

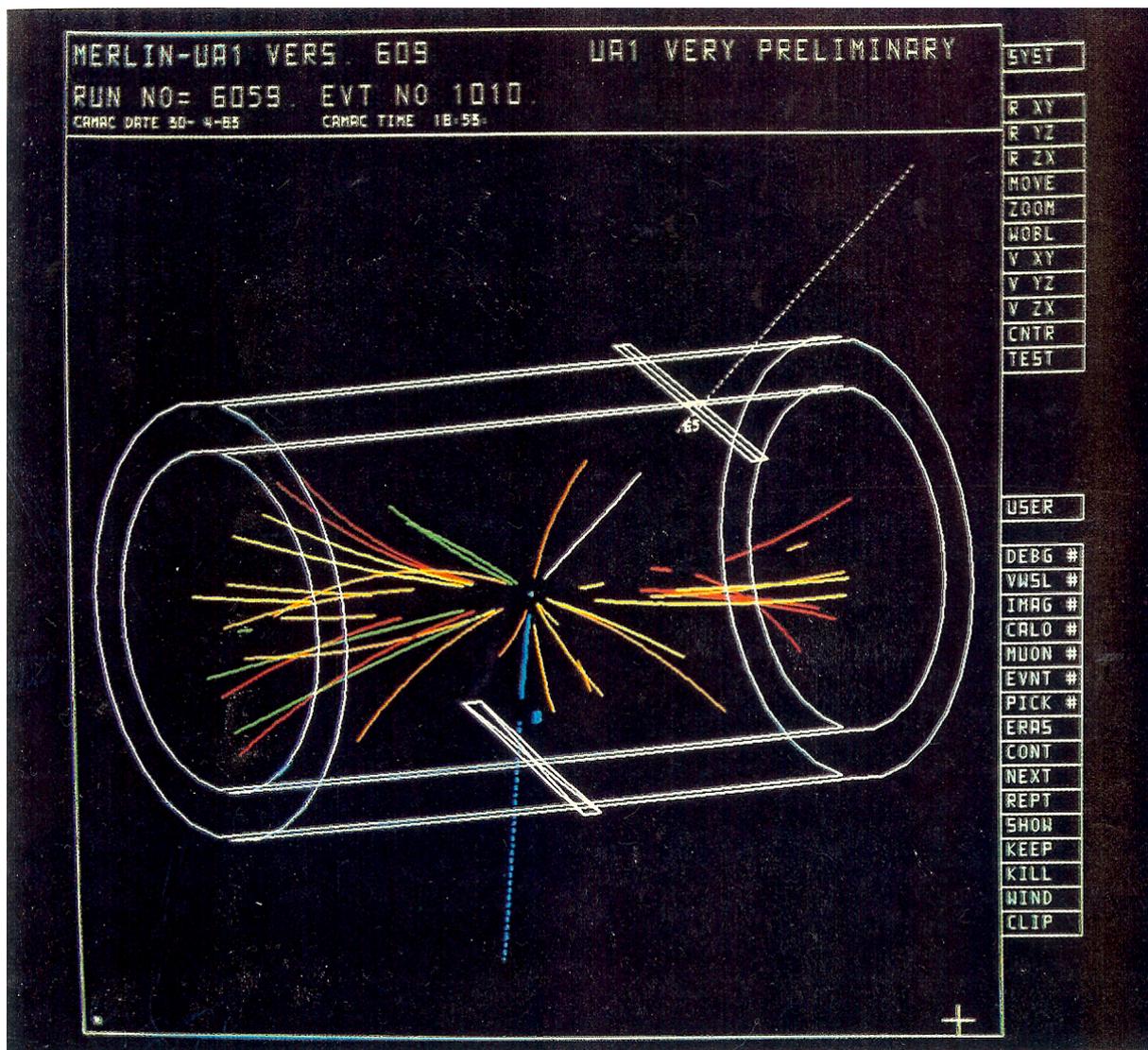
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA

PARTÍCULAS ELEMENTARES:
A PROCURA DAS PARTÍCULAS W E Z.

Aluno: Reinaldo Augusto da Costa Bianchi.

Professor: Gil da Costa Marques.

São Paulo, 1992.



Esta ilustração mostra a primeira observação do bóson Z, gravada no dia 30 de abril de 1983, pelo detector UA1, em um experimento coordenado por Carlo Rubbia. Este gráfico computadorizado mostra as trajetórias das partículas mais energéticas produzidas na colisão frontal de um próton e um antipróton, que foram acelerados à energia de 540 GeV. Muitas partículas são criadas nesta colisão, incluindo o bóson Z, que decai em uma fração de segundo em um elétron e um pósitron (trajetórias azul e branca, respectivamente). A cor da trajetória, que indica a energia da partícula, revela que os produtos do decaimento Z são as partículas mais energéticas. (imagem de HEY, A. J. G. e WALTERS, P. *The quantum universe*. Cambridge, Cambridge University Press, 1987)

INTRODUÇÃO:

Este trabalho é parte integrante do curso de Introdução à Física Moderna, ministrado às quartas e às sextas-feiras do primeiro semestre de 1992, pelos professores Gil da Costa Marques e Álvaro Vanucci, respectivamente.

Neste, procurei dar uma visão geral da teoria vigente acerca das partículas elementares, para relatar depois, a união das forças eletromagnética e nuclear fraca, na teoria eletrofraca, e a descoberta das partículas W^+ , W^- e Z^0 , que confirmaram experimentalmente esta teoria. Finalizo o trabalho com algumas observações pessoais, em uma conclusão.

NOTA DE 2007: Inclui este trabalho em minhas referências bibliográficas, pois foi o primeiro trabalho do qual me orgulho de ter feito. Relendo o mesmo 15 anos depois, ainda gosto dele. Não sejam muito críticos quanto ao texto (foi o primeiro que eu escrevi) e nem quanto a formatação, pois ele foi feito em WordStar para DOS.

UMA VISÃO GERAL DA TEORIA DAS PARTÍCULAS ELEMENTARES.

Introdução:

A física de partículas elementares é o estudo dos constituintes últimos da matéria e suas interações. Nossa compreensão dessas interações, reunida no que é chamado o modelo 'Standart', atingiu um grau de coerência que seria otimista prever há vinte anos. A idéia básica é que as simetrias da natureza dão origem a forças, chamadas forças 'gauge', cuja a teoria é chamada teoria 'Gauge'. Este é o caso para as forças eletromagnéticas, nuclear fraca, nuclear forte e gravitacional, ou seja, todas as forças conhecidas. No caso da força gravitacional, a simetria é a do próprio espaço-tempo, mas para as outras forças a simetria se refere a espaços 'internos', que não são acessíveis aos nossos sentidos. Em distâncias próximas a do raio dos núcleos, a força gravitacional é desprezível se comparada com as outras forças. As interações são descritas pela teoria de campo quântica incorporando o princípio de 'gauge': os quantuns são os fótons, os glúons e os bósons W^+ , W^- e Z^0 . São estes os quantuns que são trocados nas interações entre as partículas materiais, os léptons e os quarks. Existem importantes problemas sem solução dentro do modelo 'Standart', mas a abrangência e a economia desta teoria indica que ela contém os ingredientes essenciais de qualquer teoria mais complexa.

Sabemos que a matéria é constituída por átomos e que os átomos compreendem-se em um núcleo cercado por uma nuvem de elétrons. Por sua vez, o núcleo é formado por prótons e nêutrons, os quais são estruturas complexas feitas de quarks. Os quarks, junto com os léptons, dos quais o elétron é o exemplo mais conhecido, aparentemente são os constituintes últimos da matéria.

Os quarks e os léptons são os férmions fundamentais, isto é, eles possuem spin $1/2$ e obedecem a estatística de Fermi-Dirac. Eles são a substância da qual a matéria é criada e são chamados de partículas materiais. Existem também outras partículas fundamentais chamadas de partículas de campo, que são os portadores das forças entre as partículas materiais. Dessas partículas o exemplo mais conhecido é o fóton, o portador da força eletromagnética. Todas as partículas de campo são bósons e obedecem a estatística de Bose-Einstein.

Os Léptons:

O elétron foi o primeiro dos léptons a ser descoberto, sendo observado por J. J. Thomson em 1897. Ele é de longe a mais leve das partículas carregadas, pesando somente $0.511 \text{ MeV}/c^2$ e aparentemente não possui subestruturas, continuando a ser uma partícula

elementar mesmo após ser estudada em detalhes por quase um século. Sua estrutura interna foi pesquisada mais recentemente no Deutsche Elektron Synchrotron Laboratory, onde feixes de elétrons e pósitrons girando em sentidos opostos em um anel acelerador (PETRA) eram levados a colidir. Cada pósitron e elétron que colidiam possuíam um momento de 24 GeV/c. De acordo com o princípio da incerteza de Heisenberg, a precisão na localização do feixe de partículas é no máximo

$$\Delta x = h/(24 \text{ GeV}/c) = 10^{-17} \text{ metros.}$$

Nenhum efeito de difração foi observado no espalhamento dos elétrons pelos pósitrons e, disso concluímos, que o elétron tem um diâmetro de menos de 10^{-17} metros. O elétron é o único lépton que existe nos átomos de nosso mundo naturalmente.

A teoria de Dirac para o elétron previa a existência de uma antipartícula (o pósitron) tendo todos os números quânticos inversos aos do elétron e tendo a mesma massa deste. Esta previsão é parte integrante de todas as teorias modernas, sendo que, todas as partículas devem possuir uma antipartícula associada. O pósitron foi observado pela primeira vez por Anderson (1933), usando uma câmara de neblina sob um campo magnético.

O próximo membro da família dos léptons, o muon, foi observado pela primeira vez por Carl Anderson e Neddermayer (1937), novamente em uma câmara de neblina. Os muons têm aproximadamente 200 vezes a massa do elétron (massa do muon = $(105.65932 \pm 0.00029) \text{ MeV}/c^2$), possuem a mesma carga e são altamente penetrantes. Eles aparentemente não possuem estruturas internas e são chamados, às vezes, de elétrons pesados. Conversi, Pancini e Piccioni (1937), usaram campos magnéticos para separar muons positivos e negativos; e descobriram que ambos possuem um tempo de vida de aproximadamente 20 microsegundos. Os muons possuem algumas propriedades diferentes das dos elétrons, mas superficialmente, pareciam ser uma duplicação desnecessária dos mesmos. Apesar dos muons serem mais pesados que os elétrons, nunca foi observado o decaimento eletromagnético destes em elétrons e fótons. Isso enfatiza o fato que os léptons, enquanto semelhantes em algumas propriedades, possuem uma propriedade diferente. Por isso, o elétron possui um número leptônico ($L_e = +1$) e o muon outro ($L_\mu = +1$), e estes números leptônicos se conservam, separadamente, em todas as interações, ou seja, o número de léptons menos o número de antiléptons se conserva.

Martin Perl e colaboradores (1975), no Stanford Linear Accelerator Laboratory (SLAC), fizeram a busca bem sucedida de um lépton ainda mais pesado. Eles estudaram a produção de léptons a partir das colisões de elétrons e pósitrons, girando em sentidos opostos em um anel acelerador (SPEAR). Algumas colisões produziram pares de léptons (elétrons e antimuons ou pósitrons e muons) e nenhuma outra partícula carregada. A única explicação

válida para tal observação é que um lépton pesado e sua antipartícula foram produzidos na colisão, e logo após decaíram em um elétron, e seu par em um muon. Foi dado ao novo lépton o nome de lépton τ , sendo este de espécie distinta dos léptons muons e elétrons. A produção do τ somente ocorre quando a energia do centro de massa do elétron mais o pósitron, excede duas vezes a massa do τ . Medidas dessa energia confere ao τ a massa de $(1784.2 \pm 3.2) \text{ MeV}/c^2$, o que faz do lépton τ 17 vezes mais pesado que o muon.

O último lépton conhecido é o neutrino. Eles estão presentes nos raios cósmicos e são emitidos em alguns tipos de decaimentos radioativos (decaimento Beta). O neutrino é uma partícula das mais extraordinárias, que é neutra, não deve ter massa, e viaja à velocidade da luz. Ele interage tão fracamente com a matéria, que a maioria dos neutrinos que atinge a Terra, passa por ela sem interagir. Existem vários tipos de neutrinos, cada tipo associado com um lépton carregado. Os neutrinos do elétron e do muon estão bem determinados, e o neutrino do tau também existe. Nunca se observou a conversão de neutrino de um tipo para outro.

A lista dos léptons está completa. Existem três espécies distintas de léptons. Cada espécie se compõe de um lépton carregado, seu neutrino e ambas antipartículas. Todos os léptons são partículas puntiformes, férmions com spin meio, que interagem através das forças eletromagnética (se carregado) e nuclear fraca. Existe a conservação de cada espécie de lépton (elétrons, muons e taus) separadamente. Os léptons mais pesados podem decair em léptons mais leves, somente se neutrinos também forem produzidos para propiciar a conservação dos números leptônicos separadamente. As pesquisas mais recentes não revelaram a existência de nenhum outro lépton de massa menor que $20 \text{ GeV}/c^2$.

Os Quarks:

As evidências para a existência dos quarks não são diretas como as para a existência dos léptons, porque nenhum quark livre jamais foi observado. As evidências para a existência dos quarks e o estudo de suas propriedades, vêm do estudo de partículas que interagem fortemente, chamadas hadrons.

Os hadrons possuem conjuntos que, além de terem a paridade do spin idênticos, possuem massas próximas e interagem fortemente, quase igualmente. Um desses conjuntos é o dos bárions, dos quais o próton é um exemplo, que têm spin meio e obedecem à estatística de Fermi-Dirac. Outro conjunto, é o dos mésons, que têm spin inteiro e obedecem à estatística de Bose-Einstein. Um componente deste conjunto é o meson π .

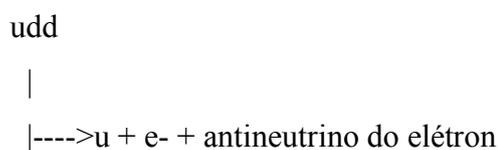
Gell-Mann (1964) e Zweig (1964) sugeriram que todos os hadrons deveriam ser feitos

de subestruturas de férmions puntiformes de spin 1/2, os quais Gell-Mann batizou de quarks. Nessa época, supunha-se que esses existiam em três espécies, às quais foram dados os nomes de up (u), down (d) e strange (s). Todos os bárions são constituídos por três quark e, todos os mésons por um par de quark-antiquark. No estado de mais baixa energia, que corresponde aos hadrons de menor massa, espera-se que os quarks tenham o momento angular orbital relativo igual a zero. Os spins totais dos hadrons são determinados pelos alinhamentos dos spins dos quarks que os constituem.

Na época em que a idéia dos quarks surgiu, Gell-Mann pode prever através dela, a existência do hyperon Ω , pois ele notou que cada troca de um quark up ou down, por um strange, fazia com que a massa do bárion aumentasse de aproximadamente $140 \text{ MeV}/c^2$. Previu, então, que o hyperon Ω^- teria uma massa de aproximadamente $1680 \text{ MeV}/c^2$. Logo após a previsão, Barnes e colaboradores (1964) observaram a produção e o decaimento do Ω^- , durante a exposição de uma câmara de bolhas cheia de hidrogênio líquido a um feixe de mésons K^- , de momento de $6 \text{ GeV}/c$. A massa medida para o Ω^- foi de $1672.45 \text{ MeV}/c^2$, concordando com o valor previsto.

As maiores evidências da existência dos quarks provém de experiências chamadas de espalhamento inelástico profundo. Essas experiências começaram a ser realizadas, no final da década de 60, no Stanford Linear Accelerator Laboratory (SLAC), devido ao advento dos feixes de elétrons de $20 \text{ GeV}/c$. Nessas colisões extremamente energéticas, o elétron cede sua energia e momento para o fóton virtual (quantum da energia eletromagnética trocado), cujo espalhamento devido à colisão com um bárion, ocorre igualmente em uma grande variação angular. Isto indica que o espalhamento está ocorrendo de pequenos objetos pontuais que se encontram dentro do bárion. Experimentos seguintes mostraram que esses objetos, que são no mínimo 100 vezes menores que o bárion, são férmions de spin 1/2, e que existem três desses objetos por bárion. Essas subestruturas foram então, confiavelmente identificadas como sendo os quarks.

Levando em conta a existência dos quarks, novas teorias para as interações nucleares foram propostas. Por exemplo, o decaimento beta dos hadrons, é agora visto como o decaimento de um dos quarks que o compõe. Para o nêutron, um quark down decai na forma:



que a nível dos hadrons fica:

$n \rightarrow p + e^- + \text{antineutrino do elétron}$.

Existem hoje cinco tipos (ou sabores) de quarks bem conhecidos e um tipo que se começa a conhecer agora (top). Suas cargas e suas massas em MeV/c^2 são, atualmente:

Carga = $+2/3$: Up ($m = 10$) Charm ($m = 1300$) Top ($m > 40000$)

Carga = $-1/3$: Down ($m = 10$) Strange ($m = 150$) Bottom ($m = 4200$)

Além disso, os quarks possuem um número quântico chamado cor, que pode assumir três valores distintos (vermelho, amarelo e azul) em adição ao spin e ao sabor (up, down, ...). Este número quântico foi proposto por Greenberg (1964) para restaurar a antissimetria da função de onda do bárion Δ^{++} , a qual violava o princípio de Pauli. Chegamos, finalmente, ao número de quarks que se acredita hoje existir: são 36 quarks e antiquarks.

Os bósons e suas forças:

Como a força eletromagnética nos é familiar, nós a usaremos para introduzir a idéia de forças ocorrendo através da troca de bósons de campo. Como exemplo, vamos considerar o espalhamento Coulomb de elétrons por um núcleo, o qual pode ser tratado como uma carga Ze pontual e imóvel. Os elétrons incidentes e os que saírem, podem ser descritos na mecânica quântica como ondas planas. O potencial de espalhamento é:

$$V(r) = -Ze^2 / r$$

Em cálculos realizados usando a mecânica quântica, a amplitude da intensidade de espalhamento é a integral, em todos os pontos do espaço, das contribuições vindas do potencial de espalhamento. Em uma contribuição individual do potencial no ponto \mathbf{r} , temos o elétron recebendo o impulso exatamente no ponto \mathbf{r} . Esta contribuição pode ser interpretada como a emissão de um fóton de quadri-momento q pelo núcleo, que se propaga até \mathbf{r} , onde é absorvido pelo elétron. A troca de fótons ocorrida, é então, a responsável pela força entre o elétron e o núcleo, nessa interpretação.

Existe uma importante ligação entre a forma do potencial Coulombiano e o fato do fóton não possuir massa, a qual veremos agora. Partimos da observação de que a emissão ou a absorção de um fóton real por uma partícula livre, é inconsistente com a lei de conservação

da energia ou do momento, pois esta nos mostra que após a emissão, o núcleo e o fóton devem viajar em sentidos opostos. Assim, o momento do fóton é contrário ao momento do núcleo (ou elétron) e a conservação de energia não pode ser alcançada, porque:

$$m \quad (m^2 + p^2) + p.$$

Contudo, quando o fóton é reabsorvido, os equilíbrios de energia e momento podem ser restaurados. Este fato contradiz as idéias clássicas, mas é consistente com a mecânica quântica, desde que o tempo entre a emissão do fóton e sua absorção, seja breve o suficiente para satisfazer o princípio da incerteza. Se o fóton existir somente por um curto período de tempo, t , entre a emissão e a absorção, então a precisão com a qual a energia pode ser definida é sujeita à uma imprecisão da ordem de $\hbar/2\pi t$. Por isso, uma energia $\hbar/2\pi t$ pode ser "emprestada" por um curto período t . Como os fótons não possuem massa, eles podem ter uma energia arbitrariamente pequena e, t , pode ser arbitrariamente longo. Com isso, a distância que o fóton pode viajar, que é o alcance da força eletromagnética, pode ser infinita, e o potencial Coulombiano também pode ser infinito.

Devemos ressaltar aqui, que a conservação do momento e da energia, só pode ser alcançada se o fóton possuir uma massa diferente de zero. Um fóton trocado é então chamado de virtual, porque ele possui massa diferente de zero e um tempo de existência efêmero. A relação de incerteza pode ser usada, agora, para calcular o tempo próprio para o qual uma partícula virtual pode existir com a energia e o momento do sistema "desequilibrados". Temos que

$$t = \hbar / 2\pi m,$$

onde m é a massa do bóson. Esta relação implica que as forças possuem um alcance finito.

As propriedades fundamentais e o alcance limitado da força nuclear forte, é explicado por uma teoria Gauge para esta força, chamada Cromodinâmica Quântica. Esta teoria visualiza a interação forte entre os quarks, como sendo a troca de oito glúons. Apesar destes glúons não possuírem carga elétrica, eles possuem uma carga de cor. Existem oito cores para os oito glúons e oito anticores para os oito antiglúons. Em uma interação, um quark pode mudar de cor, desde que esta seja acompanhada por uma emissão de um glúon. A força nuclear forte é então vista como o sistema de interações necessárias para que todos os hadrons permaneçam brancos (ou seja, que a combinação das cores em um hadron seja tal que o resultado seja branco, quer pela mistura de três cores primárias, quer pela mistura de uma cor e uma anticor), apesar das cores estarem se movendo entre os quarks.

Observações diretas da existência dos glúons vêm da observação de experiências de colisões entre partículas. Nas colisões energéticas, um par de quark-antiquark pode ser criado.

Quando um quark e um antiquark criados, movem-se em direções opostas, a força de cor entre eles cresce até que seja suficiente para criar um novo par de quark-antiquark. No final do processo, o que se observa, são dois jatos de partículas em direções opostas, cada jato proveniente de um dos quarks originais. Este processo é chamado de "vestir" os quarks. Em experiências usando a colisão de elétrons e pósitrons, Brandelik (1979), Barber (1979) e Berger (1979), observaram processos onde três jatos de partículas emergiam. Nestas experiências, a única explicação para a origem dos três jatos, requer que o quark ou o antiquark tenha emitido um glúon.

Outra evidência da existência dos glúons, foi encontrada quando se mediu o momento total carregado pelos quarks dentro de um núcleon. Descobriu-se então, que os quarks carregam apenas metade do momento do núcleon e, que a outra metade é carregada pelos glúons. Ficou evidente também, que os glúons não foram detectados dentro de núcleons, anteriormente, somente porque estes são neutros, não interagindo com o fóton em experiências de espalhamento Coulombiano.

Os bósons de campo da força nuclear fraca são os bósons-W e o bóson-Z zero. Estes, constituindo o tema principal do trabalho, serão tratados na próxima parte.

A UNIFICAÇÃO DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICA E NUCLEAR FRACA: O SURGIMENTO DOS BÓSONS W E Z.

A Força eletromagnética:

As interações elétricas e as magnéticas foram unificadas com êxito por James C. Maxwell. A seguir, suas previsões da existência de ondas eletromagnéticas viajando à velocidade da luz foram verificadas por H. Hertz (1888).

Uma grande mudança ocorreu na teoria eletromagnética, quando Einstein (1905), para explicar o efeito fotoelétrico, supôs que a energia de um feixe luminoso percorre o espaço concentrada em pacotes, os fótons. Com isso, ele conseguiu explicar as características desse efeito e recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1921.

Ao aplicar a teoria eletromagnética aos átomos, os efeitos do princípio da incerteza (já vistos neste trabalho), da Teoria da Relatividade e outros efeitos quânticos, não podem ser ignorados. Nos anos 40, uma teoria eletromagnética completa foi construída por Richard Feynman, Sin-itiro Tomonaga e Julian Schwinger. Esta teoria, chamada Eletrodinâmica Quântica (QED), tem sido bem sucedida em prever vários fenômenos eletromagnéticos e, sua concordância, entre a teoria e os experimentos, é melhor que uma parte em 10 elevado a 10. Hoje, a QED é a mais precisa teoria em física.

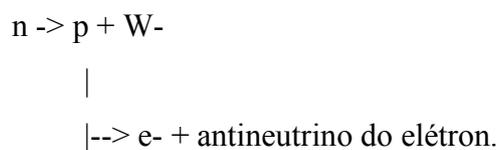
A Força Nuclear Fraca:

A força nuclear fraca é a responsável por vários passos do processo no qual o Sol gera energia. No decaimento radioativo de um núcleo que produz uma partícula Beta, a força fraca é a responsável pela quebra do neutron, que é geralmente estável, e que decai em um próton, um elétron (que é chamado então de partícula Beta) e um antineutrino. Sabe-se, hoje, que esta mesma força fraca é responsável por vários outros decaimentos, incluindo o decaimento de um muon em, um elétron, um antineutrino e um neutrino.

Experimentos detalhados mostraram que a força nuclear fraca interage com todas as partículas e que possui um alcance muito curto, de apenas 10^{-17} metros. Uma consequência deste curto alcance, é o fato de que, a reação de captura de elétrons por um núcleon, ocorre somente quando um elétron sobrepõe-se ao núcleo. E a maneira mais natural de explicar o curto alcance desta força, é assumir que o quantum da força é muito pesado. A massa deste bóson, chamado W, pôde ser estimada em cerca de 100 vezes a massa do próton. Além disso, para explicar o decaimento Beta e outras interações fracas, esse bóson deve existir em dois

estados: carregado positiva e negativamente. Em 1957, descobriu-se que as partículas Beta, geradas no decaimento do núcleo de cobalto, eram emitidas, preferencialmente, na direção do spin nuclear. Este foi o primeiro exemplo onde uma reação violava a paridade (a paridade é a propriedade das funções de ondas que determina o comportamento destas, quando todas as coordenadas espaciais são invertidas em direção). Trabalhos posteriores, mostraram que a violação da paridade só ocorre nas interações fracas e que, para estas, a violação era a mais intensa possível. Uma das consequências da violação da paridade é que todos os neutrinos têm o spin apontado no sentido inverso da sua direção de movimento.

Nós sabemos que um fóton virtual, que não possui carga, é o portador da força eletromagnética. Contudo, todas as interações conhecidas da força nuclear fraca, até então, envolviam a troca de um bóson W com carga. Devido a este fato, uma partícula ao emití-lo troca a sua carga. Por exemplo, o decaimento de um neutrão, em um próton, um elétron e um antineutrino pode ser visto, introduzindo o bóson W⁻, como:



Essas interações, onde há troca de cargas, são conhecidas como interações fracas de corrente carregada. Enquanto não existisse exemplos de ocorrências de interações fracas de correntes neutras, onde não há troca de cargas, não parecia possível que as forças eletromagnética e nuclear fraca pudessem ser unificadas em uma só teoria.

Durante as décadas de 50 e 60, esforços extensivos foram realizados para se identificar um exemplo de interação fraca de corrente neutra. Foi dado o nome de bóson Z para a partícula mediadora desta interação. Esta procura era quase exclusivamente a procura do decaimento de um kaon neutro, em dois muons, pois esta era considerada a maneira ideal de se identificar uma corrente neutra, visto que esta reação não poderia ser intermediada por um fóton. Após anos de pesquisa, nenhum decaimento foi observado, de onde se concluía que as correntes neutras certamente não existiriam. Porém, no ano de 1973, um grupo de físicos do CERN, usando uma grande câmara de bolhas cheia de freon e exposta a feixes de neutrinos e antineutrinos, identificaram a primeira evidência de uma interação de corrente neutra: todas as interações conhecidas do neutrino do muon o convertiam em um muon, em uma interação de corrente carregada com a troca de bósons W. Nas fotografias da câmara de bolhas, foram descobertas interações dos neutrinos que não produziam um muon. Depois de checagens extensivas, confirmou-se a esperada interação fraca de corrente neutra.

Da procura pelas interações de corrente neutra, uma questão ficou pairando no ar. Como interpretar a não observação de correntes neutras durante os anos de cuidadosos

experimentos com o decaimento do kaon? Esta questão foi respondida por Glashow, Iliopolos e Maiani (1974), que introduziram um quarto quark ainda não observado, o charm, que fazia o decaimento do kaon em muons desaparecer por cancelamento quase direto, impedindo este de ocorrer. Em novembro de 1974, dois laboratórios americanos encontraram uma nova partícula chamada de J/Ψ . Esta foi a primeira partícula a ser detectada a conter um quark charm. As interações fracas de corrente neutra finalmente puderam ser compreendidas. O caminho para a unificação das forças eletromagnéticas e nuclear fraca estava aberto.

A Teoria Eletrofraca:

A mais importante diferença entre a teoria eletromagnética e a teoria a ser construída, é que os quantuns de força agora têm massa. Para incluir este fato na teoria, sem destruir a invariância gauge local (que permite escolher diferentes origens para as ondas em cada ponto espacial e temporal, e sem a qual não é possível unificar as duas forças), Higgs (1964) introduziu na teoria, um mecanismo que supre massa para os bósons de campo, mas que requer a quebra espontânea da simetria. Este mecanismo requer a adição de quatro novas partículas escalares sem massa na teoria, chamadas de bósons de Goldstone. Através deste mecanismo, é provida a massa para os bósons W^+ , W^- e Z zero, sem destruir a simetria, e ainda sobra uma partícula observável chamada de bóson Higgs, que ainda não foi observada, e que deve ter spin zero e carga nula.

Em 1979, S. Glashow, A. Salam e S. Weinberg, ganharam o Prêmio Nobel de Física por suas contribuições para a construção de um modelo standart para a teoria eletrofraca. Esta contém dois bósons com carga, os W^+ e W^- , e dois bósons neutros.

Até agora, descreveu-se a força nuclear fraca como se ela interagisse com uma carga fraca. Porém, em uma inspeção detalhada, encontramos dois tipos de cargas fracas, conhecidas como isospin fraco e hipercarga fraca. Com isso, a força fraca age através de dois tipos diferentes de portadores: os bósons W , que podem carregar carga elétrica e devem ocorrer nos estados W^+ , W^- e W zero, são os portadores da força de isospin fraco; e uma nova partícula chamada bóson B , que não carrega carga elétrica, é o portador da força de hipercarga fraca. Nenhuma partícula possui a hipercarga fraca nula, portanto, o B zero interage com todas.

O resultado final mais importante desta teoria é obtido quando se percebe que os bósons W zero e Z zero não aparecem na natureza em seu estado "puro", mas aparecem misturados para produzir o fóton e o Z zero. A mistura é dada por:

$$Z \text{ zero} = W \text{ zero} \cdot \cos(\text{TETA}_w) - B \cdot \sin(\text{TETA}_w)$$

$$A = W \text{ zero} \cdot \sin(\text{TETA}_w) - B \cdot \cos(\text{TETA}_w),$$

onde TETA_w é o ângulo de mistura de Weinberg. O bóson A, desprovido de massa por motivos da densidade de energia do campo, é o fóton. Ainda temos como resultado desta teoria unificada, que o fóton e o Z zero tais como aparecem na natureza, são uma mistura íntima das interações eletromagnéticas e fraca de corrente neutra.

O valor do ângulo de Weinberg vem sendo gradualmente determinado, e com os valores existentes hoje, características detalhadas dos bósons W^+ , W^- e Z zero, podem ser previstas pela teoria eletrofraca.

Previsões teóricas das características do W e Z:

Inicialmente, as massas dos bósons W^+ , W^- e Z zero, podem ser previstas pela teoria unificada eletrofraca em termos da quantidade conhecida TETA_w , o ângulo de Weinberg. As previsões grosseiras, que não levam em conta a auto-interação que eles sofrem, conferem para os bóson W^+ e W^- , aproximadamente, $78 \text{ GeV}/c^2$, e para o Z zero é de $89 \text{ GeV}/c^2$. Essas massas estão perto de 100 vezes a massa do próton. Sabendo essas massas, pode-se calcular a velocidade de decaimento desses bósons, que por serem extremamente massivos, é de menos de 10^{-24} segundos.

O bóson Z zero é neutro, e por isso ele deve decair em um par de lépton-antilépton. Os decaimentos mais característicos devem ser, em um elétron e um pósitron ($Z \text{ zero} \rightarrow e^- + e^+$), e em um muon e um antimuon ($Z \text{ zero} \rightarrow \mu^+ + \mu^-$). Apesar do muon ser mais pesado que o elétron, ambos possuem uma massa desprezível se comparadas com a massa do Z zero. Por isso, espera-se que estes decaimentos emitam as partículas com enorme energia, pois toda energia de repouso do Z zero lhes é transmitida, e que elas sejam emitidas em sentidos opostos, para conservar o momento. Só relatamos as previsões de decaimentos em léptons, pois estes são a melhor maneira de identificar o Z zero, visto que eles raramente ocorrem em colisões entre quarks e antiquarks, que serão usadas para tentar encontrá-lo.

Os decaimentos dos bósons W são muito mais fáceis de identificar, porque os decaimentos em léptons requerem a conservação de carga e de número leptônico, uma vez que eles só interagem através do isospin fraco. Por isso, os bósons W só podem decair em membros de uma mesma família leptônica. Por exemplo, o W^- pode decair em um elétron e um antineutrino do elétron, em um muon e seu respectivo antineutrino, ou em um tau e seu respectivo antineutrino. Os decaimentos do W^+ são obtidos invertendo as partículas com suas antipartículas. Para identificar esses decaimentos, é utilizada a conservação do momento na

análise das partículas resultantes da colisão, pois o neutrino não pode ser detectado.

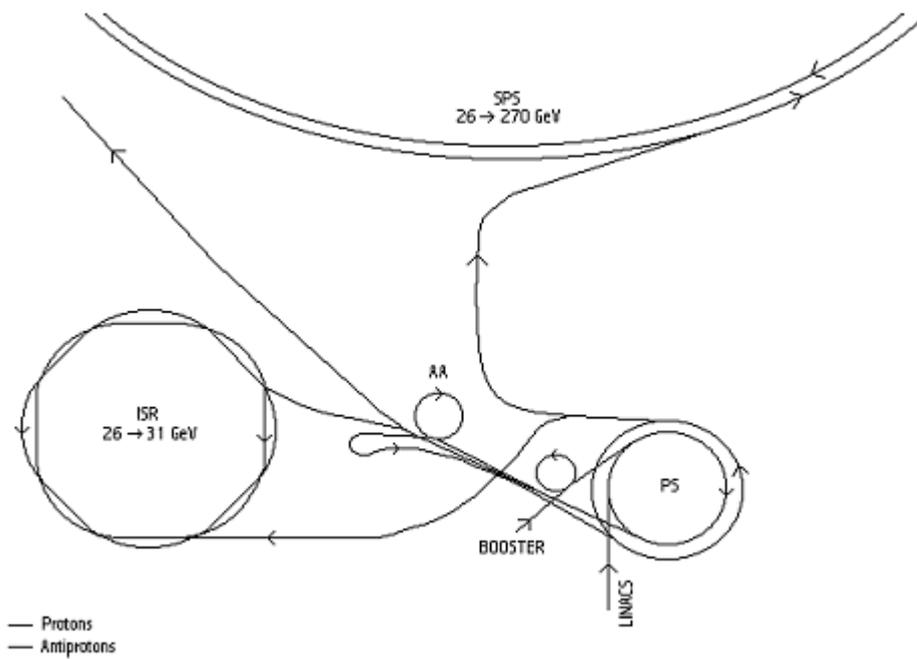
Cálculos para a taxa de produção dos bósons W e Z, indicaram que em 10 milhões de colisões de prótons e antiprótons, de energia igual a 540 GeV, apenas um decaimento do W deve ser esperado. Para o Z, previu-se uma taxa 10 vezes menor. Está claro que seria necessário aceleradores e detectores trabalhando continuamente durante meses, para detectar-se alguns eventos envolvendo os W e o Z. Os aceleradores, os detectores de partículas e as pessoas envolvidas na procura desses bósons são o assunto da próxima parte.

A DESCOBERTA DOS BÓSONS W E Z.

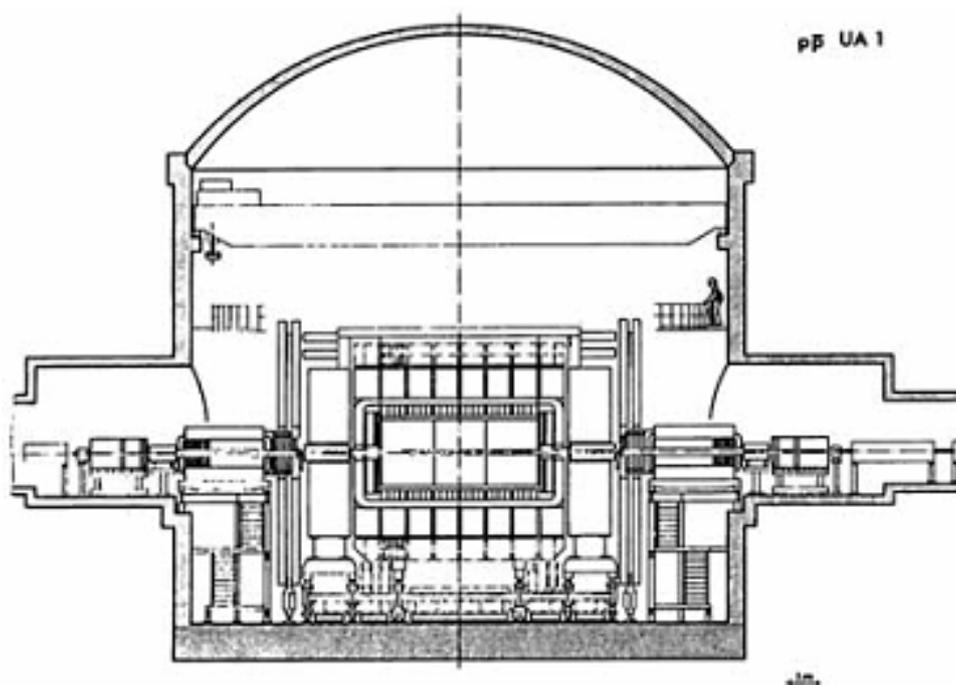
Em 1977, Rubbia, McIntyre e Cline, propuseram o uso do acelerador Super Proton Synchrotron (SPS) existente no CERN, para acelerar ao mesmo tempo, prótons e antiprótons, girando em sentidos contrários, pois quando estes feixes fossem levados a colidir, a energia gerada seria suficiente para produzir os bósons da força fraca.

O SPS é um acelerador de 2.2 quilômetros de diâmetro, localizado na fronteira da França com a Suíça. Ele iniciou suas operações em 17 de junho de 1976, e conseguiu acelerar prótons à energia de 500 GeV. O projeto original foi modificado para acelerar simultaneamente prótons e antiprótons, à maior energia possível. Os antiprótons são obtidos com a colisão de prótons de 26 GeV com um alvo metálico, na taxa de 10 milhões, a cada 2.4 segundos. Estes antiprótons são acumulados em um anel magnético, girando com um momento de 3.5 GeV/c. Este acúmulo foi possível graças ao processo de resfriamento estocástico do feixe, criado por Simon van der Meer (1972). Após algumas horas, com o resfriamento estocástico sendo aplicado aos antiprótons que incidem no acumulador a cada 2.4 segundos, o número de partículas que podem ser acumuladas chega ao máximo. Então, estas partículas são concentradas em um denso feixe para, após 40 horas do início da operação, serem usadas no SPS.

Para as operações de colisão, os antiprótons que estão no acumulador são injetados em um síncrotron de prótons (PS), onde são acelerados a uma energia de 26 GeV, e depois injetados no SPS. Logo após, prótons, que podem ser gerados em alguns



Visão esquemática do fluxo de prótons e antiprótons em operações de colisões no complexo acelerador do CERN.



Uma visão lateral do detector UA1 instalado no túnel do SPS. Os partículas que saem, atravessam o Detector Central, os calorímetros Eletromagnético e Hadrônico, e o Detector de Muons.

segundos, são acelerados inicialmente em um acelerador linear (LINAC), e injetados no PS para serem acelerados à energia de 26 GeV. São então injetados no SPS em sentido contrário ao dos antiprótons. Quando os prótons e os antiprótons estão no SPS, ambos são acelerados a uma energia de 270 GeV, e são mantidos nessa energia por campos magnéticos. Essas partículas podem ser usadas agora em colisões, que são feitas em dois pontos principais, onde os detectores UA1 e UA2 se encontram.

O detector UA1, cujo projeto foi responsabilidade de Carlo Rubbia, possui no centro, uma câmara que grava a trajetória de partículas carregadas, chamada de Detector Central. Este contém mais de 6000 fios, mantidos a 30000 volts, imersos em gás, que recebem os elétrons produzidos na ionização do gás pela passagem de uma partícula carregada, cuja trajetória pode ser reconstruída a partir dos sinais elétricos no detector. Este detector está cercado pelos Calorímetros Eletromagnéticos centrais, que detectam chuviscos eletromagnéticos produzidos na passagem de partículas. Um campo magnético uniforme de 7000 Gauss, necessário para a identificação das partículas, é gerado sobre os detectores centrais pela passagem de 10000 amperes por um eletromagneto de alumínio de 800 toneladas. A capa externa do magneto, feita de ferro, também é usada como parte de um Detector de Hadrons, que também ocupa parte da área central do detector. Para detectar partículas que saíssem da colisão em um ângulo pequeno em relação ao feixe, detectores parecidos com os descritos foram instalados nas laterais dos detectores centrais e, a 25 metros do ponto de interseção, outros detectores para medir ângulos muito pequenos também foram instalados. O Detector de Muons consiste na camada externa do UA1, pois os Muons são muito penetrantes.

Como o número de colisões que ocorrem é muito grande, equipamentos eletrônicos instalados no próprio detector selecionam os eventos mais importantes (que são os mais energéticos), e gravamos dados em fitas magnéticas. Através destes dados, computadores reconstróem o resultado da colisão e criam uma imagem desta, contendo o número de informação desejada. Esta imagem é então analisada por físicos, em um terminal gráfico, onde ela pode ser manipulada para melhor compreensão da colisão.

A construção do detector UA1, que pesa mais de 2000 toneladas e envolveu enorme quantidade de pessoas, terminou em 1981. A procura experimental dos bósons W e Z começava.

Em 1982, mais de 1 bilhão de colisões ocorreram no detector UA1. Um milhão destas colisões foram gravadas, e mais de 150 mil foram totalmente reconstruídas. Em dezembro, 6 candidatos para o decaimento W haviam sido encontrados. Em 25 de janeiro de 1983, o CERN, em uma coletiva com a imprensa, anuncia a descoberta do bóson W. Dos 6

candidatos, 5 eram claramente inconsistentes com qualquer outro processo de decaimento conhecido. A teoria eletrofraca estava confirmada.

Depois de mais de 1 bilhão de colisões, 9 candidatos ao decaimento W tinham sido encontrados (5 no UA1 e 4 no UA2), mas nenhum candidato para o decaimento do bóson Z zero tinha sido encontrado. Isso era frustrante. Mas, como a teoria previu que estes têm sua taxa de produção 10 vezes menor que a dos bósons W , não era totalmente inesperado. Em 12 de abril de 1983, após um período de descanso e revisão, o experimento voltou a procurar candidatos aos W e Z zero.

Em 4 de maio de 1983, o primeiro candidato ao decaimento do Z zero foi encontrado, na análise de uma colisão ocorrida no dia 30 de abril. Finalmente, a primeira indicação que o 'fóton pesado' existe. Pessoas lotaram a área em volta do monitor. Havia duas trajetórias retilíneas, de partículas com cargas opostas, em sentidos opostos, fazendo um grande ângulo com o feixe incidente. As energias dessas partículas gravada pelo Calorímetro Eletromagnético eram as maiores. Verificando as energias nos calorímetros de Hadrons e Muons, verificou-se que as partículas eram um elétron e um pósitron. Após checagens cuidadosas, confirmou-se a primeira observação do decaimento de um bóson Z zero.

Mais dois candidatos ao decaimento da partícula Z zero em elétron e pósitron, e um candidato ao decaimento do Z zero ao par muon-antimuon, foram observados. No dia 10 de julho de 1983, o CERN anuncia formalmente a descoberta do bóson Z zero. No total, foram descobertos 94 candidatos aos bósons W^+ e W^- , e suas massas experimentais calculadas em $(82.1 \pm 1.7) \text{ GeV}/c^2$. Foram encontrados 13 bósons Z zero, de massa calculada $(93.0 \pm 1.1) \text{ GeV}/c^2$. Ambas as massas concordam com as previsões da teoria eletrofraca.

O último resultado concreto das experiências de colisão de prótons e antiprótons foi anunciado no dia 3 de julho de 1984 pelo CERN: após checagens intensivas, 6 eventos consistentes com o decaimento de um bóson W em um top quark foram observados no UA1. A massa deste top quark foi calculada entre 30 e 50 GeV/c^2 .

CONCLUSÃO

Devido às suas contribuições decisivas para o projeto que levou à descoberta das partículas de campo da força eletrofraca, Carlo Rubbia e Simon van der Meer, em 14 de outubro de 1984, receberam o Prêmio Nobel de Física.

O mais importante objeto de pesquisa, hoje, é a partícula Higgs. Procura-se verificar a sua existência e, se existir, suas propriedades, para poderem ser realizadas novas checagens experimentais da teoria eletrofraca.

Nas energias existentes hoje, os quarks e os léptons, que estão ligados em três gerações de partículas fundamentais, aparentemente não possuem subestruturas. Todas as partículas conhecidas são léptons ou Hadrons, os quais são compostos por quarks, e as forças entre eles são portadas pelos fótons, glúons e pelos bósons W e Z . Com a unificação das forças eletromagnética e nuclear fraca, temos hoje apenas três tipos de interações, as quais se tentam unificar.

Os modelos standart para as forças existentes hoje, explicam muitas propriedades da estrutura da matéria. Porém, muitas questões continuam sem resposta, por exemplo: por que as cargas do próton e do elétron são da mesma magnitude? Por que existem várias gerações de léptons e quarks? Existe um número elevado de constantes fundamentais de origem obscura: as massas dos léptons e dos quarks, as constantes de acoplamento das forças fraca, forte e eletromagnética, o ângulo de Weinberg e a massa do bóson Higgs, se é que ele existe. Quais são, neste contexto, as possibilidades de aprimorarmos o nosso entendimento acerca da natureza? Algumas novas teorias para responder essas perguntas são a Grande Unificação, a Supersimetria e os novos modelos cosmológicos. Todas estas teorias estão sob investigação experimental, seja na verificação da existência do decaimento de prótons, na procura da partícula Higgs ou na procura de ondas gravitacionais. Devemos ter em mente, porém, que uma teoria completa ainda está por vir.

BIBLIOGRAFIA

- HALZEN, F. e MARTIN, A. D. *Quarks and Leptons: An introductory course in modern particle physics*. Nova York, John Wiley & Sons, 1984.
- HEY, A. J. G. e WALTERS, P. *The quantum universe*. Cambridge, Cambridge University Press, 1987.
- KENYON, I. R. *Elementary Particle Physics*. Londres, Routledge & Kegan Paul, 1987.
- RIORDAN, M. *The Hunting of the Quark*. Nova York, Touchstone, 1987.
- RUBBIA, C., VAN DER MEER, S. e CLINE, D. "Search for Intermediate Vector Bosons".
Revista Scientific American, março de 1982.
- WATKINS, P. *Story of the W and Z*. Cambridge, Cambridge University Press, 1986.
- WEISE, W. *Quarks and Nuclei*. Philadelphia, World Scientific, 1984.