



UM ESTUDO HISTÓRICO-CONCEITUAL EM FÍSICA DE PARTÍCULAS

A HISTORICAL-CONCEPTUAL STUDY IN PARTICLE PHYSICS

Vinícius Cerqueira Silva ^{*1}, Vanessa Carvalho de Andrade ^{†1}

¹Instituto de Física - Universidade de Brasília

Resumo

Este artigo é resultado de um projeto de iniciação científica desenvolvido na Universidade de Brasília sob orientação da professora Vanessa Carvalho de Andrade do Instituto de Física, no período de 2020 à 2021. É um estudo histórico-conceitual em Física de Partículas com foco na cronologia de descobertas e propostas de partículas elementares capazes de explicar os experimentos de altas energias da época. Trata-se de uma introdução ao tema, sem se aprofundar na matemática. Ao decorrer desta linha do tempo são apresentadas as novas teorias e conceitos relacionados às propriedades intrínsecas desta partículas; no geral isso toma forma como o Modelo Padrão de Física de Partículas. Ademais, este texto tem potencial didático para apresentar a temática.

Palavras-chave: Física de Partículas, Partículas Elementares, Modelo Padrão, Interações Fundamentais, História da Física.

Abstract

This article is the result of a scientific initiation project developed at the University of Brasilia under the guidance of Professor Vanessa Carvalho de Andrade of the Physics Institute from 2020 to 2021. It is a conceptual-historical study in particle physics with a focus on the chronology of discovery and proposals of elementary particles capable of explaining the high energy experiments of the time. It is an introduction to the subject, without delving into the mathematics. Throughout this timeline, new theories and concepts related to the intrinsic properties of these particles are presented; in general, this takes shape as the Standard Model of Particle Physics. Moreover, this text has didactic potential to present the theme.

Keywords: Particle Physics, Elementary Particles, Standard Model, Fundamental Interactions, History of Physics.

*vini3129@gmail.com

†vcandrade@unb.br

I. Introdução

O que é a Física de Partículas? Física de Partículas é um ramo da Física que se dedica ao estudo das partículas elementares, como elas interagem entre si ou deixam de interagir. No entanto, o que é uma partícula elementar? É a menor unidade de matéria conhecida até o momento.

Este estudo fixa-se em compreender mais profundamente a natureza da matéria que compõe o universo conhecido e, conseqüentemente, as implicações destes conhecimentos a curto e médio prazo. A título de exemplo, a descoberta do elétron por Thomson em 1897, pela Ampola de Crookes, impactou prontamente na melhor execução do experimento que, com melhorias, permitiram depois que essa tecnologia, usada para acelerar elétrons por campos elétricos e curvar suas trajetórias com campos magnéticos, fosse utilizada para a confecção de televisões de tubo. O interesse pelo tema dá-se a pela diversidade de possibilidades de novas configurações de matéria que possam existir e pelo entendimento das "elementaridades" que compõem o universo.

II. Metodologia

Esta Iniciação Científica foi puramente teórica, sem práticas experimentais. A metodologia utilizada foi estudar os conceitos em Física de Partículas a partir de três principais bibliografias.

A primeira literatura que guiou esta Iniciação foi o livro *O discreto charme das partículas elementares* [1], que apresenta a cronologia de descoberta e proposta das partículas em uma linha do tempo e as teorias físicas e matemáticas relacionadas. O livro recorre a ilustrações únicas, bem coloridas, pouco convencionais, cujo diferencial é representar cada partícula com seu respectivo "avatar", inspirado nas propriedades físicas da partícula, ao contrário do usual, em mostrá-las como "bolinhas".

A autora se utiliza de uma linguagem simples, sem deixar de usar os devidos termos técnicos para descrição de conceitos, quando necessário. Não há o uso frequente de expressões matemáticas, e as que são apresentadas são simples. O livro ainda possui um extenso glossário para consulta de termos e conceitos.

A segunda referência bibliográfica considerada foi o livro *Física de Partículas vista pelas Interações Fundamentais e Formação de Professores* [4], que faz um aprofundamento conceitual e teórico no tema, assim como diz o título, a partir do ponto de vista do desenvolvimento das teorias físicas por trás das interações fundamentais.

E por último, utilizou-se uma referência como primeiro aprofundamento matemático no tema, o livro *Introdução à Física de Partículas* [2], com o uso de conceitos de cálculo diferencial, mecânica quântica e álgebra linear.

Paralelamente, estudou-se também sobre alguns conceitos base para a temática como relatividade restrita.

Além disso, foram feitas reuniões periódicas com a orientadora, e a participação no grupo de pesquisa, com seminários adjacentes ao tema.

III. Resultados

Nesta seção, serão apresentadas, em uma linha do tempo, a descoberta e proposta das partículas, em sua maioria no século XX, salvo algumas exceções, e nem todas com caráter elementar. O conceito de elementar aqui se dará por qualquer partícula que não seja composta por outras; o fato de ser estável ou instável não necessariamente implica na elementaridade da partícula.

III.1. A descoberta do Elétron (e^-) em 1897

Descoberto por J.J. Thomson, pelo experimento da Ampola de Crookes.

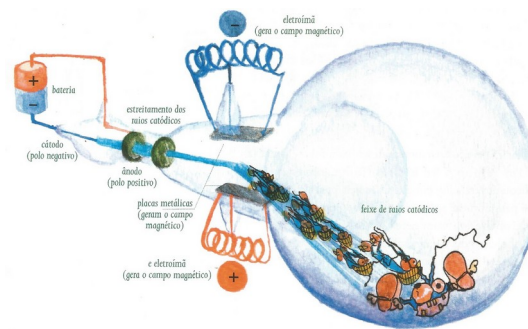


Figura 1: Representação da ampola de Crookes. [1]

Quando se aplica uma suficiente diferença de potencial entre duas placas metálicas de um dado material, forma-se um intenso campo elétrico, capaz de atrair elétrons. Este movimento de aceleração configura-se como emissão de raios catódicos do cátodo (placa negativa). Os raios passam pela cavidade circular no ânodo (placa positiva) que formam um feixe estreito, onde sua trajetória é curvada por um campo magnético, caso contrário o feixe seguiria reto. Pela deflexão do feixe, infere-se que ele possui carga negativa, e por ela foi calculado a massa das partículas que compõem o feixe $m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ Kg} = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ e a carga $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$. Isso é observado na tela fluorescente no fim do tubo.



Figura 2: Representação do elétron tendo trajetória curvada sob ação do Campo Magnético. [3]

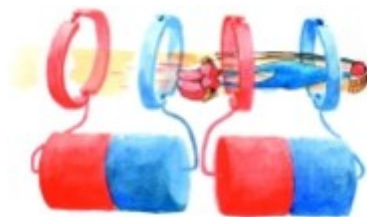


Figura 3: Representação do elétron sendo acelerado sob ação do Campo Elétrico. [3]

III.2. A proposta do Fóton (γ) em 1905



Figura 4: Representação do Fóton. [1]

O fóton foi descoberto a partir do experimento do Efeito Fotoelétrico. Na época sabia-se que certos metais, quando iluminados com determinada frequência, emitiam elétrons. Max Plank propôs que os elétrons, ao ganhar energia dos "pacotes de energia" chamados *quanta*, são ejetados. Isso depende da frequência da luz f que incide sobre a placa metálica, dada pela equação $E = hf$, sendo h a constante de Planck. Pelo Modelo Atômico de Rutherford-Bohr, sabia-se que um elétron só passa de uma camada para outra ao receber uma quantidade determinada de energia (quantum de luz).

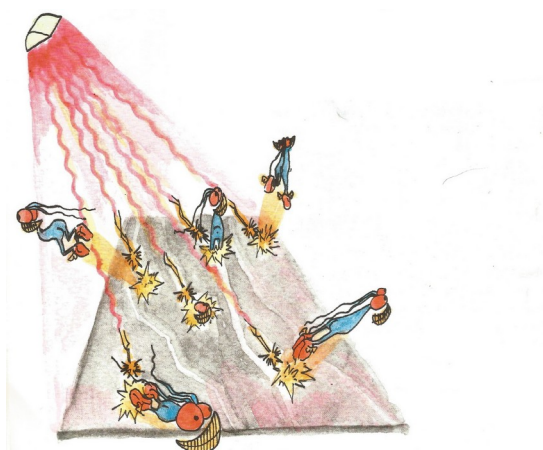


Figura 5: Representação do Efeito Fotoelétrico. [1]

A experiência do Efeito Compton mostra um elétron em repouso que, ao ser atingido por um fóton, ganha velocidade e o fóton que o atingiu se espalha (perde energia).



Figura 6: Representação do Efeito Compton. [1]

III.3. A descoberta do Próton (p) em 1919

Não é uma partícula elementar, mas foi considerada por um período. Mostrou-se importante na descoberta de outras partículas elementares. Como se sabia que o átomo (matéria comum) era neutro, e da existência do elétron com carga negativa, presumiu-se que existisse uma partícula de carga oposta.

Eugen Goldstein percebeu, ao se introduzir um furo no cátodo, um feixe de raios de luz na direção contrária ao dos raios catódicos, denominando-os de raios canais. No entanto, o campo magnético usado não foi suficiente para deformar o feixe. Wilhelm Wien percebeu ser preciso um campo eletrostático muito mais intenso do que aquele usado por Goldstein para deformar os raios, assim calculou a massa da partícula e concluiu que se tratava de hidrogênio ionizado (próton). Foi no experimento de Rutherford, no qual partículas alfas (α) atingem átomos leves emitindo prótons (átomos de hidrogênio ionizado), que a descoberta se concretizou.

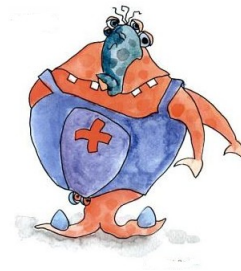


Figura 7: Representação do Próton. [1]

III.4. A proposta do Neutrino do elétron (ν_e) em 1930

Advém da proposta teórica de uma partícula leve, sem carga, que pouco interage com a matéria, por Wolfgang Pauli, motivada pela falta da conservação de energia no decaimento β , visto que os elétrons eram ejetados do núcleo com energia indefinida, de valores altos a

nulos. É importante ressaltar que mais à frente, com a descoberta do nêutron e melhoria dos métodos de aproximação, observou-se que não se tratava do neutrino e sim do antineutrino.



Figura 8: Representação do Neutrino do elétron. [3]

Com a descoberta do nêutron ficou claro que não havia elétrons no núcleo. Logo, essa nova proposta teve que incluir o desbalanceamento de spin na conversão de nêutron em um próton e um elétron, pois ambos são férmions (spin semi-inteiro), ou seja, "a conta não fechava". O nêutron, próton e elétron possuem spin $\frac{1}{2}$, que podem ser positivo ($\uparrow; +\frac{1}{2}$) ou negativo ($\downarrow; -\frac{1}{2}$). assim, todas as combinações de próton e elétron convergem para 1,-1 e 0, de modo que jamais seria possível obter spin $\frac{1}{2}$ ao final, violando a conservação do momento angular. Isto pode ser visto por:

$$|\{n\}\rangle_{spin\frac{1}{2}} \rightarrow |\{p\}\rangle_{(\pm)\,spin\frac{1}{2}} + |\{e\}\rangle_{(\pm)\,spin\frac{1}{2}}.$$

O problema foi resolvido adicionando uma partícula de spin $\frac{1}{2}$, carga elétrica 0, massa de repouso nula (m_0):

$$|\{n\}\rangle_{spin\frac{1}{2}} \rightarrow |\{p\}\rangle_{(\pm)\,spin\frac{1}{2}} + |\{e\}\rangle_{(\pm)\,spin\frac{1}{2}} + |\{\bar{\nu}\}\rangle_{spin\frac{1}{2}}.$$

III.5. A descoberta do Pósitron (e^+) em 1931

Paul Adrien Maurice Dirac usou a relação entre energia, momento e massa em repouso $E = \pm \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$, mostrando que a mecânica relativística permitiria então dois níveis separados de energia, um positivo e outro negativo. Uma forma de interpretar isso é quando um elétron de um nível negativo ganha energia e é "promovido" ao nível positivo, ele deixa um "buraco" no "mar", que se comporta como um elétron com carga positiva. Mais à frente isso foi denominado de mar de Dirac.

Foi detectado com auxílio de uma Câmera de Wilson sobre influência de campo magnético, usando raios cósmicos. Numa câmera com vapor supersaturado de álcool, quando partículas carregadas passam por ela, perdem energia ionizando átomos, o que deixa traços pelo caminho. Pela manipulação de campos magnéticos, foi possível verificar que algumas partículas tinham carga positiva. E que apresentavam massa aproximada de um elétron.

A descoberta em laboratório correspondia ao modelo previsto por Dirac, onde a colisão de dois raios γ (dois fótons) formaria uma par elétron-pósitron.

A partir daqui, um novo paradigma é estabelecido, em que cada partícula possui sua antipartícula.

III.6. A descoberta do Nêutron (n) em 1932

Não é uma partícula elementar. Como já se sabia que o núcleo possuía cargas positivas, sabendo que as mesmas se repelem, seria necessária uma partícula que mantivesse os prótons juntos e consequentemente o átomo estável, e completasse a massa de átomos mais pesados que o Hidrogênio.

O nêutron foi descoberto a partir do experimento de Walther Boethe e Herbert Becker e do casal Joliot-Curie. Nele, partículas alfas atingem átomos leves como o berílio (Be), restando da reação átomos de carbono e partículas com massa similar à do próton e sem carga. Isso correspondia a uma radiação muito penetrante, que foi inicialmente interpretada como raios-X. A reação nuclear da colisão da partícula alfa (${}_2\text{He}^4$) com o Be produz um átomo de Carbono (C) e um nêutron (n) altamente energético:



No entanto, coube a James Chadwick refazer o experimento e reinterpretar os dados, assumindo que não se tratava de radiação gama, já que a amostra de polônio emitia partículas alfas extremamente energéticas e seria, na verdade, uma "versão neutra do próton". Essa descoberta é complementar a do neutrino do elétron.

III.7. A descoberta do Múon (μ) em 1937

É uma partícula elementar, instável, pois decai em partes menores, com tempo de vida média de 10^{-6} segundos. Neste ponto é importante ressaltar a diferença entre conceitos, ou seja, estável e elementar: uma partícula é elementar quando não possui mais constituintes, e é estável quando não há possibilidade de decair em outras partículas elementares, desde que as leis de conservação permitam. A reação de decaimento do múon apresenta-se como:

$$\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\mu.$$

Hideki Yukawa propôs uma partícula intermediária que carregaria a força forte, responsável por manter o núcleo estável. Dado que nem a força eletromagnética, nem a força gravitacional ambas com constante de acoplamento muito pequenas, não seriam suficientes, a massa seria de $m_\mu \approx 200m_e$. No entanto, após observações experimentais, Seth H. Neddermeyer e Carl David Anderson concluíram que se tratava de outro tipo de partícula, com massa $m_\mu \approx 207m_e$, com duas cargas elétricas possíveis μ^+ e μ^- e spin $\frac{1}{2}$, características semelhantes a do elétron. Logo sofria ação da força nuclear fraca, eletromagnética e não nuclear forte.

A detecção se deu a partir da radiação cósmica. Outra característica que torna o múon semelhante ao elétron é que ao encontrar matéria ordinária, ele orbita o núcleo por alguns segundos antes de decair, já adiantando a descoberta do neutrino do múon. A reação de colisão do múon com o próton:

$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu.$$



Figura 9: Representação do Múon. [3]

III.8. A descoberta do Píon (π) em 1947

Não é uma partícula elementar, mas configura-se como partícula subnuclear. A teoria proposta por Yukawa que permitiria a estabilidade do núcleo, seria a força forte, que atuaria a curtas distâncias resultando na massa $m_\pi = 200m_e$. Analogamente à força eletromagnética, expressa pelo fóton que, com massa nula, consequentemente de longo alcance, interage imediatamente com o núcleons, sendo absorvido em 10^{-23} segundos.

O fenômeno de formação aconteceria na atmosfera pela colisão de prótons advindos da radiação cósmica. Por esse motivo, os píons não eram detectados em superfície. Foi necessário fazer o uso de balões meteorológicos e visitas a montanhas altas, esta última feita pelo Físico Brasileiro César Lattes que, ao fazer o uso de emulsões com bórax, permitiu a detecção do π^- . As outras partículas π^+ e π^0 foram detectadas no acelerador Cosmic. A reação de decaimento do píon em múon é dada por:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm.$$



Figura 10: Representação do Píon. [3]

III.9. A proposta da Estranheza (s) em 1955

É importante salientar que, neste momento a estranheza é proposta como uma lei de conservação, e não como partícula. Eventualmente, com a proposta e descoberta dos quarks, o quark strange será descoberto.

Com o uso da câmera de nuvens para detecção de raios cósmicos, foram descobertas novas partículas, em especial, bárions pesados das famílias K , Λ , Δ , Ξ , que tinham como característica principal serem produzidas em pares e decaírem em partículas carregadas. São produzidas abundantemente no intervalo de 10^{-23} segundos, enquanto o decaimento 10^{-8} segundos, produzindo duas partículas carregadas. Hoje se sabe que as partículas estranhas são criadas pela força forte e regidas pela força fraca. A partir disso, deu-se um novo número quântico, a Estranheza (S), consequentemente como uma nova lei de conservação

relacionada ao quark strange. Deu-se então o valor de $S = 1$ para os Káons, $S = -1$ para Λ e Σ , $S = 0$ para as outras partículas.



Figura 11: Representação do Quark Strange. [3]

III.10. A descoberta do Neutrino do Múon (ν_μ) em 1962

Dada a existência do neutrino do elétron, que formava então a primeira geração de léptons, de formar similar, um novo neutrino foi pressuposto a fim de completar a segunda geração, onde o múon faz parte. Confirmou-se então a existência de outros neutrinos. O experimento AGS usou um feixe de prótons energéticos para produzir um chuveiro de mésons π que atravessaram placas densas de aço, decaindo em múons e por conseguinte o neutrino do múon; estes últimos são os únicos a chegarem no detector, pois os múons são muito pesados.

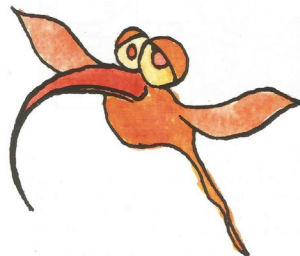


Figura 12: Representação do Neutrino do Múon. [1]

III.11. A proposta dos Quark Up (u) e Quark Down (d) em 1964

Com a descoberta de uma grande diversidade de partículas, bárions e mésons, Gell-Man propôs que os hádrons fossem formados por partículas mais elementares. Dado que já havia a proposta da estranheza; uma partícula poderia explicar as reações que envolviam esse fenômeno. Surgiu a primeira proposta dos quarks e seus antiquarks, nos sabores (tipos) up, down e strange, sendo os dois primeiros formadores da matéria comum, o próton (uud) e o nêutron (ddu). Os bárions são formados por três quarks ou antiquarks, e os mésons por um par quark-antiquark; este último configura-se um estado ligado.

Conhecendo as massas do próton, nêutron, quark up e quark down, $m_u = 3\text{MeV}/c^2$ e $m_d = 6\text{MeV}/c^2$, observou-se uma grande discrepância na massa do próton (uud), pois a soma dos quarks equivale a $12\text{MeV}/c^2$, e o próton tem massa de $938,272\text{MeV}/c^2$, o que significa que a massa restante seria advinda da energia de ligação (energia que mantém os

quarks em confinamento) de $918,272 \text{ MeV}/c^2$, ou seja, a energia é contada ao se medir a massa.

Os quarks estariam nadando num emaranhado de glúons energéticos, como um plasma, pois os eles interagem entre si.



Figura 13: Representação do Quark Down e Quark Up. [1]

III.12. A proposta do Charme (c) em 1964

Seguindo a simetria dos léptons com quatro partículas (e^- , μ , ν_e , ν_μ) esperava-se que o mesmo fenômeno se repetisse com os quarks. Um novo número quântico foi proposto, e seria apenas violado nas interações fracas. O charme foi observado pela partícula J/ψ^{2s} ($c\bar{c}$) no decaimento:

$$J/\psi^{2s} \rightarrow J/\psi^{1s} + \pi^+ + \pi^-$$

$$J/\psi^{1s} \rightarrow e^+ + e^-.$$



Figura 14: Representação do Quark Charm. [1]

III.13. A proposta dos Bósons de Gauge Z^0 , W^+ , W^- em 1967

A partir da Teoria Eletrofraca (unificação da interação fraca e interação eletromagnética) mostrou-se que as interações fracas seriam mediadas pelos bósons de gauge ou vetoriais intermediários (Z^0, W^+, W^-, γ). Foram detectados a partir da colisão ($p\bar{p}$), onde procuraram-se os seguintes decaimentos:

$$W^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e$$

$$W^- \rightarrow e^- + \nu_e$$

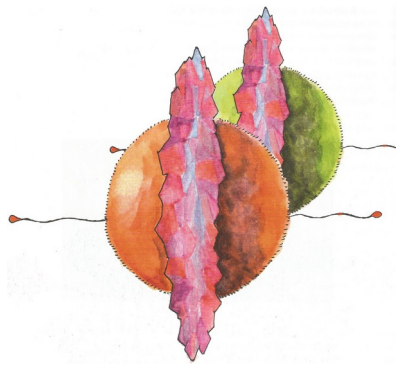


Figura 15: Representação dos Bósons W^+ e W^- . [1]

o Z^0 foi detectado a partir dos decaimentos:

$$Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$$

$$Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-.$$



Figura 16: Representação do Bóson Z^0 . [1]

Um dado bastante relevante é que este bóson pode decair de muitas formas diferentes e todas elas incluem neutrinos. Isto está ligado a uma simples relação da Teoria Eletrofraca, entre a vida média e número possível de neutrinos existentes na natureza. Observou-se também que os bósons carregados $W^\pm$ estão relacionados ao decaimento de partículas carregadas, e o bóson neutro Z^0 relacionado ao decaimento de partículas neutras.

III.14. A proposta dos Glúons ($g_{cor,anticor}$) em 1973

Como não eram encontrados quarks livres, pensou-se então que não existissem nesse estado ou que seriam raros, ou que estariam livres dentro de um determinado espaço, como se o hádron fosse uma bolsa. Tal fenômeno é a liberdade assintótica. Então presumiu-se que existisse uma "cola" entre os quarks, o Glúon, bóson mediador da QCD, que medeia a força forte entre os quarks. Quando dois quarks estão se afastando, "a cola se estica tanto" que do ponto de vista energético é mais fácil (econômico) criar um par(es) partícula(s)-antipartícula(s). Os quarks estariam "nadando" num emaranhado de glúons energéticos, como um plasma, já que interagem entre si.

A força forte que inter-relaciona os quarks tem origem na "carga cor" e no consequente "campo de força cor". A partir da QCD, essa interação é intermediada por oito glúons distintos, sem massa, carga neutra, spin 1, com um número quântico para cores (vermelho, verde e azul) e anti-cores (magenta, ciano e amarelo). O que gera nove tipos diferentes de glúons (cada glúon formado por uma cor e uma anti-cor), que seriam separados em dois grupos diferentes. Um octeto com seis deles mudam a cor do quark e dois deles chamados de diagonais, aniquilam a mesma cor que produzem e um singleto, glúon solitário, pois a soma de todas as cores é branca.

Em uma interação forte, o glúon muda-lhe a cor do quark que interage, aniquilando a cor e anti-cor da reação, a que restar será a cor do quark. Por exemplo, o glúon azul/magenta ao interagir com um quark vermelho, as cores magenta e vermelho aniquilam-se (torna-se branco), resta a cor azul não aniquilada do glúon, tem-se então o quark azul.

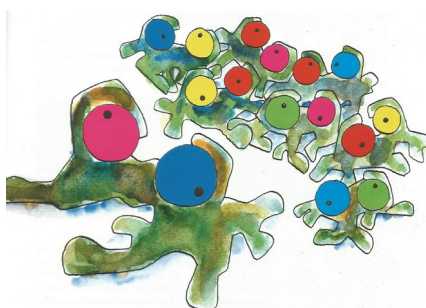


Figura 17: Representação dos Glúons. [1]

III.15. A descoberta do Tau (τ) em 1975

Observando a colisão elétron-pósitron, descobriu-se uma terceira geração de léptons, o τ com massa de aproximadamente dois prótons, o que preconizou a existência do neutrino do tau ν_τ foram os decaimentos:

$$e^+ + e^- \rightarrow \tau^- + \tau^+$$

$$\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau.$$



Figura 18: Representação Tau. [1]

III.16. A descoberta do Quark Bottom (b) em 1977

Depois da descoberta de partículas geradas pela primeira e segunda gerações de quarks, e com descoberta da terceira geração de léptons, preconizou-se também uma terceira geração de quarks. O quark bottom foi encontrado pela evidência do méson úpsilon [$\Upsilon(1S)$] o estado ligado $b\bar{b}$. No início da década de 1980 outros mésons com esse quark foram descobertos. Por simetria então, pode-se prever a existência de um sexto quark, já que se esperava a detecção do neutrino do tau.

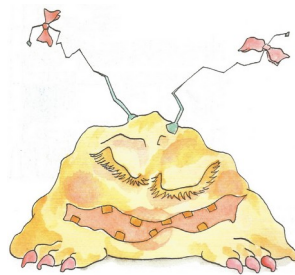


Figura 19: Representação Quark Bottom. [1]

III.17. A descoberta do Quark Top (t) em 1995

E por final, esse quark foi descoberto através da colisão extremamente energética próton-antipróton. O quark top é muito massivo, com massa equivalente a um átomo de ouro. Foi detectado no acelerador Tevatron, no FermiLab pelas seguintes reações:

$$p + \bar{p} \rightarrow t + \bar{t}$$

$$t \Leftrightarrow \bar{t} \rightarrow b + \bar{b} + W^+ + W^-.$$

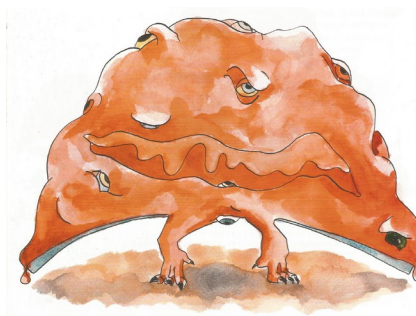


Figura 20: *Representação do Quark Top.* [1]

III.18. A descoberta do Neutrino do Tau (ν_τ) em 2000

A penúltima partícula a ser descoberta, a partir de um feixe intenso de neutrinos, que passavam por um grande alvo de ferro e camadas adequadas de emulsão. Apenas poucos neutrinos interagem com os átomos de ferro e se transformam em neutrino do tau.



Figura 21: *Representação do Neutrino do Tau.* [1]

III.19. A descoberta do Bóson de Higgs (H) em 2012

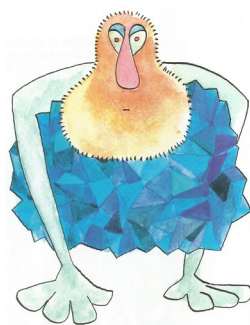


Figura 22: *Representação do Bóson de Higgs.* [1]

Foi proposto por Peter Higgs em 1964. Seria a partícula que gera a massa dos bósons de gauge. Na década de 1960 havia o problema da geração de massa dos bósons vetoriais responsáveis pela interação fraca. Foi proposto que um campo escalar poderia ser responsável pela geração de massa dos mediadores; esse mecanismo é a quebra espontânea da simetria de calibre (QES), e foi a partícula escalar de Higgs que explicaria o fenômeno.

Restava uma pergunta na época, a razão de algumas partículas terem massa como os quarks e léptons, mas fótons e glúons não tinham massa. A proposta de Peter Higgs em

1964, seria uma partícula que gera a massa dos bósons de gauge, através de um Campo de Higgs que permeia todo o espaço, em que algumas partículas interagem em dado grau, e a partir dele adquirem massa. Ou seja, o quark top interage muito mais com o campo de higgs, do que o elétron. O Bóson de Higgs seria uma excitação desse campo, assim como o fóton para o Campo Eletromagnético. A massa prevista e detectada do Higgs, foi de 125GeV, 100 vezes a massa do próton, e mais massiva do que qualquer outra partícula detectada. O que explica sua enorme dificuldade em produzir e detectar, tal feito realizado pelo LHC.



Figura 23: Representação do Mecanismo de Higgs. [1]

III.20. Simetrias e Leis de Conservação

Para resolver o problema da partícula $\Omega^-(sss)$ formada por três quarks strange, por serem férmions, o princípio da exclusão de Pauli não permitiria que ocupassem a mesma vizinhança, ou seja, dentro de um raio limite (o mesmo não acontece para os bósons, com spin inteiro). Assim surgiu a classificação por cores (vermelho, azul e verde) para ser possível diferenciar os quarks, e no caso do $\Omega^-(s_{vermelho}, s_{azul}, s_{verde})$. Essa relação é guiada pelo esquema de cores complementares da luz. A partir daí nasce a QCD (*Quantum Chromodynamic*), em português Cromodinâmica Quântica.

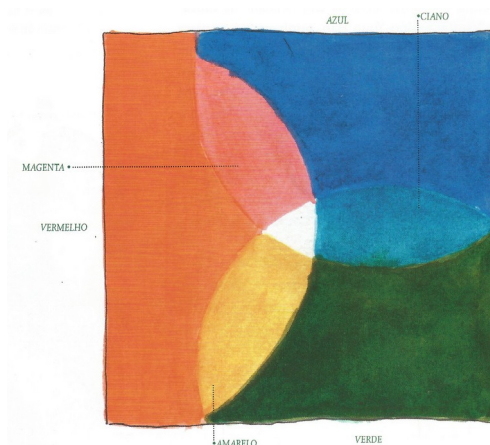


Figura 24: Cores dos quarks e antiquarks. [1]

Com o advento de novos tipos de emulsões e aceleradores de partículas mais sofisticados, foi possível a detecção de uma enorme diversidade de partículas. Então surgiu a necessidade de classificá-las a partir de outras leis de conservação que já não fossem quantidades conservadas como massa, carga, momento linear e spin. Por exemplo, nas reações $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$, Carga Elétrica ($0 \rightarrow +1 - 1$) e $\bar{\nu}_e + n \rightarrow p + e^-$, Carga Elétrica ($0 \rightarrow +1 - 1$).

Questionou-se como seria possível distinguir o neutrino do antineutrino, já que a segunda reação nunca foi vista. Ficou óbvio que não se tratava da mesma partícula. Formulou-se uma nova lei de conservação, Número Leptônico (L): $L = 1$ para léptons, $L = -1$ para antiléptons e $L = 0$ para todas as outras partículas. Essa lei explica porque o próton não decai em elétron e fóton. Da mesma forma foi proposto o Número Bariônico: $A = 1$ para bárions, $A = -1$ para antibárions e $A = 0$ para as outras partículas.

Além de outras leis de conservação baseadas em simetrias, como a (T) inversão temporal: reação ao contrário, (C) conjugado da carga: inversão da carga, (P) paridade: a abstração de observar a reação em frente ao espelho.

III.21. Interações Fundamentais

As interações entre as partículas são descritas por modelos matemáticos muito bem definidos. Em um jogo de ping-pong a bola é o meio de interação, e a forma como jogador (partícula) age, implica na forma como o outro jogador age. As constantes de acoplamento (parâmetro físico que expressa a intensidade da força de interação) são importantes a considerar.

As forças nucleares forte e nuclear atuam exclusivamente no mundo microscópico, ou seja, em distâncias menores que o raio nuclear (10^{-13} cm). As outras duas manifestam-se em curto e longo alcance. A partir da troca de partículas intermediadoras é estabelecida a interação entre as partículas interagentes, bósons, tal que algumas não vivem mais do que o suficiente para transmitir a informação.

Interação Gravitacional é a força de atração entre porções de matéria, que seria mediada pelo gráviton (ainda não detectado). Por enquanto, a Teoria da Relatividade Geral é a que mais bem descreve a interação gravitacional.



Figura 25: Representação da troca de Grávitons. [1]

Interação Eletromagnética é mediada através do fóton, não afeta o gráviton e o neutrino, e é responsável pela interação entre partículas carregadas. A força eletrostática é atrativa com cargas de sinais opostos e repulsiva em cargas de mesmos sinais, que são características de interações mediadas por spin 1.

No eletromagnetismo, a corrente elétrica gera campo magnético, e fluxo magnético gera campo elétrico, ou seja, essas forças são dois aspectos do mesmo fenômeno.



Figura 26: Representação da troca de Fótons. [1]

Interação Fraca é responsável pela troca de "sabores" das partículas. É transmitida pelos bósons de gauge W^- , W^+ , Z^0 , que possuem alcance ($10^{-17}m$) devido serem muito massivos.

Explica os processos nucleares de decaimento radioativo. Um exemplo disso é o decaimento β , que pode ser reinterpretado pela ótica das partículas elementares, quando um nêutron fora do átomo, o bóson W^- interage com quark down transformando em quark up (muda o sabor do quark), o hádron torna-se um próton, depois o bóson decai em elétron e neutrino do elétron.

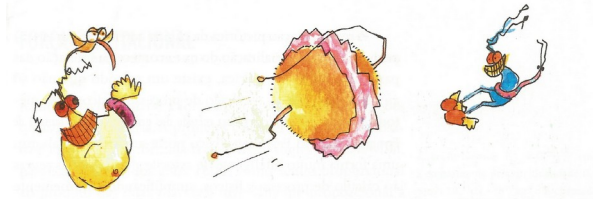


Figura 27: Representação da troca de bósons W. [1]

Interação Forte mantém a coesão nuclear e os núcleons juntos. Atua em curtas distâncias no interior do núcleo e é explicada pela QCD. A título de exemplo, os prótons do núcleo iam se repelir devido a força eletromagnética se não fosse a força forte. É intermediada pelos glúons.

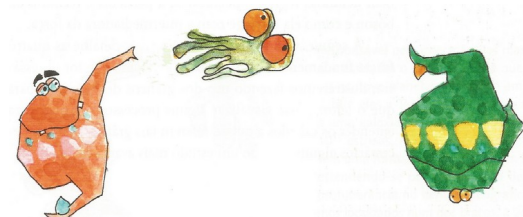


Figura 28: Representação da troca de Glúons. [1]

IV. Conclusão

A Física de Partículas teve início no século XX, no qual houve a descobertas de partículas elementares, ao passo que eram desenvolvidas teorias físicas capazes de descrevê-las. A Eletrodinâmica Quântica, a mais bem sucedida no século XX, portanto, o Modelo Padrão da Física de Partículas é considerado um pilar da Física Teórica.

Ela pode inclusive levar à reformulação da Relatividade Geral como teoria gravitacional. Ainda com lacunas a serem trabalhadas, uma delas é a Força Gravitacional, que a priori, sem comprovação experimental, seria intermediada pelo Gráviton.

V. Agradecimentos

Deixo meus agradecimentos à professora Vanessa Carvalho de Andrade do Instituto de Física da Universidade de Brasília pela orientação. Também a universidade, o Programa de Iniciação Científica vinculado ao Decanato de Pós-Graduação pela oportunidade de

trabalhar como não bolsista. E por fim o grupo de orientandos da professora pelas reuniões e *feedbacks*.

Referências

- [1] Maria Cristina Batoni Abdalla. *O discreto charme das partículas elementares*. 1ª ed. Ilustrações de Sérgio Kon. São Paulo: Editora Unesp, 2006. isbn: 85-7139-641-8.
- [2] Anna Maria Freire Endler. *Introdução à Física de Partículas*. 1ª ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2010. isbn: 978-85-7861-066-1.
- [3] Maria Cristina Batoni Abdalla. *Sobre o discreto charme das partículas elementares*. Disponível em: <<https://www.sbfisica.org.br/fne/Vol6/Num1/charme.pdf>> – acesso em 05 de Outubro de 2022.
- [4] José Abdalla Helayel-Neto Thales Costa Soares Humberto Belich Jr. *Física de Partículas vista pelas Interações Fundamentais e Formação de Professores*. 1ª ed. Ilustrações Adriano dos Santos. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2018. isbn: 978-85-7861-526-0.