



A Luz a partir do campo e da partícula de Higgs (Light from Higgs' particle)

J.A. Helayël-Neto* and L.P.R. Ospedal†

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), Rua Dr Xavier Sigaud 150, Urca, Rio de Janeiro, Brazil, CEP 22290-180

Nesta contribuição, o esforço consiste em explicitar e discutir o papel central do campo de Higgs no estabelecimento do setor eletromagnético na Teoria Unificada Eletrofraca. Propriedades intrínsecas como as cargas elétricas e as massas das partículas carregadas (léptons e quarks) e o aparecimento do bóson vetorial neutro de massa nula, identificado como o fóton, emergem a partir do momento em que o campo de Higgs estabiliza todo o sistema eletrofraco e dá origem à excitação física correspondente ao bóson de Higgs. A ideia principal é mostrar o preponderante papel do setor de Higgs na constituição do fenômeno luminoso.

Palavras-chave: Partícula de Higgs.

In this contribution, the effort is to explain and discuss the central role of the Higgs field in the establishment of Electromagnetism in the Electroweak Unified Theory. Intrinsic properties as electrical charges and masses of charged particles (leptons and quarks) and the appearance of the vector boson with neutral zero mass, identified as the photon, emerge from the moment in which the Higgs field stabilizes the whole electroweak system and gives rise to the corresponding physical stimulation which is known as the Higg's boson. The main idea is to show the leading role of such a boson in the constitution of the luminous phenomenon.

Key words: Higgs' particle.

I. INTRODUÇÃO

A Física contemporânea descreve os fenômenos naturais em termos de quatro interações fundamentais que, para efeitos de compreensão num contexto mais próximo da Física Newtoniana, podemos pensar como sendo descritas por campos de forças. A força gravitacional e a eletromagnética são as interações fundamentais que se fazem sentir no mundo macroscópico, inclusive em escala humana. As outras duas, a força nuclear forte e a força nuclear fraca, não se revelam em escala macroscópica. Aparecem apenas em escala subatômica - na verdade, como o nome indica, nas escalas nuclear e subnuclear,

portanto a distâncias tão pequenas ou ainda menores que o décimo do trilionésimo do centímetro ($10^{-13}cm$), o que corresponde ao centésimo de milésimo da escala atômica ou à milionésima parte da nanoescala.

A força gravitacional é a responsável pelos movimentos planetários e pela organização da estrutura em larga escala de nosso Universo. A força eletromagnética é a interação que responde pela formação dos átomos, pelas ligações moleculares e pelos processos biológicos fundamentais, por exemplo. Já a força nuclear forte responde pela coesão dos prótons e dos nêutrons no interior dos núcleos atômicos e pela ligação dos quarks no interior dos hádrons; finalmente, a interação nuclear fraca é a responsável pelos processos radioativos, em que núcleos atômicos instáveis decaem e emitem partículas.

Cada um destes campos de força é descrito por uma teoria. A força gravitacional, em sua escala macroscópica, é descrita pela Mecânica Newtoniana, sempre que as velocidades envolvidas forem baixas se comparadas à velocidade da luz; ainda em escala macroscópica, e mesmo cosmológica, mas no regime em que fenômenos relativísticos começam a operar, a descrição do campo gravitacional fica a cargo da Teoria da Relatividade Geral. A descrição microscópica da gravitação, que constitui o que se chama na literatura de Gravitação Quântica, é um campo

* J.A. Helayël-Neto possui PhD em Física pelo International School for Advanced Studies in Trieste (SISSA), 1983. Realizou pós-doutoramentos no Abdus Salam ICTP, Università degli Studi di Trieste, SISSA e CBPF. Posição atual: Pesquisador Titular do CBPF. Área-mestra de pesquisa: Teoria Quântica de Campos. Ênfases específicas da pesquisa: Teorias e modelos para as interações fundamentais, Teorias Supersimétricas e de Supergravidade, Gravitação Quântica.; helayel@cbpf.br

† L.P.R. Ospedal possui mestrado em Física pelo CBPF, 2013. Atualmente cursa o programa de doutorado na mesma instituição.; leoopr@cbpf.br

de investigação com várias questões ainda em aberto. De fato, abordagens mais recentes como a das Teorias de Supercordas são novos encaminhamentos no sentido de, entre outras questões, resolver os problemas da Gravitação Quântica.

Já a Eletrodinâmica Quântica descreve os fenômenos que envolvem a força eletromagnética. Foi desenvolvida a partir do início da década de 1930 e ajudou a entender o mundo das chamadas partículas elementares - ou seja, partículas 'indivisíveis'. Trabalhos publicados entre 1956 e 1968 ajudaram a formular a teoria que unificou tanto os fenômenos eletromagnéticos quanto aqueles regidos pela força nuclear fraca. A Teoria Eletrofraca ou o Modelo de Salam-Glashow-Weinberg - como ficou conhecido - mostra, portanto, que essas duas forças, apesar de se nos apresentarem com características marcadamente distintas, têm uma origem comum, sendo possível propor para elas um cenário de unificação que ilustra como ambas se separam no regime da Natureza em que fazemos as nossas observações. Eles receberam o Prêmio Nobel de Física de 1979 [1], por suas contribuições na construção desta teoria.

A Cromodinâmica Quântica (QCD) é a teoria física que incorpora o conhecimento experimental e a fenomenologia das interações nucleares fortes; a sua formulação ficou estabelecida em 1973, com os trabalhos de David Gross e Frank Wilczek, e independentemente, de David Politzer, o que valeu a estes três autores o Prêmio Nobel de Física de 2004 [2]. Esta é uma teoria que ainda ocupa uma parte considerável da comunidade dos teóricos e apresenta desafios estimulantes a serem esclarecidos, como por exemplo, a resolução do problema do confinamento dos quarks e glúons no interior dos hádrons, o desenvolvimento de técnicas matemáticas e computacionais para o estudo dos chamados fenômenos não-perturbativos (ou fenômenos de longas distâncias) e a compreensão da teoria incluindo efeitos de temperatura finita, a fim de elucidar mais claramente o seu rico diagrama de fases.

Neste cenário das quatro interações fundamentais, devidamente organizadas em termos de teorias microscópicas, que incorporam tanto as leis do mundo quântico quanto a Teoria da Relatividade Especial, percebe-se que o conceito-chave para a formulação das mesmas é o conceito de simetria, e, ao lançar mão da idéia de simetria, as teorias de Yang-Mills-Shaw, propostas em 1954, estabelecem o cenário teórico e matemático para a formulação das teorias acima mencionadas. Do ponto-de-vista matemático, cada interação tem associado a si um grupo de simetria, estrutura matemática que obedece a um conjunto de regras bem específicas; no que diz respeito às características de cada campo de força, o grupo de simetria organiza e sistematiza grandezas de natureza física como as cargas e outros atributos das partículas envolvidas na interação considerada. Os fenômenos eletromagnéticos são descritos em termos de um grupo de simetria designado por $U(1)$, associado à carga elétrica; a fenomenologia das interações fracas acomoda-se na es-

trutura imposta pelo grupo $SU(2)$, que responde pelo chamado isospin fraco; a QCD é formulada em termos do grupo $SU(3)$, que descreve a carga de cor e, finalmente, subliminar à gravitação está o grupo $SO(1,3)$, conhecido como o grupo de Lorentz, associado a uma grandeza intrínseca das partículas elementares, a que nos referimos como spin, sobre o qual ainda comentaremos a seguir.

A natureza quântica da luz já estava clara desde o início dos anos 1900, com os experimentos e a fenomenologia que levaram ao estabelecimento por Niels Bohr, em 1913, de seu Modelo Atômico, publicado em seus dois clássicos trabalhos, de Julho e Setembro. Bohr sabia estar diante de um modelo, e estava convicto de que a sua compreensão do espectro de absorção e de emissão dos átomos ainda não tinha o status de uma verdadeira teoria física. Tinha a clara percepção de que o seu modelo atômico devesse ser apenas a manifestação de uma teoria realmente mais ampla e fundamental. Bohr recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1922 [3], por sua contribuição na investigação da estrutura dos átomos.

Os fantásticos anos de navegação nas ondas de luz, entre 1923 e 1925, estão contados no clássico *The Story of Spin*, de Sin-Itiro Tomonaga e Takeshi Oka [4]. Neste período, verdadeiras catedrais barrocas, sob a forma de expressões algébricas, foram apresentadas para tentar reproduzir as chamadas séries espectrais. Era mais um desafio lançado pela luz no cenário quântico. Algo faltava, um elo perdido deveria ser encontrado; Bohr sempre aludia a esta peça tão esperada para completar o quadro de compreensão.

Eis, então, que George Uhlenbeck e Samuel Goudsmit chegam ao conceito de spin do elétron, um atributo completamente novo no mundo elementar, uma propriedade advinda do espaço-tempo, mas mensurada pela Mecânica Quântica, através de sua constante fundamental, a constante de Planck, \hbar . Tal como ter massa e ter carga elétrica, apresentar spin é uma característica das partículas fundamentais da matéria. O interessante é que o spin está relacionado a como uma partícula física pode perceber as rotações realizadas no espaço. A simetria a ele associado é codificada pela estrutura matemática $SO(3)$, que se refere a rotações em um espaço tridimensional, e o interessante é que o spin só pode aparecer como um múltiplo inteiro de um valor fundamental - um quantum de spin - ligado à constante de Planck.

Com este novo atributo para o elétron, além de sua massa m e de sua carga elétrica e , a questão era ter uma teoria para o elétron. Wolfgang Pauli propõe um modelo para o spin, através de sua celebrada Equação de Pauli. Uma equação de Schrödinger, com a Hamiltoniana dada por

$$H = \frac{1}{2m} (\vec{p} - e\vec{A})^2 + e\phi - \frac{e\hbar}{2m} \vec{\sigma} \cdot \vec{B},$$

onde \vec{A} , ϕ são os potenciais eletromagnéticos, os quais produzem os campos eletromagnéticos $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ e $\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla\phi$. O terceiro termo desta Hamiltoniana, com o produto escalar entre \vec{B} e as matrizes de Pauli

$\vec{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$, é o chamado termo de Pauli, medido no experimento de Stern-Gerlach. No entanto, faltava nessa descrição o elemento Relatividade Especial. Pauli compreendeu o spin, mas num mundo que ainda não incorporava os Princípios estabelecidos por Einstein para a compreensão do espaço-tempo.

Em 1928, Paul Dirac deduz e publica - o trabalho foi enviado para publicação no dia 1º de Janeiro de 1928 - o artigo [5] que o tornou o Homem-Equação, em associação à chamada Equação de Dirac, descrita por um espinor, ψ ,

$$i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu\psi - mc\psi = 0,$$

onde γ^μ são as chamadas matrizes de Dirac, 4×4 , que obedecem a álgebra de Clifford

$$\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2\eta^{\mu\nu}.$$

Esta, sim, é uma teoria para o elétron; uma teoria quântica e relativística para a primeira das partículas elementares. De fato, estudando-se o limite não-relativístico dela, com campos eletromagnéticos fracos, recuperamos a equação de Pauli [6].

É esta a pedra angular do Modelo-Padrão da Física de Partículas e das Interações Fundamentais: a compreensão de Dirac do que é o elétron. E a luz tem, nesta equação, um papel preponderante: é da invariância da velocidade da luz, do fato de sua velocidade ser a mesma em todo e qualquer sistema de referência inercial, que Dirac deduz a teoria quântico-relativística para o elétron.

A este ponto, é importante, para compormos a sequência cognitiva da relação entre o bóson de Higgs e a luz, chamar a atenção para o fato de que, de novo Dirac, havia, em 1927, lançado o trabalho [7] pioneiro sobre a descrição quântica para o campo eletromagnético, campo este que descreve a propagação da luz.

Até este trabalho de Dirac, *On the Absorption and Emission of Radiation*, o fenômeno eletromagnético era descrito pelas celebradas Equações de Maxwell, sintetizadas por James Clerk Maxwell em 1865, há exatos 150 anos. Dirac, neste trabalho de 1927, eleva o campo eletromagnético à categoria do que se conhece como campo quântico; com isso, o campo do fóton, o campo da luz, adquire um novo status matemático e deve ser interpretado de forma radicalmente diferente do que representa nas Equações de Maxwell.

O elétron e a o campo do fóton, com estes dois trabalhos de Dirac, têm agora uma compreensão no mundo quântico-relativístico. A terceira partícula elementar até então conhecida, o próton, que havia sido descoberto em 1919 por Ernest Rutherford, merecia, como os seus dois parceiros, o elétron e o fóton, ser compreendido e descrito nos mesmos termos, isto é, através de uma teoria quântico-relativística.

Em 1930, Dirac escreve um artigo conciso, profundo e altamente consequente, *The Proton*, que publica na Nature [8]. Este trabalho é um tratado que arrebatou pela clareza, pela concisão e pelo arrojo. Nele, o Homem-Equação, nas linhas finais, acena para a possibilidade de

existência de algo impensável para a época: a existência da anti-matéria. Para visualizarmos isso, utilizaremos a equação de Dirac acoplada com um campo eletromagnético,

$$i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu\psi - mc\psi - eA_\mu\gamma^\mu\psi = 0.$$

Introduzimos, agora, uma matriz, C , denominada matriz de conjugação de carga, que satisfaz às seguintes propriedades: unitariedade ($C^\dagger C = 1$), anti-simetria ($C^t = -C$) e, por último, $C(\gamma^\mu)^t C^{-1} = -\gamma^\mu$. Pode-se mostrar que o espinor $\psi^c \equiv -\gamma^0 C\psi^*$, com ψ^* sendo o complexo conjugado de ψ , é solução de

$$i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu\psi^c - mc\psi^c + eA_\mu\gamma^\mu\psi^c = 0,$$

ou seja, a mesma equação satisfeita por ψ , com mesma massa, só que com carga $e \rightarrow -e$. Começamos aqui a perceber a importância da simetria. Foi justamente com ela que o prof. Dirac, explorando a simetria de conjugação de carga na equação dele, nos trouxe a anti-matéria! Há que se ressaltar que, antes mesmo da discussão do grupo de simetria na construção das interações fundamentais, Dirac já destacava a importância do uso da Matemática na Física, com a bela apresentação "The Relation between Mathematics and Physics" de 1939, disponível em [9].

Além disso, aqui, a luz é, ainda uma vez, central: luz interagindo com luz podendo criar um par de (matéria, anti-matéria).

Esta publicação do Prof. Dirac é o passo definitivo para o seu celebrado trabalho "três-em-um" de 1931, *On the Quantised Singularities of the Electromagnetic Field* [10]. Neste artigo, três resultados de impacto que ecoa até hoje são lançados: a previsão de uma nova partícula - o monopolo magnético - a compreensão da carga do elétron como sendo a carga fundamental da Natureza (ao que nos referimos como a quantização da carga) e a previsão de existência do anti-elétron (o pósitron) e do anti-próton. De novo, a luz, subliminarmente presente no trabalho, está nos bastidores de resultados de impacto sem precedentes naquele contexto da Física de Interações Fundamentais, que estava nascendo.

Em meio a esta pluralidade de idéias e debates, Enrico Fermi propõe, em 1933, a existência de uma nova interação no mundo sub-atômico: o decaimento-beta do nêutron determina um campo de força própria, a que denominou interação nuclear fraca. Lançou o seu trabalho, *Tentativo di Una Teoria dei Raggi- β* [11], e, assim, se abre um caminho - muito ainda no escuro - para a previsão do bóson de Higgs e a compreensão de sua atuação determinante para a compreensão da luz no âmbito de uma teoria unificada para o campo eletromagnético e para o campo de força nuclear fraca; a esta teoria, que estará composta em 1968, nos referimos correntemente como a Teoria Eletrofraca.

Ao formular a sua teoria para o decaimento-beta, $n \rightarrow pe\bar{\nu}$, como um novo tipo de interação fundamental, Fermi assimila a existência do neutrino, partícula hipotética introduzida por Pauli em 1931 e só descoberta

experimentalmente em 1956. Mas, apostando na idéia de tal “partícula teórica”, Fermi combina o elétron (e^-) e o neutrino (ν) em uma estrutura única, chamada de corrente leptônica. A Lagrangeana que descreve a interação é dada por

$$\mathcal{L}_F = -\frac{G_F}{\sqrt{2}} (\bar{\psi}_p \gamma_\mu \psi_n) (\bar{\psi}_e \gamma^\mu \psi_\nu) + h.c.,$$

onde $G_F \cong 10^{-5}/m_p^2$ é a constante de acoplamento de Fermi, com m_p sendo a massa do próton.

Ressalta-se o fato de que tal constante de acoplamento possui dimensão, caracterizando a teoria como uma teoria efetiva, ou seja, como o limite de baixas energias de uma teoria mais fundamental. Aqui, está a semente do que virá a ser, cerca de 20 anos mais tarde, o campo escalar de Higgs e, quase 30 anos mais tarde, a partícula de Higgs.

Seguindo a acumulação estética para situarmos objetivamente a relação entre o bóson de Higgs e a luz, podemos dar um salto diretamente à década de 1950, pois os anos subsequentes à formulação da interação nuclear fraca por Fermi (período de 1934 - 1939 e, em seguida, os anos da II Grande Guerra e o imediato pós-guerra) foram marcados pela priorização no avanço da compreensão das interações nucleares fortes e da interação eletromagnética, por razões de interesses até mesmo políticos.

A descoberta dos mésons-pi em 1948, partículas escalares, isto é, com spin igual a zero (na verdade, pseudo-escalares, por um aspecto inerente ao conceito de simetria) e aparecendo em três estados de carga elétrica (um positivamente carregado, π^+ , um com carga negativa, π^- , e um terceiro neutro, π^0) estabelece um novo desafio para a teoria eletromagnética e, conseqüentemente, para a luz.

Como a luz e a radiação eletromagnética, em geral, interagem com matéria carregada não-eletrônica? Como a natureza escalar (spin nulo) dos portadores de carga poderia incidir sobre a natureza da luz? As cargas de nossa matéria atômica são todas eletrônicas (spin = 1/2), isto é, são elétrons ligados a núcleos atômicos pela atração eletromagnética. Agora, com portadores de carga sem spin, como deveríamos rever o fenômeno luminoso?

Esta questão aberta e muito original é elucidada por Abdus Salam em sua Tese de Doutorado, defendida no Imperial College of Science, em 1951. Salam estuda, compreende e lança a sua versão da teoria quântica completa à qual nos referimos como Eletrodinâmica Escalar, dada pela densidade Lagrangeana

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^2 + (D_\mu \phi)^* D^\mu \phi - \mu^2 \phi^* \phi - \frac{\lambda}{4} (\phi^* \phi)^2,$$

onde $D_\mu \equiv \partial_\mu + ieA_\mu$. A fim de mantermos a renormalizabilidade da teoria, ele mostrou em [12] a necessidade de se introduzir uma interação com quatro escalares, ou seja, uma interação puramente de matéria, com uma nova constante de acoplamento λ . Salam percebe, já neste momento, que campos escalares teriam muito mais do que

estabelece a Eletrodinâmica Escalar a acrescentar à nossa compreensão da matéria em suas instâncias mais fundamentais. Ele cristalizará esta sua percepção poucos anos mais tarde.

Em 1956, o impacto do trabalho dos chineses Tsung-Dao Lee e Chen-Ning Yang [13], a respeito da violação da paridade, apresentado na Conferência Internacional de Física de Partículas em Seattle, foi determinante para vários acontecimentos de marco na Física de Interações Fundamentais. Entre estes, ocupa destaque o trabalho de Salam [14], em 1956 mesmo, logo após os dias de Seattle, quando lança o conceito de simetria quiral em associação a férmions de massa nula (os neutrinos hipotéticos de 1931 haviam sido descobertos e os resultados experimentais lhes atribuíam massa nula). Salam reevoca a corrente leptônica de Fermi, imagina um mundo simétrico, com elétrons e neutrinos de massa nula (condição imposta pela simetria quiral) e percebe que os seus objetos de estudo no Doutorado, os escalares, poderiam ser a origem dinâmica da massa dos elétrons, mantendo não-massivos os neutrinos. Este aspecto é crucial neste contexto e define os anos futuros da busca de uma verdadeira teoria fundamental para as interações fracas.

Estamos, assim, em um momento particular para a construção da Teoria Eletrofraca e para a nossa compreensão final da relação do campo e do bóson de Higgs como as entidades responsáveis pelo “faça-se luz”. Como organizar as idéias a este ponto, já que o momento é como um plasma de pensamentos, propostas e hipóteses que são construídas e que se desfazem ao final de debates, seminários e conferências?

Os pontos fundamentais, na percepção de Salam, eram:

1. as Teorias de Yang-Mills-Shaw, formuladas em 1954 por Chen-Ning Yang e Robert Mills [15], e, de forma independente, por Ronald Shaw, este último trabalhando em sua Tese de Doutorado sob a orientação de Salam;
2. a necessidade de se compreender as interações fracas como mediadas por bósons intermediários, da mesma forma como o fóton é o quantum transmissor da interação eletromagnética;
3. a busca de um mecanismo de geração de uma escala subnuclear, da ordem do milésimo da dimensão típica de um núcleo atômico, ou seja, um milionésimo do trilionésimo de metro $10^{-18}m$, para o processamento das interações fracas;
4. a hipótese de uma simetria quiral que justifique os neutrinos sem massa. Neste contexto, a premissa de que o elétron também seja sem massa completa o quadro da simetria quiral;
5. a necessidade de se compreender um mecanismo dinâmico que gere elétrons massivos, mas que mantenha os neutrinos com massa nula;

6. não perder de vista a simetria relativística, isto é, buscar resolver todas estas questões sem abrir mão da Teoria da Relatividade Restrita.

Salam conclui que tudo isto é possível se houver na Natureza um campo escalar fundamental - com o qual tem toda familiaridade - e que tenha interações de tipo já conhecido (as chamadas interações de Yukawa) com o setor de férmions, isto é, com o elétron, o pósitron, o neutrino e o anti-neutrino. Em seu trabalho de 1952, em que propunha uma teoria de campos quânticos para o fenômeno da supercondutividade, Salam também percebeu o quanto os campos escalares podem ser essenciais em fenômenos de natureza mais fundamental.

Yoichiro Nambu, também inspirado por Seattle-1956, reafirma a importância do fenômeno da supercondutividade para a compreensão da Física de Partículas Elementares em uma escala mais fundamental e a idéia dos objetos escalares se cristaliza através do chamado mecanismo de quebra espontânea de simetrias. Isso foi publicado em 1961, junto com G. Jona-Lasinio [16]. O mecanismo, que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física de 2008 [17], consiste em introduzir algum princípio de invariância em teorias físicas através da função que descreve a energia de um sistema físico em estudo, sem que a simetria seja, porém, manifesta em termos de laboratório. Trata-se de um mecanismo sutil, por meio do qual a simetria está presente no sistema físico, mas de forma escondida, presente apenas em uma entidade matemática denominada Hamiltoniano e que contabiliza a energia de uma configuração genérica do dado sistema. Entretanto, a experiência não percebe a simetria de forma direta. A simetria está camuflada sob a forma de relações não-casuais entre grandezas fisicamente mensuráveis do sistema sob inspeção.

Nomes como Jeffrey Goldstone, Abdus Salam e Steven Weinberg [18] foram os ases da discussão, compreensão e introdução deste conceito - quebra espontânea de simetria - implementado na Física de Partículas através, justamente, dos campos escalares. Procedendo - e estamos em 1964/1965 - nomes como Peter Higgs, François Englert, Robert Brout, Thomas Kibble, Gerald Guralnik, Carl Hagen e Steven Gilbert [19] aprofundaram o mecanismo de quebra espontânea de simetria em presença dos chamados campos de Yang-Mills-Shaw e elucidaram o processo pelo qual os campos escalares podem estabilizar o sistema físico ao qual estão associados, encontrando para este uma situação de equilíbrio estável, e estudando como o sistema oscila em torno de sua configuração de equilíbrio, Higgs, Englert e Brout perceberam mais claramente que, ao realizarem as suas oscilações em torno do equilíbrio, os escalares geram ondas estáveis, interpretadas como partículas físicas legítimas, denominadas posteriormente (em 1976) bósons de Higgs. Esta é a situação geral.

No caso particular da interação fraca, a mudança de tipo de partícula no processo de decaimento (nêutron se transforma em próton) sugere que o processo fraco tenha uma vinculação intrínseca com a carga eletromagnética. Desta forma, Salam e Weinberg propõem duas teorias.

Salam, em colaboração com John Ward, propõem uma teoria unificada para o Eletromagnetismo e as interações fracas [20]; neste mesmo quadro, Weinberg propõe uma teoria [21] para os chamados léptons L , dos quais o elétron é o representante mais popular.

Para termos um exemplo, consideremos um dos subsectores leptônicos desta teoria unificada. Com o dublete, $\begin{pmatrix} \nu_L \\ L \end{pmatrix}$, a sub-Lagrangeana fica escrita como

$$\mathcal{L} = (\bar{\nu}_L \bar{L}) i\gamma^\mu D_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ L \end{pmatrix},$$

onde definimos

$$D_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ L \end{pmatrix} \equiv \partial_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ L \end{pmatrix} + igA_\mu^a \frac{\sigma_a}{2} \begin{pmatrix} \nu_L \\ L \end{pmatrix} - ig'B_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ L \end{pmatrix}.$$

Aqui, percebemos a presença dos campos A_μ^a e B_μ , que fazem o papel de intermediar as interações, e das constantes de acoplamento (g, g') .

É, neste ponto, que o campo de Higgs, Φ , e seu associado bóson de Higgs, H , cumprem a sua missão de fazer a luz: a Teoria Eletrofraca estipula que existam quatro campos escalares para a compreensão da origem em comum dos fenômenos eletromagnéticos e fracos. Assim, devemos ter

$$\Phi = \begin{pmatrix} \chi_1 + i\chi_2 \\ H + i\chi_3 \end{pmatrix}.$$

Este campos entram em interação com o elétron, o pósitron, o neutrino, o anti-neutrino e os portadores - ou mediadores - das interações em seu estágio unificado, quando ainda não se distinguem as interações eletromagnéticas e fracas. Por exemplo, visualizamos a interação do Higgs com os bósons intermediários através da Lagrangeana,

$$\mathcal{L}^{Higgs} = (D_\mu \Phi)^\dagger (D^\mu \Phi) - V(\Phi),$$

onde definimos

$$D_\mu \Phi \equiv \partial_\mu \Phi + igA_\mu^a \frac{\sigma_a}{2} \Phi + ig' B_\mu \Phi$$

e o potencial de Higgs

$$V(\Phi) \equiv \frac{1}{2} m^2 \Phi^\dagger \Phi + \frac{\lambda}{4} (\Phi^\dagger \Phi)^2.$$

Aqui, o sistema encontra-se em sua fase plenamente simétrica, com os parâmetros $m^2 > 0$ e $\lambda > 0$, ou seja, com o potencial possuindo apenas um mínimo trivial, $v = 0$.

Destes quatro escalares fundamentais, um deles, sozinho, consegue determinar a configuração de equilíbrio de todo o sistema de campos eletrofracos. Neste momento, este escalar solitário realiza a quebra espontânea da simetria e os outros três escalares podem sair de cena, por se demonstrarem sem consequências físicas; na verdade,

o sistema eletrofraco mantém a sua situação de equilíbrio sem estes três escalares, e mais: ao oscilar em torno desta situação de equilíbrio estável, as ondas geradas por estes três escalares não conseguem ter existência física detectada por qualquer tipo de medição. Isto quer dizer que se pode calibrar a física do sistema sem que as ondas destes três escalares apareçam.

Em outra linguagem, ocorre a transição de $m^2 > 0 \rightarrow m^2 < 0$, de modo que o potencial possui agora dois mínimos, $\pm v$, onde $v = \sqrt{-m^2/\lambda} \neq 0$. Deste modo, expandimos o campo de Higgs H em torno de v

$$\Phi = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \chi_1 + i\chi_2 \\ H + i\chi_3 \end{pmatrix},$$

Como as flutuações são pequenas, podemos reescrever

$$\Phi \cong e^{i(\xi_a/v)\sigma_a} \begin{pmatrix} 0 \\ v + H \end{pmatrix},$$

com a identificação $\xi_1 = \chi_2$, $\xi_2 = \chi_1$, $\xi_3 = -\chi_3$. Aqui, fica claro que os campos χ_a são realocados na exponencial, ficando apenas H no dublete. O uso da simetria permite que eliminemos os campos ξ_a . Ressalta-se a importância das chamadas simetrias locais ou de gauge para identificar de forma não-ambígua os verdadeiros campos e graus-de-liberdade de um sistema físico.

Aparece, sim, a onda que se apresenta como partícula associada ao escalar que determina o estado de equilíbrio em torno do qual o sistema eletrofraco oscila. Este é o bóson de Higgs, recentemente (em 2012) detectado no LHC do CERN pelas Colaborações ATLAS e CMS. O mecanismo de geração de massa valeu o Prêmio Nobel de Física de 2013 para F. Englert e P.W. Higgs [22].

Ao determinar o estado de equilíbrio do sistema, o campo de Higgs organiza o que chamamos de espectro físico, isto é, o conjunto de partículas físicas com suas propriedades: massa, carga elétrica e interações mútuas. Ao entrar na fase que equilibra o sistema, o campo de Higgs produz o bóson de Higgs, e, no processo, emergem o elétron e o pósitron com suas propriedades e interações de natureza eletromagnética e de natureza fraca, emergem os neutrinos e anti-neutrinos, sem massa e sem carga, e com suas interações exclusivamente fracas e, finalmente, a luz - representada pelo fóton - se desprende do setor de partículas mediadoras e emerge com suas propriedades definidas: massa nula, eletromagneticamente neutra e acoplada a toda e qualquer partícula com carga elétrica. Finalmente, houve luz!

Neste processo, emerge ainda, em companhia do fóton A_μ , uma espécie de "luz pesada": uma partícula neutra como o fóton, porém muito massiva, e que não possui interação eletromagnética. Apenas aparece com um intermediador neutro das interações fracas. Este chamado bóson Z^0 já foi detectado experimentalmente, no final de 1982, no acelerador de partículas "avô" do LHC, o chamado SPS, Super Proton Synchrotron.

A obtenção de todos esses resultados requer um estudo mais detalhado dos demais setores da interação eletrofraca do Higgs com os férmions e bósons. Isso pode ser

encontrando em alguns livros [23] e também em cursos de Interações Fundamentais ou Teoria Eletrofraca; cujas aulas gravadas estão disponíveis em [24]. Vamos elucidar a idéia básica de um dos resultados: após expandirmos o campo de Higgs H em torno do mínimo não-trivial, v , é possível reconhecer que os bósons A_μ^a e B_μ se combinam de modo que

$$W_\mu^+ \sim A_\mu^1 - iA_\mu^2,$$

$$W_\mu^- \sim A_\mu^1 + iA_\mu^2$$

formam os bósons carregados W^\pm . Além disso, ao reparametrizarmos o conjunto de parâmetros (g, g') para (e, θ_W) , com a relação $g = e/\sin\theta_W$ e $g' = e/\cos\theta_W$, reconhecemos

$$Z_\mu^0 \sim (\cos\theta_W) A_\mu^3 + (\sin\theta_W) B_\mu,$$

$$A_\mu \sim -(\sin\theta_W) A_\mu^3 + (\cos\theta_W) B_\mu,$$

chegando, portanto, ao fóton e ao Z^0 , ambos bósons mediadores neutros.

Assim, ao longo de um período rico de idéias, debates e confrontos, que se estabelece a partir do advento do conceito de spin para as partículas fundamentais da Natureza, ergue-se uma grande teoria, a chamada Teoria Eletrofraca, Teoria $SU(2) \times U(1)$ ou o Modelo de Salam-Glashow-Weinberg, que nos dá uma descrição da origem unificada de duas interações que se apresentam em nosso mundo de formas tão distintas e que nos permite compreender como se dá o "faça-se luz" a partir de um campo escalar que viveu como um elo perdido nas profundezas da Natureza por cerca de 80 anos, até ser encontrado nos processos de colisão próton-próton do LHC e que foi detectado em dois canais diversos: o canal luz-luz, ou seja, fóton-fóton, e o canal $Z^0 - Z^0$. O Higgs decai, principalmente, em luz.

Ao celebrarmos o Ano Internacional da Luz, é muito oportuno trazermos ao público, sobretudo de não-especialistas e de interessados em Física de forma geral, que a construção da Teoria Eletrofraca, parte do Modelo-Padrão da Física de Partículas e Interações Fundamentais, foi um processo intelectual contínuo, aberto a muitas idéias que quebraram paradigmas quase sacrossantos da Física e dentro de um embate muito rico entre conceitos, novos princípios, abstração matemática, experimentação e fenomenologia. Este equilíbrio propiciou a construção de uma das maiores teorias científicas desenvolvidas no Século XX. E o mais importante: a teoria não está concluída; ao contrário, pode-se dizer que, agora, é que está realmente nascendo. O bóson de Higgs tendo sido encontrado e o "faça-se luz" tendo sido elucidado, o grande desafio que resta é saber a real origem do campo de Higgs e de suas ditas auto-interações, que permitem o estabelecimento do equilíbrio do sistema eletrofraco. O pensamento vigente é que o campo de Higgs seja apenas a manifestação mais tangível de alguma Física muito

mais fundamental. Como no caso do Modelo Atômico de Bohr, buscar esta teoria por trás do bóson de Higgs é uma grande questão de nossos dias e ocupará as mentes

de tantas gerações futuras. Vemos-nos, assim, diante de uma situação como há cem anos atrás: um grande modelo à procura de uma verdadeira teoria que o justifique.

-
- [1] A. Salam, S.L. Glashow, S. Weinberg, *Nobel lectures* (1979). http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1979/
- [2] D. Gross, H.D. Politzer, F. Wilczek, *Nobel lectures* (2004). http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2004/
- [3] N.H.D. Bohr, *Nobel lecture* (1922). http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1922/
- [4] Sin-Itiro Tomonaga, Takeshi Oka, *The Story of Spin*, University of Chicago Press, 1998.
- [5] P.A.M. Dirac, Proc. R. Soc. Lond. A **117**, 610 (1928).
- [6] L.H. Ryder, *Quantum Field Theory*, Cambridge University Press, 2nd edition, 1996.
- [7] P.A.M. Dirac, Proc. R. Soc. Lond. A **114**, 243 (1927).
- [8] P.A.M. Dirac, Nature **126**, 605 (1930).
- [9] P.A.M Dirac, Proc. R. Soc. (Edinburgh) **59** Part II, 122 (1938-39).
- [10] P.A.M. Dirac, Proc. R. Soc. Lond. A **133**, 60 (1931).
- [11] E. Fermi, La Ricerca Scientifica **2** (12), 1 (1933).
- [12] A. Salam, Phys. Rev. **86** (5), 731 (1952).
- [13] T.D. Lee, C.N. Yang, Phys. Rev. **104** (1), 254 (1956); *Nobel lectures* (1957). http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1957/
- [14] A. Salam, Nuovo Cim. **5**, 299 (1957).
- [15] C.N. Yang, R.L. Mills, Phys. Rev. **96** (1), 191 (1954).
- [16] Y. Nambu, G. Jona-Lasinio, Phys. Rev. **122** (1), 345 (1961); Phys. Rev. **124** (1), 246 (1961).
- [17] Y. Nambu, M. Kobayashi, T. Maskawa, *Nobel lectures* (2008). http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/
- [18] J. Goldstone, A. Salam, S. Weinberg, Phys. Rev. **127** (3), 965 (1962).
- [19] W. Gilbert, Phys. Rev. Lett. **12** (25), 713 (1964); P.W. Higgs, Phys. Rev. Lett. **13** (16), 508 (1964); F. Englert, R. Brout, Phys. Rev. Lett. **13** (9), 321 (1964); G.S. Guralnik, C.R. Hagen, T.W.B. Kibble, Phys. Rev. Lett. **13** (20), 585 (1964);
- [20] A. Salam, J.C. Ward, Phys. Lett. **13** (2), 168 (1964).
- [21] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **19** (21), 1264 (1967).
- [22] F. Englert, P.W. Higgs, *Nobel lectures* (2013). http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2013/
- [23] T.P. Cheng, L.F. Li, *Gauge Theory of Elementary Particle Physics*, Oxford, 2000.
F. Halzen, A. D. Martin, *Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics*, John Wiley & Sons, Inc., 1984.
D. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, John Wiley & Sons, Inc., 1987.
- [24] Site do professor global: <http://www.professorglobal.com.br/fisica-pos-graduacao>