W^-$ , decaindo em um elétron e seu antineutrino.

Entretanto, um único evento não poderia convencer da 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 e essa soma não coincidir com o valor da energia inicial, suspeita-se que neutrinos, ou antineutrinos, tenham carregado essa energia que está faltando e passaram 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 os eventos 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 dos 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 comprimir várias horas 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  $W$ . Dentre os resultados não havia um único candidato para um bóson de  $Z^0$ , mas havia seis candidatos dos bósons  $W$ . Com relação à colaboração UA2, também não havia candidatos ao bóson  $Z^0$ , e 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 e ambas as colaborações foram capazes de citar a massa do bóson  $W$  como sendo aproximadamente 80 GeV (UA1; 1983a; UA2, 1983a). Esses resultados dos dois experimentos foram apresentados em seminários no auditório do CERN nos dias 20 e 21 de janeiro de 1983. E no próximo fim de semana 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  $W$ , esperançosos de que o bóson  $Z^0$  ainda seria detectado, uma vez que ele é produzido com menos frequência que os bósons  $W$ . Na Figura 4 está representado um dos primeiros registros da evidência do bóson  $W^-$ , no qual ele decai em um elétron, identificado como a linha azul, e seu antineutrino, que passa despercebido pelos detectores.

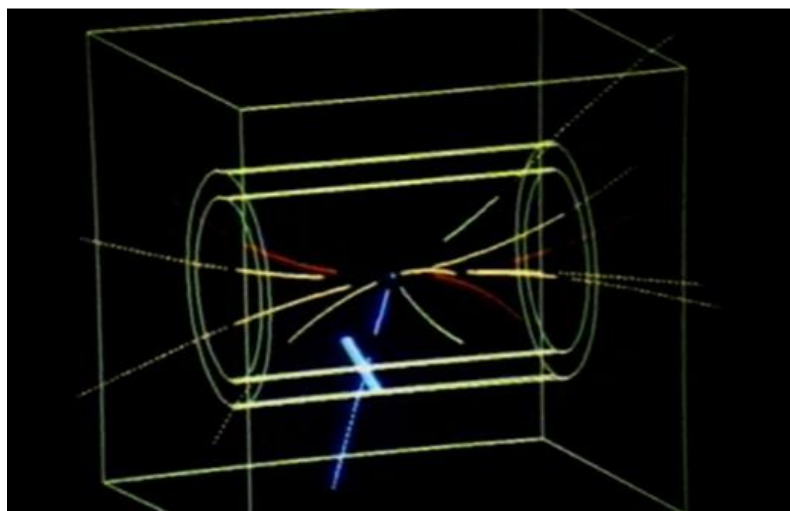


Figura 4 – Exemplo de um dos primeiros registros da detecção do bóson  $W^-$

Fonte: CERN: CERN-MOVIE-1983-005-001

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 esse entusiasmo, era necessário retornar ao trabalho, analisar o restante dos dados e retomar a obtenção de dados. Em seguida, 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, esperava-se 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. Depois desse, logo 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 ambos os experimentos continuaram a busca por mais eventos. Dias após o seminário, mais dois eventos foram observados pela UA1. E em 1 de junho de 1983, o CERN anunciou formalmente as evidências da existência do bóson  $Z^0$ .

A colaboração da 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 decaimentos desse bóson, com uma massa aproximada de 93 GeV (UA1, 1983b; 1983c; UA2, 1983b), o que estava em excelente concordância com as previsões detalhadas da Teoria Eletrofraca. Na Figura 5 é representado o primeiro decaimento do bóson  $Z^0$  que foi registrado no experimento UA1.

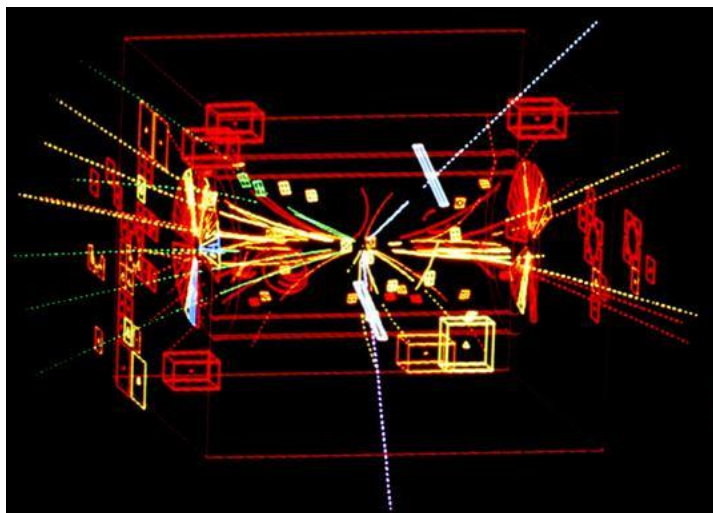


Figura 5 – Registro do decaimento do bóson  $Z^0$  em um par elétron-pósitron, identificados pelos traços azuis

Fonte: CERN: original ref.: X-168-4-87<sup>5</sup>

Essas detecções foram as evidências empíricas conclusivas da Teoria Eletrofraca, segundo a qual a interação eletrofraca é mediada por quatro partículas, o fóton ( $\gamma$ ), partícula não massiva e mediadora da interação eletromagnética e os bósons vetoriais massivos,  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ , mediadores da interação fraca.

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.

### Considerações finais

A área de Física de Partículas já foi mencionada como uma área frutífera para exemplificar o processo de construção do conhecimento científico, pois episódios históricos que envolvem essa área de pesquisa revelam o quanto os físicos teóricos e experimentais uniram competências para procurar compreender a natureza da matéria. Foram necessários grandes investimentos intelectuais, tecnológicos e financeiros para que se chegasse aos conhecimentos atuais.

Com base nessa Composição Histórica, pode-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.

Ao tratar da abordagem histórica da Unificação Eletrofraca, pode-se evidenciar aspectos da natureza do trabalho e do conhecimento científico que podem auxiliar na representação de um papel coerente da Ciência. Dentre os possíveis aspectos, pode-se citar alguns.

Casos em que cientistas ou grupos de cientistas se deparam com um problema ou com um grupo de dados e resolvem tomar caminhos diferentes, pois os cientistas possuem uma base teórica que acaba influenciando na tomada de decisões, bem como são influenciados pelo que

<sup>5</sup> Disponível em: <http://cdsweb.cern.ch/record/615824>. Acesso em: 02 nov. 2020.

pensa a comunidade científica. Ao discutir esses exemplos, pode-se combater uma visão empírico-indutivista e atórica da ciência, que ressalta o papel da observação e da experimentação “neutras”, não contaminadas por ideias “a priori”, esquecendo o papel das hipóteses como focos de pesquisa e das teorias disponíveis que orientam todo o processo. Além disso, pode-se explorar as relações entre teoria e experimento, uma vez que, nos casos descritos, os experimentos foram todos projetados com base nas proposições teóricas existentes.

No caso da unificação das teorias eletromagnética e fraca, pode-se discutir a relevância dos formalismos teórico-matemáticos na elaboração do conhecimento científico, uma vez que foi somente depois de demonstrado matematicamente que a Teoria Eletrofraca era renormalizável que a busca por evidências experimentais ganhou força. Além disso, todas as evidências experimentais que colaboraram com o processo da unificação eletrofraca tiveram suas buscas incentivadas pelas previsões teóricas e foram detectadas em instrumentos elaborados com objetivos específicos, o que revela a inter-relação entre teoria e experimentação.

Outro fator importante é a colaboração entre cientistas de teorias e a equipe experimental, uma colaboração de pessoas que não fazem tudo sozinhas. Em alguns casos, faz-se necessária a parceria entre membros da mesma equipe (uma equipe experimental ou teórica com membros que colaboram) e de outras equipes (colaboração entre equipes teóricas e experimentais). O que fica ainda mais intenso quando se fala dos demais experimentos que contribuíram para o processo de unificação, uma vez que foram experimentos com uma colaboração entre cientistas, universidades e países, até aquele momento nunca vistos. Nesse caso, combate-se a visão individualista, sexista e elitista da ciência, na qual os conhecimentos científicos aparecem como obra de gênios isolados, ignorando-se o papel do trabalho coletivo e do intercâmbio entre equipes.

Além disso, ao discutir os planejamentos dos experimentos, desde as previsões teóricas até sua execução, pode-se discutir o papel de cientistas no planejamento, desenvolvimento, construção e realização do experimento, desconstruindo a ideia de que cientista é alguém que está realizando experimentos solitariamente em um laboratório. São necessárias mais que habilidades teóricas ou experimentais para ser cientista. É necessária atenção aos órgãos fomentadores de pesquisa, que precisam ser convencidos para a obtenção de recursos financeiros; é preciso convencer as instituições de pesquisa, laboratórios e possíveis colaborações no sentido de mostrar que a pesquisa é relevante.

Ainda em relação aos experimentos, pode-se falar dos imprevistos e das dificuldades enfrentadas tanto para construção dos experimentos como na execução, tomada e análise de dados. O que exemplifica a ideia de que a Ciência não é construída da noite para o dia, que não é um processo em que tudo ocorre perfeitamente como planejado. A atividade científica é uma atividade humana, sujeita a erros, imprevistos e acertos.

Esses são alguns exemplos de como podem ser tratadas algumas noções da natureza do conhecimento e do trabalho científico, que podem ser abordadas no estudo a respeito do desenvolvimento da Teoria Eletrofraca. Espera-se que esse material possa servir de base para propostas didáticas, bem como material para disseminação do conhecimento científico relacionado à unificação das interações fracas e eletromagnéticas, que possa ajudar os leitores a entenderem o processo de construção desse conhecimento, levando em consideração os aspectos históricos, epistemológicos e científicos a ele relacionados. Além disso, também foram publicadas propostas didáticas com o uso das simulações virtuais dos experimentos tratados neste artigo e que podem auxiliar o trabalho docente na abordagem desses temas.



## Referências

- BASSALO J. M F. Partículas Elementares: do átomo grego à supercorda. In: CARUSO, F.; SANTORO, A. **Do átomo grego à Física faz Interações Fundamentais**, ed. 1, Editora Aiafex, Rio de Janeiro, 1994.
- BASSALO J. M. F.; CATTANI, M. S. D. **Teoria de Grupos para Físicos**. Publicação IF E-BOOK 1661/2011.
- BASSALO J. M. F. O Bóson de Higgs (“A Partícula Deus”) e a Partícula Z0 (“A Partícula De Deus”). **Norte Ciência**, v. 3, n. 1, p. 1-26, 2012.
- BATISTA, I. L. **A teoria universal de Fermi: Da sua formulação inicial até a reformulação V-A**. 1999, 122 f, Tese (Doutorado em Filosofia da Ciência) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- BATISTA, I. L. **As partículas estranhas e a Teoria Universal de Fermi**. In: PIETROCOLA, M.; FREIRE JR. (Orgs.). **FILOSOFIA, CIÊNCIA E HISTÓRIA: uma homenagem aos 40 de colaboração de Michel Paty com o Brasil**. Editora Discurso, São Paulo-SP, p. 437-471, 2005.
- 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**. 372 p, Londrina, UEL, 2016.
- BROWN L.; HODDESON L.; RIORDAN M.; DRESDEN M. The Rise of the Standard Model: 1964-1979. (Eds). **The Rise of the Standard Model**, Cambridge Univ. Press, p.179-198, 1997.
- CLINE, D. B.; RUBBIA, C.; MEER, S. V. D. The search for intermediate vector bosons. **Scientific American**, v. 246, issue 3, p. 48-59, 1982.
- CREASE R. P; MANN C.C. **The second creation: makers of the revolution in twentieth century physics**. New Jersey, 1996.
- DARRIULAT, P. The Discovery of the W & Z, a personal recollection. **Eur. Phys. J. C. V.** 34, n. 1, 2004.
- FEYNMANN, R. P.; GELL-MANN, M. Theory os 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**, v. 29, n. 3, p. 415-435, 2007.
- GALISON, P. How the first neutral-current experiments ended. **Rev. Mod. Phys.**, v. 55, n. 2, p. 477, April, 1983.
- GALISON, P. **How experiments End**. Univ. of Chicago Press, Chicago, 1987.
- GLASHOW L. S. Towards a unified theory threads in a tapestry. **Nobel Lecture**, 8 December, 1979.

- Haidt D. The discovery of neutral currents. **Eur. Phys. J. C.**, v. 34, n. 1, 2004.
- Haidt, D.; Pullia, A. The weak neutral current—discovery and impact. **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, September, 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, p. 1-22, 1974.
- HUDSON, R. P. In: **A Century of Excellence in Measurements, Standards and Technology**, editado por D. R. Lide, NIST Special Publication 958, Washington, 2001.
- 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
- LEITE LOPES J. J. **Forty years of first attempt at the eletroweak unification and of the prediction of the weak neutral boson Z<sub>0</sub>**, preprint, CBPF – NF- 022, 1998.
- LEITE LOPES, J. A model of the universal fermi interaction, **Nuclear Physics**, v.8, p.234, 1958.
- MORRISON, M. **Unifying Scientific Theories: Physical Concepts and Mathematical Structures** (pp. I-IV). 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.
- PLEITEZ V. A Física de Partículas Elementares e o Prêmio Nobel de Física de 2008. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.30, n. 4, p. 4301, São Paulo, 2008.
- PRESCOTT C. Weak-Electromagnetic Interference in Polarized Electron-Deuteron Scattering In: HODDESON L.; BROWN L.; RIORDAN M.; DRESDEN M (Eds). **The Rise of the Standard Model**, Cambridge Univ. Press, p.179-198, 1997.
- PRESCOTT et al. Parity non-conservation in inelastic electron scattering. **Physics Letters B**, vol.77, n.3, 1978.
- RIESELMANN. K. **Weak neutral current. Symmetry: dimensions of particle physics.** August 2009 issue of symmetry now online, 2009. Disponível em: <https://www.symmetrymagazine.org/article/august-2009/weak-neutral-current>. Acesso em: 29 jan. 2019.
- ROUSSET, A. The discovery of weak neutral currents. **Nuclear Physics B.**, v. 36, p 339- 362, 1994.

SALAM, A. Gauge Unification of Fundamental Forces. **Nobel lecture**, 1979.

SALAM, A. Unificação das forças fundamentais. In: SALAM, A.; DIRAC, P.; HEINSEBERG, W. **Em busca da unificação**. 1.ed. Editora Gradativa, Lisboa, 1991.

SALAM, A.; DIRAC, P.; HEINSEBERG, W. **Em busca da unificação**. 1.ed. Editora Gradativa, Lisboa, 1991

't HOOFT G. Renormalization of Gauge Theories. In: HODDESON L.; BROWN L.; RIORDAN M.; DRESDEN M (Eds). **The Rise of the Standard Model**, Cambridge Univ. Press, p.179-198, 1997.

UA1 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland. Experimental observation of isolated large transverse energy electron with associated missing energy at. **Physics Letters**, v. 122B, n.1, p. 103, 1983a.

UA1 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland. Experimental observation of lepton pairs of invariant mass around 95 GeV/c<sup>2</sup> at the Cern SPS collider. **Physics Letters**, v. 126B, n.5, p. 398, 1983b.

UA1 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland. Further evidence for charged intermediate vector bosons at the SPS collider. **Physics Letters**, v. 129B, n.3, p. 273, 1983c.

UA2 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland. Evidence for  $Z^0 \rightarrow e^+e^-$  at the Cern collider. **Physics Letters**, v. 129, n.1, p. 130, 1983b.

UA2 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland. Observation of single isolated electrons of high transverse momentum in events with missing transverse energy at the Cern collider. **Physics Letters**, v. 122B, n.5, p. 476, 1983a.

WATKINS, P. **Story of the W and Z**. Cambridge University Press, 1986.

WEINBERG S. The making of the Standard Model. **Eur. Phys. J. C**. v. 34, n. 1, 2004.

WEINBERG, S. Conceptual foundations of the unified theory of weak and electromagnetic interactions. **Review of Modern Physics**, v. 52, n. 3, p. 515, 1980.