



MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS - IFAM**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

POLO 04

ÉRDELEM CRIS GOMES DA SILVA

**FÍSICA DE PARTÍCULAS: UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA INTRODUÇÃO
DO MODELO PADRÃO NAS AULAS DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO**

MANAUS

2024

ÉRDELEM CRIS GOMES DA SILVA

**FÍSICA DE PARTÍCULAS: UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA INTRODUÇÃO
DO MODELO PADRÃO NAS AULAS DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO**

Dissertação apresentada ao Polo 04 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Amazonas (UFAM)/ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física de partículas.

Orientador: Dr. Minos Martins Adão Neto

Manaus

2024

Biblioteca do IFAM – Campus Manaus Centro

- S586f Silva, Édelem Cris Gomes da.
Física de partículas: uma sequência didática para introdução do modelo padrão nas aulas de física do ensino médio / Édelem Cris Gomes da Silva. – Manaus, 2025.
63p. : il. color.
- Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física). – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus Centro; Universidade Federal do Amazonas, 2025.
Orientador: Prof. Dr. Mimos Martins Adão Neto.
1. Física – ensino. 2. Partículas. 3. Modelo padrão. 4. Sequência didática
I. Adão Neto, Mimos Martins. (Orient.) II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Universidade Federal do Amazonas. IV. Título.

CDD 530.07

ÉRDELEM CRIS GOMES DA SILVA

FÍSICA DE PARTÍCULAS: UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA INTRODUÇÃO
DO MODELO PADRÃO NAS AULAS DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO

Dissertação apresentada ao Polo 04 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Amazonas (UFAM)/ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física de partículas.

Aprovada em 09 de agosto de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Minos Martins Adão Neto

Prof. Dr. Minos Martins Adão Neto

Presidente – UFAM

José Roberto Viana Azevedo

Prof. Dr. José Roberto Viana Azevedo

Membro interno - UFAM

Gabriel de Lima e Silva

Prof. Dr. Gabriel de Lima e Silva

Membro externo - UEA



Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - Polo 4

Ata da 68ª Defesa de Dissertação

Aos nove dias do mês de agosto, do ano de dois mil e vinte e quatro, às 14h00, por web conferência, ocorreu a Defesa da Dissertação do mestrando **Érdelem Cris Gomes da Silva** intitulada: **"FÍSICA DE PARTÍCULAS: UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA INTRODUÇÃO DO MODELO PADRÃO NAS AULAS DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO"**, do Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 4 das Instituições de Ensino Superior: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) e Universidade Federal do Amazonas (UFAM). A Banca Examinadora foi composta pelo Prof. Dr. Minos Martins Adão Neto (UFAM), Prof. Dr. Gabriel de Lima e Silva (UEA) e Prof. Dr. José Roberto Viana Azevedo (UFAM). O Professor Doutor Minos Martins Adão Neto, Presidente, deu início aos trabalhos, convidando os membros a comporem a Banca Examinadora. O Presidente fez a leitura dos procedimentos para defesa de dissertação, e convocou o mestrando para fazer a exposição de seu trabalho que, em seguida, foi arguido pelos membros da Banca Examinadora. Após a arguição, a Banca Examinadora reuniu-se privativamente e decidiu pela aprovação do trabalho. Ao final, os presentes foram chamados para tomarem conhecimento do resultado da avaliação, o Presidente da banca comunicou ao interessado que feitas às devidas correções na dissertação, conforme sugestão da banca Examinadora, o discente é obrigado a entregar, na secretaria do polo 4, até sessenta (60) dias após a data da defesa, duas (02) vias impressa e encadernada no formato capa dura, e uma via (01) digital em formato PDF, para os trâmites necessários à concessão do diploma, conforme Resolução Nº.47 – CONSUP/IFAM de 13 de julho de 2015. Nada mais havendo a tratar, foi lavrado a presente Ata que, após lida e aprovada, será assinada pelos presentes.

Prof. Dr. Minos Martins Adão Neto
Presidente - UFAM

Prof. Dr. Gabriel de Lima e Silva
Membro Externo – UEA

gov.br
JOSE ROBERTO VIANA AZEVEDO
Data: 09/08/2024 19:37:36-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. José Roberto Viana Azevedo
Membro Interno - UFAM

A meus queridos e amados pais Sebastião e Tereza.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo apoio e incentivo. Quando eu pensei que não conseguiria vocês estavam ao meu lado, somente nós sabemos o tamanho dessa conquista que é de todos.

Aos meus colegas de curso, por toda parceria e amizade.

Agradeço aos meus professores da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) polo 04 por todo conhecimento compartilhado.

Ao meu orientador, por toda contribuição e direcionamento que me proporcionou realizar este trabalho.

À Shele M. Inhuma, por toda paciência e incentivo, além de estar ao meu lado em todos os momentos.

À Sociedade Brasileira de Física (SBF) por promover este programa de mestrado e proporcionar a tantos, assim como eu, a oportunidade de qualificação.

À CAPES, pelo apoio e concessão de bolsa de estudos, o presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

Estendo meus agradecimentos a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho

Ensinando, os homens aprendem.

Sêneca

RESUMO

A presente dissertação apresenta os resultados do desenvolvimento da pesquisa e implementação de uma sequência didática voltada para o tópico Modelo Padrão da Física de Partículas, fundamentada na teoria de aprendizagem de Lev Vygotsky, bem como nas perspectivas e desafios do ensino de Física no contexto amazônico. Levando em consideração esses desafios inerentes à transposição didática de um tema tão complexo, buscou-se investigar quais abordagens e estratégias seriam mais apropriadas para introduzir o tema Física de Partículas nas aulas do Ensino Médio. Esta sequência didática foi elaborada para se adequar às novas diretrizes e normas estabelecidas para o ensino médio por meio da Base Nacional Comum Curricular BNCC. Em relação às estratégias de ensino, procuramos estabelecer uma abordagem dialógica, voltada para a interdisciplinaridade, dando ênfase no processo de construção da ciência e contribuindo para a alfabetização científica. Os resultados, bem como, a aplicação do produto educacional se mostrou satisfatório no que diz respeito à introdução do Modelo Padrão no contexto das aulas de Física.

Palavras-chave: Ensino de Física. Sequência didática. Modelo Padrão.

ABSTRACT

This dissertation aim to present the results of the research and implementation of a didactic sequence on the topic of the Standard Model of Particle Physics, based on Lev Vygotsky's learning theory, as also on the perspectives and challenges of teaching physics in the Amazonian context. Then taking into account these challenges inherent in the didactic transposition of such a complex subject, we sought to investigate which kind of approaches and strategies would be most appropriate for introducing and teaching the subject of particle physics in high school classes. This didactic sequence was designed to adapt to the new guidelines and norms established for secondary education by the National Common Curriculum Base (BNCC). In terms of teaching strategies, we tried to establish a dialogical approach, focusing on interdisciplinarity, emphasizing the process of building science and contributing to scientific literacy. The results, as well as the application of the educational product, proved to be satisfactory in terms of introducing the Standard Model into the context of physics classes.

Keywords: Physics teaching. Didactic sequence. Standard Model.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CERN	Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear
FMC	Física Moderna e Contemporânea
ZDP	Zona de Desenvolvimento Proximal
QED	Quantum Eledrodinamics
PCP	Projeto Curricular Pedagógico
BNCC	Base Nacional Comum Curricular

Sumário

Sumário.....	25
1 INTRODUÇÃO	14
2. PRESSUPOSTOS TEÓRICOS	17
2.1 A teoria da relatividade restrita.....	17
2.1.1 Transformações de Lorentz	17
2.1.2 Transformação relativística de velocidades.....	20
2.1.3 Dilatação dos tempos	21
2.1.4 Contração das distâncias.....	23
2.1.5 Momentum relativístico.....	24
2.1.6 Energia relativística	26
2.2 Introdução à Física de Partículas	27
2.3 Conceitos Básicos da Física de Partículas	28
2.3.1 O elétron	28
2.3 Antipartículas.....	30
2.3.1 O pósitron.....	30
2.3.2 Para Cada Partícula, uma Antipartícula.....	31
2.3.3 Léptons e Quarks	33
2.3.4 Fótons.....	34
2.4 Interações Fundamentais e partículas mediadoras.....	37
2.4.1 Interação Forte	38
2.4.2 Interação eletromagnética	38
2.4.3 Interação fraca.....	39
2.4.4 Interação Gravitacional.....	39
2.5. O Grande Colisor de Hadrons (LHC).....	40
2.6 O Modelo Padrão	41

2.7 A teoria da mediação de Vygotsky	43
3. REVISÃO DA LITERATURA	45
4 METODOLOGIA	49
4.1 Metodologia de ensino.....	49
4.2 Metodologia do Trabalho.....	50
4.2.1 Descrição das aulas e aplicação da sequência didática.....	51
5 Resultados e discussões	54
5.1 Análise dos resultados do questionário para determinar o perfil da turma.....	54
5.2 Análise dos resultados da avaliação objetiva.....	56
5.3 Análise geral da sequência didática como ferramenta de ensino do Modelo Padrão	59
6 Considerações finais	61
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

Após terem passados mais de cem anos do marco inicial da Física Moderna e Contemporânea (FMC), pouco ainda sobre esse assunto é comentado em salas de aula do Ensino Médio (EM), fazendo com que os conteúdos ministrados sejam reduzidos somente à Física Clássica, desenvolvida até o final do século XIX. Apesar disso, todos temos contato com conceitos e tecnologias que nasceram do fruto dessas pesquisas, muitas delas ainda em curso, como é o caso da Física de Partículas.

É possível que um aluno curse toda sua educação básica sem ter contato com tais conteúdos, indo ao contrário do que estabelece as novas diretrizes, mas não somente isso, se faz necessário contextualizar e dá significado ao que se aprende correlacionando com a vivência do discente, fato que está explícito no documento da Base Nacional Comum Curricular.

Na área de Ciências da Natureza, os conhecimentos conceituais são sistematizados em leis, teorias e modelos. A elaboração, a interpretação e a aplicação de modelos explicativos para fenômenos naturais e sistemas tecnológicos são aspectos fundamentais do fazer científico, bem como a identificação de regularidades, invariantes e transformações. Portanto, no Ensino Médio, o desenvolvimento do pensamento científico envolve aprendizagens específicas, com vistas a sua aplicação em contextos diversos. (BNCC, 2018, p. 548).

A Física pode e deve ser trabalhada dentro de cada contexto onde a escola está inserida, dito isto, é preciso levar em consideração o perfil do aluno a qual este produto será aplicado, dentre outras características a localidade em questão se trata de uma cidade interiorana distante 678 km de Manaus (em linha reta), e a escola é a única que atende a modalidade do Ensino Médio regular para uma população de aproximadamente 16 mil habitantes, segundo o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), seus discentes, em grande parte, seguem o estilo de vida da cidade, muito ligado a pesca e ao cultivo que é a base da economia local, muitos deles ainda são oriundos de comunidades ribeirinhas, acentuando mais ainda a necessidade de adequar os conteúdos dentro da prática pedagógica.

Outro aspecto que precisa ser levado em consideração é a estrutura do ensino básico, mais especificamente em relação às fontes de pesquisas e aos materiais disponíveis (livros, laboratórios, internet), que em sua maioria, ou não estão disponíveis nas escolas, como é o caso dos laboratórios, ou não são os mais adequados, como é o caso dos livros didáticos, onde a

Física Moderna e Contemporânea (FMC) é tratada de forma superficial, geralmente ao final do livro, com pouco ênfase e deslocada dos demais tópicos. Nesse sentido, faz-se necessário procurar meios possíveis de incorporar e tornar acessível temas atuais na prática pedagógica.

Sobre os livros didáticos, vale salientar que:

Em muitas vezes, é, praticamente o único material de apoio a professores e estudantes da rede pública de ensino, e dependendo do interesse do professor e do livro didático escolhido é possível que esses tópicos de Física Moderna e Contemporânea sejam negligenciados. (ALMEIDA,2019, pag.12.)

Ou seja, é preciso dá uma atenção especial a esses livros, dada a sua grande importância na formação e desenvolvimento dos alunos, no sentido de favorecer o aprendizado integral que tenha significado e sentido real.

Tendo em vista estas questões, esta dissertação se propõe de um modo geral, com o objetivo de desenvolver uma sequência didática acerca do tema Física de Partículas, mais especificamente sobre o Modelo Padrão, que de forma simplificada, pode-se dizer que é uma teoria que descreve as partículas fundamentais e a maneira como elas interagem entre si. Uma vez que em raras ocasiões conceitos relacionados a esse tema são contemplados nos livros didáticos e nos debates em sala.

Os motivos para escolha desse tema se justificam, primeiramente, por ser um tópico contemporâneo, com pesquisa ainda em curso, que possui aplicação em tecnologias atuais. Segundo, porque, é necessário desmistificar temas relacionados à ciência, promover debates acerca de conhecimentos científicos e combater o analfabetismo científico, além disso, é possível tratar desse tema de forma interdisciplinar relacionando com a biologia, história, geografia etc. Terceiro, se a sequência didática proposta for desenvolvida numa perspectiva dialógica, é possível avaliar ao final se houve maior motivação e engajamento por parte dos alunos.

A ideia é desenvolver a sequência didática centrada na teoria de Lev Vygotsky, ou seja, aprendizagem de forma mediada. Nessa perspectiva, o professor tem a função determinada de intervir no aprendizado do aluno, provocando progressos que não ocorreriam espontaneamente, de forma sistemática, intencional e planejada, fazendo uso do que Vygotsky chama de Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP), que é o espaço compreendido entre a Zona de

desenvolvimento Real: o que os alunos conseguem fazer sozinhos e a Zona de desenvolvimento potencial: quando só conseguem fazer com ajuda. É aqui que o professor atua para ajudar no aprendizado dos alunos através da mediação, interação e do exemplo.

Para tanto, se faz necessário alinhar o ensino de Física com as competências estabelecidas na base nacional: “Analisar e utilizar interpretações sobre a dinâmica da Vida, da Terra e do Cosmos para elaborar argumentos, realizar previsões sobre o funcionamento e a evolução dos seres vivos e do Universo, fundamentar e defender decisões éticas e responsáveis.” (BNCC, 2018, p. 553).

Estas prerrogativas também se encontram nas orientações da Proposta Curricular e Pedagógica do Amazonas (PCP):

Na Física, os estudantes serão levados a desenvolver competências e habilidades para entender e analisar aspectos cotidianos como, uso racional e consciente das fontes de energia, e qual impacto para um desenvolvimento econômico sustentável, as questões que envolvem a mobilidade urbana, possibilitar a familiarização com temas ligados à Cosmologia, como Buracos Negros e Big Bang, que podem explicar a origem e o destino do Universo e outros. (AMAZONAS, 2021, p. 174)

Ou seja, é preciso trabalhar a formação do aluno como um todo, levando em conta sua vivência, experiências de vida, concepções acerca do universo e intervir paulatinamente, orientando seu desenvolvimento acerca do Modelo Padrão.

Nos capítulos seguintes será desenvolvida a base teórica a qual a sequência didática se apoia, passando por uma breve revisão da literatura, bem como da metodologia de ensino aplicada.

2. PRESSUPOSTOS TEÓRICOS

2.1 A teoria da relatividade restrita

Nesta seção examinaremos um dos princípios básicos que sustentam e são o fundamento para a teoria da física das altas energias, uma vez que os efeitos relativísticos devem ser levados em consideração para a análise dos resultados.

A teoria da relatividade restrita se baseia em dois postulados mencionados explicitamente por Einstein em seu trabalho intitulado “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, publicado no ano de 1905.

Postulado 1: *As leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais.*

Postulado 2: *A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c , qualquer que seja o movimento da fonte.*

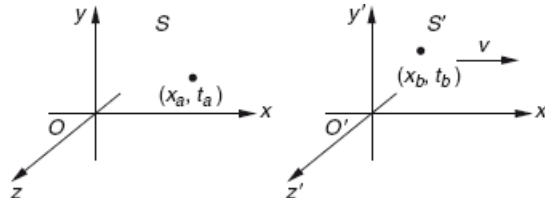
O primeiro postulado é uma extensão do princípio da relatividade newtoniana para incluir todos os fenômenos físicos, não somente os mecânicos, mas também os eletromagnéticos (TIPLER,2019), sendo assim como consequência deste postulado fica caracterizado que não existe um referencial inercial privilegiado. Em outras palavras, as leis da Física descobertas na Terra devem ser as mesmas deduzidas em qualquer ponto utilizado como referência, independente do sistema de coordenadas, essa invariância das equações obtidas para descrever as leis da física que é conhecido como princípio da relatividade.

O segundo postulado define uma propriedade comum a todas as ondas, a sua velocidade, desta forma a velocidade da onda não depende do movimento da fonte. A importância deste postulado está no fato de colocar as ondas eletromagnéticas, que se propagam no vácuo na mesma categoria que outros tipos de onda, as quais necessitam de um meio para se propagar.

2.1.1 Transformações de Lorentz

Uma das consequências dos postulados do trabalho de Einstein, está na relação entre as coordenadas de espaço-tempo de um evento em um referencial S e as coordenadas de um referencial S' que esteja transladando com velocidade constante em relação a S . Iremos analisar somente o caso em que a origem de ambos os sistemas coincide em $t = t' = 0$ e S' se move em relação a S com velocidade v ao longo do eixo x , tendo os eixos y e z paralelos aos eixos y' e z' .

Figura 1: Dois referenciais inerciais, S e S' , com S' movendo-se com velocidade v no sentido positivo do eixo x .



Fonte: TIPLER (2019)

A transformação clássica é dada pelas equações

$$x' = x - vt \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = t \quad 2.1$$

Estas equações expressam os valores das coordenadas medidas pelo observador em S' em relação a S . As transformações inversas são

$$x = x' + vt' \quad y = y' \quad z = z' \quad t = t' \quad 2.2$$

As equações 2.1 e 2.2 estão de acordo com os resultados experimentais em que $v \ll c$ mas não são compatíveis com os postulados da relatividade restrita de Einstein. Logo, as transformações clássicas precisam ser modificadas, mas com a condição de que se reduzam às equações clássicas para $v \ll c$. Uma forma de obter as transformações correta é a seguinte, suponhamos que a relação correta para x' seja

$$x' = \gamma(x - vt) \quad 2.3$$

Onde γ é uma constante que depende de v e c , mas não das coordenadas, além disso $\gamma \rightarrow 1$ quando $v/c \rightarrow 0$, para que a equação 2.3 se reduza à forma clássica. A transformação inversa é dada por

$$x = \gamma(x' + vt') \quad 2.4$$

Como consideramos os eixos dispostos como na figura 1, não há movimento relativo nas direções y e z , de modo que $y' = y$ e $z' = z$, e desta forma iremos ignorá-los a partir de agora. No entanto, a introdução do fator γ altera a transformação clássica $t' = t$.

Substituindo x' dado pela equação 2.3 na equação 2.4 e explicitando t' , temos

$$t' = \gamma \left[t + \frac{(1-\gamma^2)x}{\gamma^2 v} \right] \quad 2.5$$

Se considerarmos o caso em que duas frentes de onda esférica se expandem a partir das duas origens em $t = t' = 0$, do ponto de vista de um observador em S , a equação da frente de onda é dada por

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 \quad 2.6$$

E a do ponto de vista de um observador em S' , é dada por

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2 \quad 2.7$$

Essas duas equações são compatíveis com o segundo postulado e para serem compatíveis com o primeiro postuldo é necessário que a equação 2.6 se transforme na equação 2.7, para tanto é preciso que

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad 2.8$$

Onde $\beta = \frac{v}{c}$. Além disso $\gamma = 1$ para $v = 0$ e $\gamma \rightarrow \infty$ para $v = c$.

Desta forma podemos escrever a equação 2.5 em uma forma mais elegante. Logo, as transformações de Lorentz completas são dadas por

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x - vt) \\ t' &= \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned} \quad 2.9$$

E as transformações inversas são dadas por

$$\begin{aligned} x &= \gamma(x' + vt') \\ t &= \gamma\left(t' + \frac{vx'}{c^2}\right) \\ y &= y' \end{aligned} \quad 2.10$$

$$z = z'$$

2.1.2 Transformação relativística de velocidades

Derivando as equações das transformações de Lorentz podemos obter as transformações da velocidade relativística. Supondo que uma partícula de desloque em S com velocidade \mathbf{u} , suas componentes serão

$$u_x = \frac{dx}{dt} \quad u_y = \frac{dy}{dt} \quad u_z = \frac{dz}{dt} \quad 2.11$$

Um observador em S' mede as componentes

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} \quad u'_y = \frac{dy'}{dt'} \quad u'_z = \frac{dz'}{dt'} \quad 2.12$$

Partindo das transformações de Lorentz

$$dx' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (dx - vt)$$

$$dy' = dy$$

$$dz' = dz$$

$$dt' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(dt - \frac{v dx}{c^2} \right)$$

Portanto obtemos

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (dx - vt)}{\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(dt - \frac{v dx}{c^2} \right)} = \frac{\frac{dx}{dt} - v}{1 - \frac{v}{c^2} \frac{dx}{dt}} = \frac{u_x - v}{1 - \frac{vu_x}{c^2}} \quad 2.13$$

$$u'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(dt - \frac{v dx}{c^2} \right)} = \frac{\frac{dy}{dt}}{\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(1 - \frac{v}{c^2} \frac{dx}{dt} \right)} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} u_y}{1 - \frac{vu_x}{c^2}} = \frac{u_y}{\gamma \left(1 - \frac{vu_x}{c^2} \right)} \quad 2.14$$

$$u'_z = \frac{dz'}{dt'} = \frac{dz}{\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left(dt - \frac{v dx}{c^2}\right)} = \frac{\frac{dz}{dt}}{\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left(1 - \frac{v^2 dx}{c^2 dt}\right)} = \frac{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} u_z}{1 - \frac{vu_x}{c^2}} = \frac{u_z}{\gamma\left(1 - \frac{vu_x}{c^2}\right)} \quad 2.15$$

Esta forma das transformações é válida somente para o caso da figura 1, além disso para $v \ll c$, as transformações relativísticas se reduzem à forma clássica.

A transformação de velocidades inversa é dada por

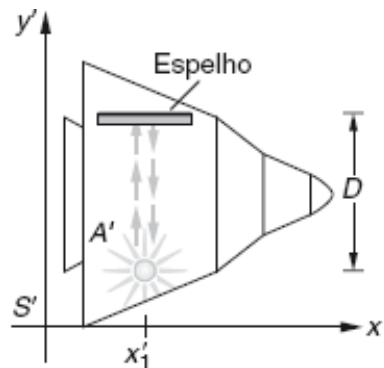
$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{vu'_x}{c^2}} \quad u_y = \frac{u'_y}{\gamma\left(1 + \frac{vu'_x}{c^2}\right)} \quad u_z = \frac{u'_z}{\gamma\left(1 + \frac{vu'_x}{c^2}\right)} \quad 2.16$$

2.1.3 Dilatação dos tempos

Considerando um observador A' em repouso em S' , a uma distância D de um espelho também em repouso no referencial S' , ao produzir um sinal luminoso ele mede um tempo $\Delta t'$ entre o momento que o pulso é gerado e o momento que é detectado após a reflexão no espelho. O intervalo de tempo é dado por

$$\Delta t' = 2D/c$$

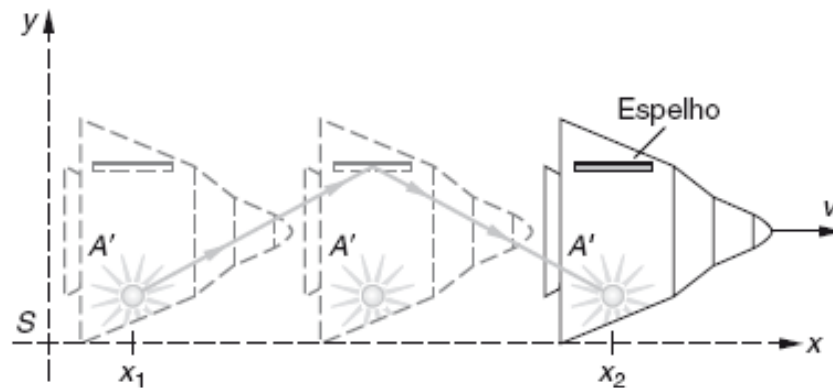
Figura 2: Observador A' em uma espaçonave em repouso no referencial S' .



Fonte: TIPLER (2019)

Considerando os mesmos eventos do ponto de vista de um referencial S , em relação ao qual S' se move para a direita com velocidade v .

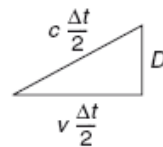
Figura 3: Referencial S movendo-se para direita com velocidade v .



Fonte: TIPLER (2019)

Como a luz percorre uma distância maior em S , mas de acordo com o segundo postulodo com o mesmo valor c , o intervalo de tempo em S é maior que em S' , e pode ser obtido aplicando o Teorema de Pitágoras na figura a seguir.

Figura 4: Triângulo retângulo usado para calcular o intervalo de tempo em S .



Fonte: TIPLER (2019)

Temos

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = D^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2$$

Ou

$$\Delta t = \frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2D}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Lembrando que $2D/c = \Delta t'$, temos

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

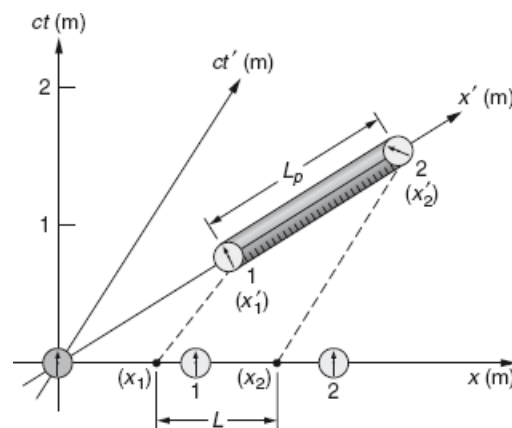
$$\Delta t = \gamma \Delta t' = \gamma \tau \quad 2.17$$

Onde $\tau = \Delta t'$ é o *intervalo de tempo próprio* e a equação 2.17 expressa a *dilatação dos tempos*.

2.1.4 Contração das distâncias

Outra consequência dos postulados é a contração das distâncias, em que no referencial no qual o objeto está se movendo, o comprimento na direção do movimento é sempre menor.

Figura 5: Uma barra em repouso no referencial S' .



Fonte: TIPLER (2019)

O *comprimento próprio*¹ L_p é dado por

$$L_p = x'_2 - x'_1$$

No referencial S a barra está se movendo para a direita com velocidade v , logo em seu comprimento em S é dado por

$$L = x_2 - x_1$$

¹ Medido em S' , onde a barra está em repouso.

Usando a equação 2.19, temos

$$x'_2 = \gamma(x_2 - vt_2)$$

$$x'_1 = \gamma(x_1 - vt_1)$$

Como $t_1 = t_2$, temos

$$x'_2 - x'_1 = \gamma(x_2 - x_1)$$

$$x_2 - x_1 = \frac{1}{\gamma}(x'_2 - x'_1) = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}(x'_2 - x'_1)$$

Então, temos

$$L = \frac{1}{\gamma}L_p \tag{2.18}$$

A equação acima é chamada de *contração das distâncias*², ela expressa que uma barra é menor quando medida em um referencial que está se movendo em relação a outro referencial em repouso.

2.1.5 Momentum relativístico

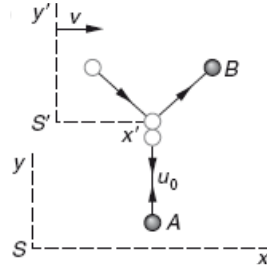
Dois dos fundamentos mais importantes da física clássica são a conservação do momento e a conservação da energia, esses fundamentos estão ligados a simetrias nas leis da física.

A simplicidade e universalidade dessas leis de conservação nos levam a buscar equações para a mecânica relativística que sejam compatíveis com a conservação do momento e da energia e ao mesmo tempo invariantes em relação à transformação de Lorentz (TIPLER,2019). No entanto, o momento definido da forma clássica é conservado somente quando $v \ll c$, porém, é possível definir um *momento relativístico* \mathbf{p} de uma partícula com as seguintes condições: a primeira, \mathbf{p} seja conservado nas colisões e a segunda, $\mathbf{p} \rightarrow m\mathbf{u}$, quando $u/c \rightarrow 0$.

² Também chamada de *contração de Lorentz-FitzGerald*.

Vamos definir a lei de conservação da componente y (fig.6) do momento para um observador em S .

Figura 6: Colisão elástica de duas bolas iguais, do ponto de vista de um observador S .



Fonte: TIPLER (2019)

Definindo a massa da bola do arremessador em S de $m(u_0)$ e a massa da bola do arremessador em S' de $m(u)$, temos antes e depois da colisão

$$m(u_0)u_0 + m(u)u_{yB} = -m(u_0)u_0 - m(u)u_{yB} \quad 2.19$$

A equação 2.19 pode ser escrita na forma

$$\frac{m(u)}{m(u_0)} = -\frac{u_0}{u_{yB}} \quad 2.20$$

Se $u_0 \ll v$, temos também $u_{yB} \ll v$ e, portanto, $u \approx v$. Considerando o caso limite em que as bolas estão em repouso no referencial “local” e a colisão é de “raspão” e supondo que o momento é conservado, temos

$$\frac{m(u = v)}{m(u_0 = 0)} = \frac{u_0}{u_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Que pode ser escrita

$$m(u) = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad 2.21$$

A massa medida por um observador em relação ao qual a bola está em movimento é sempre maior que a massa medida por um observador em relação ao qual a bola está em repouso (TIPLER,2019). Sendo, portanto, o momento relativístico conservado, podemos escrever

$$\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{u}}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \gamma m\mathbf{u} \quad 2.22$$

2.1.6 Energia relativística

Assim como o momento relativístico, precisamos definir a energia relativística de forma a preservar sua invariância nas transformações entre sistemas, para tanto, também é necessárias as seguintes condições: primeiro, a energia total E de qualquer sistema isolado precisa ser conservada e segundo, E tende ao valor clássico quando $u/c \rightarrow 0$.

Partiremos da definição de força na teoria da relatividade restrita

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d(\gamma m\mathbf{u})}{dt} \quad 2.23$$

Assim como na mecânica clássica a energia cinética pode ser E_k pode ser definida como um trabalho realizado por uma força, de modo que podemos escrever:

$$E_k = \int_{u=0}^u \mathbf{F} d\mathbf{x} = \int_0^u \frac{d(\gamma m\mathbf{u})}{dt} d\mathbf{x} = \int_0^u u d(\gamma m\mathbf{u}) \quad 2.24$$

Uma vez que $u = dx/dt$. Após algumas manipulações matemáticas, podemos obter

$$d(\gamma m\mathbf{u}) = m \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)^{-3/2} du \quad 2.25$$

Substituindo essa relação na equação 2.24, obtemos:

$$\begin{aligned} E_k &= \int_0^u u d(\gamma m\mathbf{u}) = \int_0^u m \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)^{-3/2} u du \\ &= mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} - 1 \right) \end{aligned}$$

Ou

$$E_k = \gamma mc^2 - mc^2 \quad 2.26$$

A equação 2.26 é a definição da *energia cinética relativística*. Esta equação possui dois termos, o primeiro depende da velocidade da partícula, e o outro termo é independente da

velocidade. A teoria da Relatividade Restrita é muito útil e fundamental para a Física de Partículas, uma vez, que os efeitos relativísticos precisam ser considerados na teoria do Modelo Padrão.

2.2 Introdução à Física de Partículas

Durante a história, muitas gerações de culturas diferentes têm procurado responder à pergunta: de que são feitas as coisas? Ou, em termos mais precisos, de que é feita a matéria? Dentre as primeiras tentativas conhecidas de responder a essa pergunta pode ser atribuída às especulações do filósofo grego Demócrito (cerca de 460 a.C-370 a.C.), além da teoria atômica de Dalton (1808). Se não levarmos em conta esses acontecimentos, pode-se dizer que a Física de Partículas começou com a descoberta do elétron por Thomson, em 1897 (TIPLER, LLEWELLYN, 2017), apesar disso, no entanto, é considerado como pedra fundamental o trabalho publicado por Yukawa em 1935 para explicar as forças nucleares de curto alcance entre núcleos, utilizando a radiação cósmica, a fonte disponível de alta energia à época, uma vez que não existiam os aceleradores de partículas atuais. A história das ideias sobre a constituição da matéria é uma parte tão importante da história cultural da humanidade quanto da história evolutiva das ideias. Vale a pena destacar o progresso feito na física de partículas elementares nos últimos 50 anos, aproximadamente, para responder às questões: quais são os constituintes mais fundamentais da matéria? Quais são as forças fundamentais que regem esses constituintes e quais são as leis que os regem?

Esse progresso é baseado em experimentos importantes e no desenvolvimento da mecânica quântica e na fundamentação teórica fornecida pela teoria da relatividade de Einstein. Em 1913, Ernest Rutherford descobriu o núcleo atômico, e quando os cientistas começaram a estudar elementos mais pesados, “descobriram o curioso fato de que aparentemente a massa atômica aumenta mais rápido que o número de cargas nucleares, embora ao que tudo indicava, ambos seriam proporcionais ao número de prótons do núcleo.” (CARUSO, OGURI, SANTORO, 2005). Este problema foi resolvido quando Chadwick descobriu o nêutron em 1932.

Desde a década de 1950 muitos países têm construído e investido em aceleradores de partículas na intenção de estudar mais a fundo essa nova área da Física, sem dúvidas o mais famoso projeto nesse sentido é a Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (CERN), onde entre outros aceleradores encontra-se o Grande Colisor de Hádrons (LHC), equipamento que detectou pela primeira vez o Bóson de Higgs no ano de 2012.

Vale ainda ressaltar que a descrição matemática do Modelo Padrão é extremamente complexa, por esse motivo nos limitaremos a uma discussão qualitativa e conceitual, utilizando de equações quando for oportuno.

2.3 Conceitos Básicos da Física de Partículas

2.3.1 O elétron

A mais numerosa e mais antiga de todas as partículas elementares, os elétrons formam a camada externa dos átomos e são responsáveis por fenômenos físicos como eletricidade, magnetismo e luz.

A física de partículas elementares, o estudo das propriedades da matéria e suas interações, teve origem em 1897 com a descoberta da primeira partícula elementar: o elétron. Os nomes elementares são reservados para constituintes da matéria que não são compostos de constituintes mais básicos. No entanto, algumas partículas inicialmente consideradas elementares acabaram se tornando compostas, como átomos e prótons. Os elétrons são as únicas partículas elementares que existem há centenas de anos. Atualmente, acredita-se que a matéria seja composta de dois tipos de partículas: quarks, que compõem os hádrons, como os prótons e nêutrons que compõem os núcleos atômicos, e os léptons, cujos exemplos mais familiares são os elétrons que orbitam em torno dos núcleos atômicos.

Elétrons e quarks são partículas elementares existentes na matéria do cotidiano, mas não são as únicas. Existem outras partículas elementares na natureza, por exemplo, os múons e neutrinos na atmosfera e no espaço interestelar. Outras partículas elementares como o tau e outros quarks podem ser artificialmente criadas.

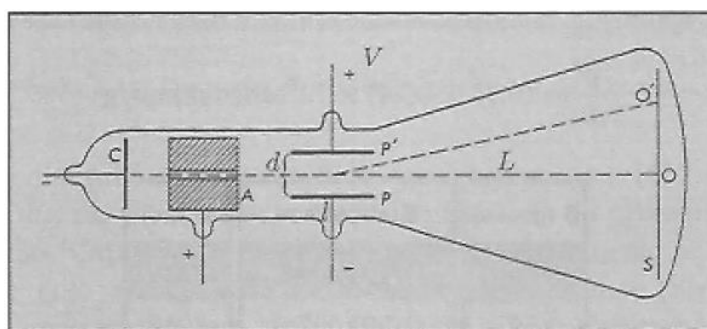
Antes de 1897, vários estudos haviam sido feitos sobre o comportamento dos raios catódicos na presença de forças elétricas e magnéticas. Os raios catódicos são desviados por um campo magnético como se fossem partículas carregadas negativamente. Um cilindro de Faraday colocado fora da trajetória normal do fino feixe de raios catódicos não recebeu carga e começou a receber carga quando foi desviado para o cilindro de Faraday por um ímã, indicando que os raios estavam carregados negativamente. “Porém, até então, esses raios não haviam sido desviados pelo campo elétrico. Hertz concluiu que não eram partículas carregadas. Segundo os físicos alemães, trata-se de uma corrente elétrica que flui através do éter.” (CARUSO, OGURI, SANTORO, 2005). A corrente negativa flui para fora do cátodo e a corrente positiva entra no

cátodo. Thomson foi o primeiro a observar a deflexão de um raio sob a ação de um campo elétrico em 1897.

A razão dada por Thomson para a ausência do desvio observado por Hertz foi atribuída à baixa qualidade do vácuo no interior do tubo, usado nas experiências anteriores, pois os raios catódicos produzem vários íons no gás, que passam a atuar como blindagem para o campo elétrico.

“A verdadeira natureza dos raios catódicos só foi esclarecida pela experiência de J.J. Thomson medindo a razão carga-massa (e/m) das partículas transportadas pelos raios catódicos.” (CARUSO, OGURI, 2016). O tubo de vidro com gás à pressão reduzida contém o catodo e o anodo, o qual tem uma pequena fenda através da qual os raios catódicos podem passar. Raios catódicos acelerados, após passarem pela abertura, se movem com velocidade uniforme e emergem do orifício como um pequeno feixe de secção retangular que causa um pequeno foco luminoso na extremidade direita do tubo de vidro. Quando uma pequena diferença de potencial V é mantida entre as placas paralelas, o foco da luz aparece desviado para baixo pelo campo eletrostático.

Figura 1 – A deflexão do feixe de raios catódicos



Fonte: (CARUSO, OGURI, 2016)

Um par de bobinas de Helmholtz, paralelas e colocadas uma em frente à outra do lado externo do tubo, de forma a produzirem um campo magnético perpendicular ao plano da figura cuja intensidade pode ser determinada pelas dimensões das bobinas e pelas correntes através delas.

Por meio de suas observações, Thomson determinou a razão carga-massa da partícula. Na primeira, para um dado campo elétrico diferente de zero entre as placas, ajustando-se

adequadamente o campo magnético B de forma a anular a deflexão, tornando a força elétrica sobre a carga igual e oposta à força magnética,

$$eE = evB \quad (1)$$

obtendo-se

$$v = B/E \quad (2)$$

Assim, as medidas diretas do campo elétrico e magnético determinam a velocidade das partículas. Tendo-se a velocidade, obtém-se a relação carga-massa pela segunda observação feita por Thomson, ao determinar a deflexão causada apenas pelo campo eletrostático quando campo magnético é nulo. Esta deflexão resulta de uma aceleração uniforme eE/m atuando durante o tempo l/v em que as partículas atravessam o comprimento l das placas. Pelas leis do movimento uniformemente variado, obtém-se

$$S = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \left(\frac{l}{v}\right)^2 \quad (3)$$

O valor da razão e/m é calculado desta equação onde todas as quantidades são conhecidas. Na época, usando esse método, Thomson encontrou:

$$e \approx 2,3 \cdot 10^{17} \text{ esu/g} = 0,8 \cdot 10^{11} \text{ C/kg} \quad (4)$$

Em 1940, em sua autobiografia, Thomson escrevia que os átomos não são indivisíveis, pois partículas negativamente eletrizadas podem ser arrancadas dele pela ação de forças elétricas. Que essas partículas são todas de mesma massa e carregam a mesma carga de eletricidade negativa, qualquer espécie de átomo de que derivem e são constituintes de todos os átomos. Que a massa dessas partículas é menor que a do átomo de hidrogênio. (CARUSO, OGURI, 2016)

No início, Thomson denominou essas partículas de “corpúsculos”, somente depois passou a chamar de elétrons. Com este “corpúsculo” J. J. Thomson abriu a porta para a Física de Partículas no século XX.

2.3 Antipartículas

2.3.1 O pósiton

Em 1932, ano em que foi descoberto o nêutron, o pósitron foi descoberto por Carl Anderson. A partícula tem a mesma massa e o mesmo momento angular intrínseco que o elétron, mas ao contrário do elétron, possui carga positiva. O pósitron, que é a antipartícula do elétron, é representado pelo símbolo e^+ . A existência do pósitron tinha sido prevista por Dirac a partir de uma equação de onda relativística.

A energia de uma partícula relativística é dada pela equação:

$$E^2 = (pc)^2 + (mc)^2 \quad (5)$$

que também pode ser escrita na forma

$$E = \pm[(pc)^2 + (mc)^2]^{1/2} \quad (6)$$

Embora seja natural escolher o sinal positivo e desprezar a solução de energia negativa “por ser ‘fisicamente impossível’, a matemática da equação de Dirac exige a existência de funções de onda correspondentes aos estados de energia negativa, Dirac postulou que todos os estados de energia negativa estão ocupados por elétrons e, por isso, não podem ser observados.” (TIPLER, LLEWELLYN, 2017). Dirac usou o princípio de exclusão para propor que apenas os buracos por ventura existentes nesse “mar infinito” de estados de energia negativa poderiam ser observados. Esses buracos se comportariam como cargas positivas com energias negativas. A descoberta de uma partícula com a mesma massa que o elétron e carga positiva parecia ser uma indicação de que essa interpretação estava correta, ainda mais que, na formação de pares, o pósitron é gerado juntamente com o elétron.

2.3.2 Para Cada Partícula, uma Antipartícula

“A ideia de que estamos imersos em um mar infinito de elétrons de energia negativa, porém, não é das mais confortáveis e foi tornada desnecessária com o desenvolvimento da eletrodinâmica quântica (QED)³ por Feynman e outros no final da década de 1940”. (TIPLER, LLEWELLYN, 2017). A solução de energia negativa da equação de Dirac é considerada como a solução de energia positiva de uma nova partícula (o pósitron). Assim, a necessidade de um “mar” indivisível de elétrons desaparece. Por outro lado, as previsões de Dirac sobre a

³ Do inglês *quantum electrodynamics*.

existência de antielétrons mostraram-se excessivamente modestas. De acordo com a QED, cujas previsões foram confirmadas com mais precisão do que qualquer outra teoria da física, para cada partícula existe uma antipartícula de igual massa e carga oposta.

Assim, por exemplo, a teoria prevê que os prótons e nêutrons, partículas de spin $1/2$ cujas funções de onda são soluções da equação de Dirac, também possuem antipartículas. “A energia mínima necessária para criar um par próton-antipróton é de 1877 MeV . Energias dessa ordem não estavam disponíveis, a não ser nos raios cósmicos, até a construção de aceleradores de alta energia na década de 1950.” (TIPLER, LLEWELLYN, 2017). O antipróton (\bar{p}) foi observado pela primeira vez em 1955, em Berkeley, por Segrè e Chamberlain, que usaram um feixe de prótons com uma energia cinética de $6,2 \text{ GeV}$ produzido por um acelerador de partículas conhecido como Bevatron. O antinêutron (\bar{n}), uma partícula com a mesma massa que o nêutron e momento magnético positivo, foi observado dois anos depois⁴.

Partículas com spin inteiro cuja função de onda não é uma solução para a equação de Dirac também possuem antipartículas. Um exemplo são as partículas de spin nulo, sendo a mais famosa delas o pión, considerado por algum tempo (entre as décadas de 1940 e 1970) a partícula intermediária da interação forte. Cada antipartícula tem a mesma massa que a partícula correspondente, mas os sinais das cargas, número bariônico e estranheza nas partículas e antipartículas são invertidos. Embora seja uma partícula estável, o pósitron tem uma existência efêmera devido à abundância de elétrons. Quando um pósitron e um elétron se encontram, as duas partículas se aniquilam por meio de uma das seguintes reações:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma \quad (7)$$

ou

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma + \gamma \quad (8)$$

Em geral, um elétron e um pósitron se aniquilam mutuamente depois de formarem um estado S (de momento angular orbital zero). Se, nesse estado, os spins estão antiparalelos, são

⁴ A notação genérica para antipartículas consiste em escrever o símbolo da partícula correspondente e acrescentar uma barra superior; entretanto, em muitos casos, costuma-se indicar a carga elétrica.

criados dois fótons, como na reação da esquerda; se os spins estão paralelos, são criados três fótons, como na reação da direita. O fato de chamarmos os elétrons de *partículas* e os pósitrons de *antipartículas* não significa que os pósitrons sejam menos fundamentais que os elétrons, mas apenas que os elétrons são maioria no universo, ou, pelo menos, na região do universo onde vivemos.

2.3.3 Léptons e Quarks

Desde que Thomson descobriu o elétron, as pesquisas teóricas e experimentais de física de partículas “revelaram a existência de 61 partículas e antipartículas (12 léptons, 36 quarks e antiquarks, 12 partículas mediadoras e o bóson de Higgs) que são consideradas fundamentais no sentido de que não possuem uma estrutura interna observável com a tecnologia atual”. (TIPLER, LLEWELLYN, 2017). Isso não quer dizer que novas partículas fundamentais não possam vir a ser descobertas. Na verdade, uma das próximas missões do acelerador de partículas LHC (Large Hadron Collider), que foi responsável pela descoberta do bóson de Higgs em 2012, será testar as previsões teóricas da teoria da supersimetria, segundo a qual cada partícula fundamental possui uma “superparceira”

Muitas partículas carregadas foram "vistas" com a ajuda de detectores de partículas. A existência de muitas partículas eletricamente neutras é inferida indiretamente pela aplicação das leis de conservação às interações envolvendo partículas carregadas. Porém, existe uma classe de partículas que nunca foi observada direta ou indiretamente: são os quarks e suas partículas intermediárias, os glúons. Mesmo assim, ainda acreditamos na existência de quarks e glúons porque todas as suas propriedades e interações são descritas corretamente pelo Modelo Padrão da física de partículas, que perde apenas para a eletrodinâmica quântica em precisão.

Existem três gerações de léptons, cada uma formada por uma partícula carregada e um neutrino correspondente. O elétron é o lépton mais conhecido e o único estável entre os que possuem carga elétrica. (TIPLER, LLEWELLYN, 2017).

A cada lépton é atribuído *um isospin*⁵, A cada lépton corresponde uma antipartícula, mas, no caso dos neutrinos, ainda não se sabe se as duas partículas são diferentes, ou seja, é possível que cada neutrino seja sua própria antipartícula, da mesma forma como o fóton é sua

⁵ Propriedade análoga à componente z do spin.

própria antipartícula⁶. Ao contrário do que acontece com os quarks, não existem estados ligados lépton-lépton. Os cientistas dizem que existem léptons com três sabores: elétron, múon e táuon.

Existem três gerações de quarks, cada uma com seis partículas carregadas. Os quarks e suas antipartículas, os antiquarks, podem se unir para formar mais de 200 partículas e são responsáveis pela maior parte da massa visível do universo. Os estados ligados dos quarks e antiquarks recebem o nome de hádrons⁷.

Existem dois subgrupos de hádrons. As combinações de três quarks são chamadas de *bárions*⁸. No qual, o próton e o nêutron são os dois exemplos mais conhecidos. As combinações de um quark com um antiquark recebem o nome de *mésons*⁹. O nome foi escolhido porque os “primeiros mésons a serem descobertos, os píons, tinham massa maior que a do elétron e menor que a do próton, mais tarde, porém, foram descobertos mésons com massa muito maior que a do próton, de modo que o nome não é mais um indicador da massa dos mésons”. (CARUSO, OGURI, 2016)

É importante salientar que nunca foi observado um quark isolado. Cada quark possui uma propriedade adicional, análoga à carga elétrica, denominada *cor*, que pode assumir três valores: *vermelho*, *azul* e *verde*, representados, respectivamente, pelas letras r , b e g ¹⁰. No caso das antipartículas, a propriedade análoga é chamada de *anticor* e pode assumir três valores: \bar{r} , \bar{b} e \bar{g} .

Assim, por exemplo, existem três quarks u (u_r , u_b e u_g), e três antiquarks. Naturalmente, os nomes nada têm a ver com o significado usual das palavras cor, vermelho, azul e verde, são apenas nomes usados para descrever uma certa propriedade dos quarks, uma escolha que se revelou, talvez por acaso, muito conveniente.

2.3.4 Fótons

⁶ Físicos chamam as partículas com essa propriedade de *partículas de Majorana*.

⁷ Do grego *hadros*, que significa “robusto”.

⁸ Do grego *barys*, que significa “pesado”.

⁹ Do grego *mesos*, que significa “meio”.

¹⁰ Do inglês *red*, *blue* e *green*, respectivamente.

O fóton é sem dúvida a partícula elementar mais notável conhecida pelos cientistas. Ela existe em nossa vida diária na forma de luz e é a principal forma de nos conectarmos com nosso ambiente. Os fótons, a luz, mostram explicitamente as inconsistências em nossas descrições da natureza, contrastando as descrições clássicas e quânticas. As ondas eletromagnéticas, a versão clássica dos fótons, são nossa porta de entrada para a percepção do universo, seja na forma de luz visível ou por meio de instrumentos que estendem nossos sentidos ao restante do espectro. Raramente pensamos na luz em relação aos fótons, porém, o olho humano é um sensor de fótons, um instrumento quântico, por assim dizer.

O estudo da luz fascina-nos desde o início da história. Christian Huygens propõe, em 1677, a teoria ondulatória para a propagação da luz, concluindo, como consequência, que a sua velocidade é diminuída ao entrar em meios mais densos. Ele estabeleceu também as leis da reflexão e refração.

“Isaac Newton publica o livro *Óptica* em 1704, onde descreve a teoria ondulatória para a propagação da luz, mas propõe e joga seu peso na teoria corpuscular para a luz e durante um século a teoria ondulatória é abandonada, ao menos na Inglaterra.” (CARUSO, OGURI, 2016). Ela só foi revivida no início do século XIX por Thomas Young, introduzindo a noção do princípio da interferência da luz, explicando as franjas coloridas em filmes finos, corroborado mais tarde pelos trabalhos de Augustin Fresnel, no qual calculou analiticamente os padrões de difração para vários obstáculos e aberturas com geometrias e explicou, usando a teoria ondulatória, como se dá a propagação retilínea em meios isotrópicos, porém a ideia do éter ainda era presente.

A polarização da luz já era conhecida por Huygens e Newton, porém uma formulação mais consistente e geral só ocorreu quando Étienne Malus, em 1808, descobriu que a luz refletida também sofre polarização, e que ela é propriedade da luz e não do meio em que ela se propaga.

Paralelamente, mas sem conexão, a arcabouço dos fenômenos elétricos e dos magnéticos foram sendo paulatinamente elucidados por cientistas como Ampère, Biot, Ohm, Faraday, Gauss, Coulomb, entre outros. Faraday estabeleceu, em 1845, relação clara entre o magnetismo e a luz, mostrando que a polarização da luz é afetada ao atravessar um campo magnético intenso.

Em, 1884, a velocidade da luz foi medida, pela primeira vez por Fizeau. Ele chegou ao resultado $c = 315\,300\text{ km/s}$, um valor bastante acurado para a tecnologia da época.

Uma grande revolução teórica foi estabelecida por James Clerk Maxwell unificando a eletricidade e o magnetismo, em 1864, deduzindo as equações para os campos eletromagnéticos. O passo crucial para Maxwell foi reconhecer o papel de uma corrente virtual, induzida pela variação temporal do fluxo do campo elétrico, o que ele chamou de corrente de deslocamento. Esta corrente tem um papel paralelo à variação de fluxo magnético na equação de Faraday.

Hertz que apresentou a confirmação experimental da teoria de Maxwell, escreveu:

A ligação entre luz e eletricidade está agora estabelecida... Em cada chama, em cada partícula luminosa, vemos um processo elétrico... Assim, os domínios da eletricidade se estendem por toda a natureza. Ela inclusive nos afeta intimamente: percebemos que temos... um órgão elétrico – o olho. (GRIFFITHS, 2011, pag. 10).

Como já mencionado, uma das consequências das equações de Maxwell é a previsão de sua propagação ondulatória e, mais do que isto, a velocidade de propagação tem o mesmo valor que a da luz, estabelecendo, deste modo a conexão entre eletricidade e magnetismo e a luz. A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, derivada por Maxwell, está relacionada com as propriedades do meio, na notação de hoje,

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}. \quad (9)$$

A Física Moderna foi inaugurada com a descoberta dos Raios X por Wilhelm Roëntgen, em 1895. A natureza eletromagnética destes raios não foi imediatamente reconhecida, mas sabe-se hoje que correspondem a radiações com comprimento de onda muito pequeno e energias muito alta. O advento da Mecânica Quântica foi marcado por Max Plank, quando introduziu a noção da quantização dos modos de oscilação associados à radiação para derivar o espectro do corpo negro. Plank abordou o problema de oferecer uma expressão para o espectro do corpo negro de forma pragmática, mas referiu-se à hipótese dos *quanta* de modos de oscilação a “ato de desespero”. A constante que estabelecia a proporcionalidade entre e energia e a frequência dos *quanta*, hoje, reconhecida como uma das constantes fundamentais da natureza, toma seu nome.

“Apesar do trabalho de Plank introduzir os *quanta* de energia, foi Albert Einstein, em

um dos três trabalhos que publicou no *annus mirabilis* de 1905, que atribui explicitamente uma interpretação do fóton como uma partícula com energia quantizada para explicar o efeito fotoelétrico.” (CARUSO, OGURI, 2016). Em outro trabalho, abandonou o conceito de éter ao formular a teoria da relatividade restrita, postulando a constância da velocidade da luz em qualquer sistema de referência. Estes dois trabalhos formam os alicerces da Física do século XX.

Durante o primeiro quarto daquele século, a formulação quântica da matéria foi amadurecendo gradativamente até culminar na explosão dos anos 20, quando sua formulação foi explicitada por Bohr, Heisenberg, Born, de Broglie, Schrödinger, Pauli, Dirac e outros. A mecânica quântica deu uma explicação consistente para os mecanismos de emissão e absorção de luz pela matéria, permitindo o cálculo, a partir de primeiros princípios, das linhas espectrais dos átomos.

A natureza corpuscular dos fótons evidenciada pela demonstração de que tem associados um momento, foi demonstrada por Arthur Compton, espalhando raios X elasticamente em elétrons, em 1923. Foi ele que cunhou o termo fóton para os quanta de radiação eletromagnética.

2.4 Interações Fundamentais e partículas mediadoras

Todas as forças observadas na natureza, do simples atrito às forças desconhecidas associadas às explosões das supernovas, podem ser descritas em termos de quatro interações básicas a que estão sujeitas as partículas elementares. Em ordem decrescente de intensidade, temos: A interação forte, interação eletromagnética, interação fraca e a interação gravitacional. As forças moleculares e quase todas as forças que observamos entre objetos macroscópicos (como, por exemplo, o atrito, as forças de contato e as forças exercidas por molas e cordas) são manifestações complexas da interação eletromagnética, que acontece entre partículas que possuem carga elétrica. Embora a gravidade, a interação de partículas que possuem massa, desempenhe um papel importante em nossa vida diária, é tão fraca em comparação com as outras forças que seu papel nas interações de partículas elementares pode ser ignorado. A interação fraca descreve, entre outras, a interação entre elétrons ou pósitrons e núcleons que resulta no decaimento beta. A interação forte descreve, por exemplo, a força entre núcleons responsável pela formação dos núcleos atômicos. Algumas partículas participam das quatro interações, enquanto outras participam apenas de algumas.

2.4.1 Interação Forte

Todos os hádrons estão sujeitos à interação forte. Dos dois subgrupos de hádrons, os bárions (formados por combinações de três quarks) têm spin fracionário ($1/2$, $3/2$, $5/2$, etc.), enquanto os mésons (formados por combinações de um quark com um antiquark) têm spin zero ou inteiro. O alcance da interação forte é da ordem de $10^{-15}m = 1 fm$. A constante de acoplamento α_s da interação forte é aproximadamente 1, ou seja, mais de 100 vezes maior que a constante de acoplamento $\alpha \approx 1/137$ da interação eletromagnética. De acordo com o Modelo Padrão, a interação forte está associada à cor, da mesma forma como a interação eletromagnética está associada à carga elétrica. A partícula mediadora da interação forte é o *glúon*.

Como os quarks, os glúons possuem cor, com uma diferença: enquanto um quark possui uma unidade de uma das três cores possíveis, os glúons possuem combinações de uma unidade de cor e uma unidade de anticor. Como são possíveis nove combinações diferentes de r , b e g com \bar{r} , \bar{b} , \bar{g} . Seria de se supor que houvesse nove tipos diferentes de glúons; entretanto, é possível demonstrar que, por uma razão técnica, só existem oito tipos. Uma das consequências do fato de os glúons possuírem cor é que a emissão de um glúon por um quark pode mudar a cor do quark; outra é que os glúons interagem entre si. Como os léptons não possuem cor, não estão sujeitos à interação forte.

2.4.2 Interação eletromagnética

Esta é a interação dominante em escalas maiores que a subatômica, reino da interação forte, e menores que a astronômica, na qual a interação gravitacional domina. Todas as partículas que possuem carga elétrica ou momento magnético participam da interação eletromagnética. Além disso, partículas eletricamente neutras podem interagir eletricamente com partículas carregadas se a emissão de uma partícula virtual resultar em partículas carregadas. Um nêutron que emite e reabsorve uma partícula π^- virtual é um exemplo de partícula neutra que pode interagir eletricamente com uma partícula carregada. O alcance da força eletromagnética é infinito e a força é, aproximadamente 137 vezes menor que a da interação forte. O tempo característico de interação é da ordem de $10^{-18}s$. De acordo com a QED, a partícula mediadora da interação eletromagnética é o fóton. Ao contrário dos glúons que possuem cor, os fótons não possuem carga elétrica. Em geral, os decaimentos através da interação eletromagnética resultam

na emissão de um ou mais fótons, mas existem exceções, como, por exemplo, a reação $\pi^0 \rightarrow e^+e^-$.

2.4.3 Interação fraca

A necessidade de distribuir rapidamente para milhares de cientistas grandes volumes de dados colhidos por detectores nos laboratórios de física de partículas levou o CERN a criar uma rede que mais tarde se transformou na Internet.

Todos os quarks e léptons estão sujeitos à interação fraca, cujo alcance é da ordem de $10^{-18}m$ ($10^{-3}fm$), bem menor que o da interação forte. O tempo de interação característico varia de $10^{-16}s$ a $10^{-10}s$. Não existe um nome especial para a propriedade associada à interação fraca, embora às vezes seja chamada de carga fraca ou carga de sabor, em analogia com a carga elétrica. A interação fraca, cuja intensidade é aproximadamente 105 vezes menor que a da interação forte, é mediada por três partículas¹¹: W^+ , W^- e Z^0 .

As três partículas têm spin 1 e são, portanto, bósons, como todas as partículas mediadoras. Um aspecto muito importante da interação fraca é que as interações mediadas pelas partículas W^+ e W^- mudam o sabor (tipo) dos quarks, mas não mudam o sabor dos léptons.

As partículas mediadoras da interação fraca foram descobertas em 1983, depois de uma longa busca, por C. Rubbia e uma grande equipe internacional de colaboradores, usando o colisor de prótons e antiprótons do CERN, projetado especialmente para a tarefa.

Depois do quark top, que, possui uma massa de $174 \text{ GeV}/c^2$, e do bóson de Higgs, com uma massa estimada de $125 \text{ GeV}/c^2$, Z^0 é a partícula de maior massa conhecida: $91 \text{ GeV}/c^2$, quase 100 vezes maior que a massa do próton. Logo em seguida vêm as partículas W^+ e W^- , com uma massa de $80 \text{ GeV}/c^2$. (TIPLER, LLEWELLYN, 2017).

2.4.4 Interação Gravitacional

Todas as partículas estão sujeitas a interações gravitacionais, mas essa interação é muito fraca e não precisa ser considerada no estudo das partículas elementares. A interação

¹¹ O W vem de “weak”, que significa “fraco” e o Z vem de “zero”.

gravitacional é 10^{-38} mais fraca que a interação forte. Como as interações eletrostáticas, as interações gravitacionais são infinitas em escopo e sua força é inversamente proporcional ao quadrado da distância. As interações gravitacionais são mediadas por partículas chamadas grávitons, que, segundo a teoria, deveriam ter carga zero, massa zero e spin 2. Apesar de algumas tentativas nesse sentido, a partícula ainda não foi observada experimentalmente. As interações gravitacionais são produzidas por massas, que são as "cargas gravitacionais" que correspondem a cores, cargas elétricas e cargas fracas associadas a interações fortes, eletromagnéticas e fracas.

2.5. O Grande Colisor de Hadrons (LHC)

Como mencionado anteriormente, a física de partículas ou física de altas energias tem o seu marco inicial com o trabalho publicado por Yukawa em 1935 sobre as forças de curto alcance entre núcleos utilizando como base para seus estudos a radiação cósmica.

Tempos depois em 1952, surgiu a Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (CERN), um empreendimento voltado exatamente para o estudo dessa recente área e para tanto foi construído o maior colisor de partículas do mundo o LHC. Esse fato iniciou uma nova era em relação as pesquisas da física de altas energias e é obvio que muitas notícias são vinculadas desde então nas mídias, gerando todo tipo de especulação, tanto boas quanto ruins, e por isso a contextualização dessas notícias pode muito bem ser trabalhada como forma de introduzir o tema no Ensino Médio. A oportunidade gerada pela criação do LHC serve tanto para dialogar sobre a Física Moderna, quanto para discutir sobre conceitos que já são comuns no ensino básico (colisões, leis de conservação, eletromagnetismo, termodinâmica), portanto, não se trata somente de introduzir novos conceitos, mas sim, estabelecer novos paralelos sobre a física básica, amplamente estabelecida, e estudos recentes, para compreender as implicações e limites de cada teoria.

Falando mais especificamente sobre seu funcionamento, o LHC opera de modo a ter dois feixes de partículas em direções opostas em seu túnel, com aumento da velocidade destes feixes por um momento e mantendo essa velocidade constante para assim ter múltiplas colisões sucessivas. Espera-se com essas colisões energia de centro de massa (E_{CM}) da ordem de 14 TeV.

As partículas produzidas nesse processo são coletadas pelos quatro detectores (ATLAS¹², CMS¹³, ALICE¹⁴ e LHC-b¹⁵) instalados na extensão de todo o anel do LHC.

2.6 O Modelo Padrão

O Modelo padrão é atualmente (desde 1978) a teoria oficial da física das partículas elementares. Trata-se na verdade de uma combinação de três teorias: a *teoria dos quarks*, que se propõe a explicar a estrutura das partículas; a *teoria eletrofraca*, que é a teoria unificada de duas interações, a interação eletromagnética e a interação fraca; e a *cromodinâmica quântica*¹⁶, que é a teoria da interação forte. (TIPLER, LLEWELLYN, 2017). Embora deixe sem resposta algumas questões importantes, o Modelo Padrão é capaz de explicar muitas das propriedades das partículas fundamentais e de suas interações.

Nesse modelo, as partículas fundamentais são os léptons e os quarks, cada um dos quais existe em seis sabores diferentes divididos em três gerações. Os mediadores das forças são o fóton, as partículas W^+ , W^- e Z^0 e oito tipos de glúons. Os léptons e quarks são férmions de spin $1/2$, que obedecem ao princípio de exclusão de Pauli. Os mediadores das forças são bósons de spin 1, que não obedecem ao princípio de exclusão de Pauli. Todas as forças que existem na natureza se devem a uma das quatro interações básicas: forte, eletromagnética, fraca e gravitacional.

Uma partícula sofre uma interação fundamental se tiver uma carga associada a essa interação. A carga elétrica é a carga associada às interações eletromagnéticas e é transportada por todos os quarks e alguns léptons. Todos os léptons e quarks carregam uma carga associada à interação fraca, chamada de carga fraca ou de sabor. A carga associada à interação forte é a

¹² ATLAS: Acrônimo para o inglês *A Toroidal LHC Apparatus*.

¹³ CMS: Acrônimo para o inglês *Compact Muon Solenoid*.

¹⁴ ALICE: Acrônimo para o inglês *A Large Ion Collider Experiment*.

¹⁵ LHC-B: Destinado ao estudo da física de decaimentos do múon B.

¹⁶ Cromodinâmica Quântica (QCD), é a teoria moderna descreve a interação forte e é análoga à Eletrodinâmica Quântica (QED).

cor; todos os quarks e glúons, mas não os léptons, possuem essa carga. A carga associada às interações gravitacionais é a massa. Deve-se notar que o fóton como mediador da interação eletromagnética não tem carga, e as partículas W^+ , W^- e Z^0 como mediador da interação fraca têm cargas fracas, e os glúons, que são os mediadores da interação forte, são coloridos. Este último fato ajuda a explicar a liberdade assintótica dos quarks.

Toda a matéria é feita de léptons e quarks. Nunca foi observada uma partícula formada por mais de um lépton. Os léptons existem apenas como partículas isoladas. Os hádrons (bárions e mésons) são partículas formadas por quarks. De acordo com a QCD, as únicas combinações permitidas de quarks são as que tornam incolor a partícula resultante. Três quarks de cores diferentes podem se combinar para formar bárions “brancos”, como o nêutron e o próton.

As interações fortes podem se manifestar de duas maneiras: por meio das interações fortes fundamentais, as interações de cor e por meio das interações fortes ou nucleares remanescentes. A interação forte fundamental é responsável pelas forças entre quarks e é mediada por glúons; as demais interações fortes são responsáveis pelas forças entre núcleons, como aquelas entre nêutrons e prótons. Essa força surge devido à interação entre os quarks dos dois núcleons, possivelmente mediada por mésons, e é análoga à interação eletromagnética residual entre átomos neutros, que é responsável, por exemplo, pela liquefação e solidificação de metais nobres, a baixa temperatura.

Para ilustrar como cada partícula elementar está distribuída dentro do Modelo Padrão, podemos considerar a seguinte tabela que se assemelha muito à tabela periódica.

Figura 2 – Modelo Padrão



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo_Padr%C3%A3o.

2.7 A teoria da mediação de Vygotsky

A teoria de Lev Vygotsky parte da premissa que o desenvolvimento cognitivo não pode ser entendido sem referência ao contexto social e cultural no qual ocorre. A asserção que os processos mentais superiores (pensamento, linguagem, comportamento volitivo) tem origem em processos sociais e isso é um dos pilares da teoria de Vygotsky.

No entanto, não se trata apenas de considerar o meio social como variável importante do desenvolvimento cognitivo. “Para ele, o desenvolvimento cognitivo é a conversão de relações sociais em funções mentais.” (MOREIRA, 1999, p. 110).

Porém, de que maneira se convertem no indivíduo essas relações sociais em funções mentais? A resposta para Vygotsky está na mediação, ou atividade mediada indireta, o que em sua concepção é típico da cognição do ser humano. É através da mediação que ocorre a internalização¹⁷. Em outras palavras, a conversão de relações sociais em funções mentais não é direta, mas de forma mediada, e essa mediação por sua vez faz uso de instrumentos e signos. Em sua definição um instrumento é algo que pode ser usado para fazer alguma coisa. Um signo por sua vez, é algo que significa outra coisa. Estes signos são divididos em três tipos:

Indicadores: são aqueles que tem uma relação de causa e efeito com aquilo que significam;

Icônicos: são imagens ou desenhos daquilo que significam;

Simbólicos: os que tem relação abstrata com o que significam;

Para Vygotsky, “é com interiorização de instrumentos e sistemas de signos, produzidos culturalmente, que se dá o desenvolvimento cognitivo”. (MOREIRA, 1999, p. 111). Diferente de outros teóricos cognitivistas, Vygotsky enfoca na interação social, sua análise não é nem meramente no indivíduo, nem somente no contexto, mas na interação entre eles, o que para ele é considerado o elo fundamental entre a transmissão dinâmica de conhecimento social, histórico e científico de inter para intrapessoal.

¹⁷ Internalização: reconstrução interna de uma operação externa.

Os indivíduos, normalmente, não crescem isolados, mas sim interagindo com todos ao seu redor, assim como fazem os alunos de uma escola, estão sempre interagindo entre si, com seus professores e com os demais funcionários, o dentro de sua teoria é fundamental para o desenvolvimento cognitivo, linguístico e instrutivo de qualquer indivíduo.

Dentre os sistemas de signos, a fala, para Vygotsky é o mais importante, pois a libera dos vínculos contextuais imediatos, ou seja. Dito de outra maneira, o momento de maior significado no curso do desenvolvimento intelectual, que dá origem às formas puramente humanas de inteligência prática e abstrata, acontece quando a fala e a atividade prática, normalmente, duas linhas completamente independentes, convergem. A inteligência prática, nesse contexto, se refere ao uso de instrumentos e a inteligência abstrata à utilização de signos ou sistema de signos.

Em se tratando de ensino e aprendizagem, “para Vygotsky o único bom ensino é aquele que está à frente do desenvolvimento cognitivo e o dirige”. (MOREIRA, 1999, p. 120). Nesse contexto, destaca-se o que denomina de Zonas de Desenvolvimento Proximal (ZDP). “A maneira mais simples de explicar a ZDP é dizer que ela é uma espécie de potencial para o desenvolvimento” (LEFRANÇOIS, 2008, p. 269). Além disso, ela dialoga com outras duas, a Zona de desenvolvimento real, ou seja, aquilo que o aluno consegue fazer sozinho e a Zona de desenvolvimento potencial, ou seja, aquilo que o aluno só consegue aprender através de ajuda, no caso, com a intervenção do professor. É entre essas duas zonas que está a ZDP.

O professor tem a função explícita e deliberada de criar situações que estimulem o aluno a desenvolver cognitivamente, provocando progressos que não ocorreriam espontaneamente, portanto, a escola se torna um lugar privilegiado para o desenvolvimento da criança, através da interação, mediação e do exemplo.

Em resumo, “o tema singular mais importante da teoria de Vygotsky pode ser resumido em uma frase: a interação social está profundamente envolvida no desenvolvimento cognitivo”. (LEFRANÇOIS, 2008, P. 266).

3. REVISÃO DA LITERATURA

A seguir vamos citar e explanar um pouco sobre os principais aspectos de alguns trabalhos consultados para o desenvolvimento desta dissertação, é importante salientar que serão destacados somente alguns dos textos pesquisados, pois os mesmos, no nosso entendimento, são os que mais se aproximam da proposta deste trabalho.

Para tanto, a revisão bibliográfica recorreu a livros, e revistas digitais, tais como, a Revista Brasileira de Ensino de Física, da plataforma SCIELO Brasil, na qual há uma grande variedade de artigos, além da Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD).

Com a intenção de filtrar os resultados algumas palavras e combinações de termos foram empregadas, entre elas “ensino de física”, “Física de Partículas”, “Modelo Padrão”, “Grande Colisor de Hádrons LHC”, o que se mostrou bastante satisfatório no que diz respeito aos resultados obtidos.

Tabela 1: Levantamento de artigos sobre Ensino de Física de Partículas no Ensino Médio. Plataformas SCIELO Brasil e BDTD.

Palavras-chave	Resultados	Tipo
Ensino de física + Física de partículas	1484	Artigo
Física de partículas + Ensino Médio	617	Artigo
Modelo Padrão + Ensino De física	73	Artigo
Ensino de Física + LHC	2	Artigo

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Destacamos ainda que no âmbito no programa de mestrado do MNPEF polo 04, foi desenvolvida uma dissertação com a mesma temática no ano de 2016, a qual serviu como uma importante fonte de pesquisa.

Os trabalhos em destaque são:

- **Física de Partículas no Ensino Médio: Eletrodinâmica Quântica:**

O presente trabalho é o primeiro de uma série de artigos cuja proposta principal é apresentar uma nova sequência didática para o ensino de Física de Partículas no ensino médio. Sendo uma discussão sistematizada dessa temática, englobando não só a compreensão de seus conceitos-chave, mas também da própria natureza da Ciência, dos fatores que circundam sua prática e sua relação com tecnologia, sociedade e meio-ambiente, em uma perspectiva voltada à alfabetização científica. No trabalho é apresentada a primeira parte dessa sequência didática, com foco na teoria quântica do eletromagnetismo: a Eletrodinâmica Quântica. Analisando as potencialidades do material proposto, aliado a uma postura dialógica docente, avaliando a presença de indicadores de alfabetização científica e de engajamento dos estudantes ao longo de intervenções aplicadas em uma escola pública de tempo integral.

- **O discreto charme das partículas elementares**

O excelente livro da professora Maria Cristina é pautado por gráficos criativos, ilustrados por Sergio Kon, que conferem individualidade às partículas elementares. Cada uma dessas partículas possui uma imagem pictórica, como uma identidade, ou seja, um caráter único. Partículas leves como léptons têm asas. O próton, por outro lado, não é um elemento fundamental, mas um monstrinho costurado, sugerindo que foi formado a partir de outras partículas. No entanto, os desenhos de Sergio Kon não são o forte do livro, mas sim o uso inteligente do autor da ciência, tecnologia e discurso social ao longo do livro. No geral, a mistificação dos cientistas e da ciência é generalizada, um processo que só aumenta o fosso entre a ciência e a sociedade.

Neste livro, o conhecimento científico é apresentado historicamente, os cientistas cometem erros, equívocos são levantados e refutados, descobertas são acidentais (como a radiação cósmica de fundo), grandes investimentos e colaborações internacionais ocorrem e, como resultado, não apenas a ciência fundamental responde a questionamentos, mas também tecnologias produzidas que existem em nosso cotidiano.

- **Modelo padrão: uma análise dos Livros Didáticos do PNLD para identificar conceitos relacionados a Física de Partículas Elementares**

Considerando que para o ensino de física no Ensino Médio adota-se, geralmente, nas

escolas públicas o livro didático aprovado pelo Programa Nacional do Livro e Material Didático (PNLD) e que esse pode ser o único referencial para professores e estudantes, os autores fizeram o seguinte questionamento: o livro didático pode efetivamente assumir esse protagonismo quando se trata do ensino da Física de Partículas Elementares? Para responder, foram analisadas as resenhas contidas no Guia dos Livros Didáticos do PNLD de 2018 e 2021 utilizando a técnica de análise de conteúdo. Complementar a isso, foram identificados quais conceitos são apresentados nos livros que são objetos de conhecimento para a Física de Partículas Elementares (ou Modelo Padrão). Os resultados da análise de conteúdo evidenciam características que permeiam um livro na condição de material instrucional didático, tais como: metodologia de ensino e conhecimento didático-pedagógico. Os objetos de conhecimento relacionados a Física de Partículas Elementares foram identificados nos livros a partir de um rol de perguntas de caráter dicotômico.

- **Tópicos de FMC: Os átomos... mundos desconhecidos... mundos poderosos**

O presente trabalho teve por objetivo verificar junto aos professores, alunos e livros didáticos, como o tópico da Física Moderna e Contemporânea (FMC) é trabalhado no Ensino de Física do Ensino Médio. O assunto em questão foi: A evolução dos Modelos Atômicos. Neste projeto foi abordado, um tópico de FMC: A questão do Átomo, usando uma Sequência Didática constituída de Questionários, Palavras Cruzadas, Caça Palavras, Simulados, Vídeos, Power Point e Roteiro de Atividades para orientar a pesquisa do tema em questão.

- **Academia do Trovão: a origem fundamental**

Produto educacional desenvolvido por Gisele O. Tallevi, no qual apresenta uma motivante história ilustrada no formato HQ, na qual, enquanto o aluno se diverte, aprende as maravilhas da ciência, desde as menores partículas do universo até os detalhes das forças fundamentais da natureza em uma aventura na maior estrutura científica brasileira, o acelerador de partículas Sírius.

- **Uma abordagem sobre Física de Partículas para alunos do Ensino Médio**

Sequência didática desenvolvida por Hudson Batista da Silva, aluno do MNPEF polo 04 IFAM/UFAM, motivado por reflexões sobre a introdução da Física Moderna e Contemporânea no ensino médio. As atividades propostas subsidiam a abordagem do Modelo

Padrão como teoria que identifica as partículas elementares e suas interações com a aplicação do produto educacional *Da laranja ao universo das partículas*.

- **A câmara de nuvens como estratégia pedagógica para o ensino de raios cósmicos**

Este trabalho, se propôs a explicar o que são raios cósmicos, sua detecção e como se constrói uma câmara de nuvens. Propondo uma nova metodologia de ensino aprendizagem dos conhecimentos e saberes pertinentes aos fenômenos físicos envolvendo raios cósmicos por meio da aprendizagem baseada em projetos. Os estudantes desenvolveram um projeto de construção de uma câmara de nuvens e registraram a detecção desses raios na câmara.

- **Alice no país do quantum**

O livro não constitui uma adaptação da obra “Alice no País das Maravilhas”. Inspirado na produção literária mencionada, como em relação à curiosidade da personagem e às alegorias elaboradas para abordar jogos lógicos, o autor procura explicar assuntos pertinentes a física quântica. Em analogia à entrada de Alice na toca do coelho, no enalço dele, nessa obra, a menina se embrenha no tubo de raios catódicos de sua televisão e persegue um elétron. Estabelecendo diálogos com essas partículas, inicia-se a discussão dos princípios da Incerteza e de Exclusão de Pauli. Na sequência dos capítulos, é abordado a dualidade onda-partícula, características dos férmions e bósons; e, as simetrias e propriedades das partículas elementares, até o problema da medida.

Houve muitos outros trabalhos e fontes que foram consultadas durante a pesquisa e cada uma delas contribuiu significativamente para o desenvolvimento da proposta da sequência didáticas, no entanto, consideramos destacar estas obras acima.

4 METODOLOGIA

4.1 Metodologia de ensino

A seguir, descrevemos como foi desenvolvida a metodologia de ensino aplicada para desenvolver o produto educacional fruto desta pesquisa.

De início, da principal estratégia de aprendizagem foi o “*ensino por descoberta*”, uma vez que a teoria de ensino aplicada está fundamentada na pedagogia cognitivista de Vygotsky, além do mais, se trata de um conteúdo novo para os alunos. No entanto, foi preciso definir um ponto de partida, algo que se aproximasse do dia a dia dos alunos e que ao mesmo tempo fosse possível explorar os fundamentos da Física de Partículas. Foi então que surgiu a ideia de utilizar trechos de filmes de super-heróis, uma vez que todos tinham contato com essas produções e nas mesmas (como será mostrado na sequência didática) há muitas situações de fenômenos físicos cujo conteúdo poderia ser utilizado para questionamentos e introdução dos conceitos e fundamentos a serem trabalhados.

Além disso, a metodologia foi pautada nos seguintes aspectos:

Abordagem dialógica: uma vez que está fundamentada na teoria cognitivista, acreditamos ser uma boa maneira de intervir junto aos alunos, dando suporte e criando situações motivadoras no desenvolvimento do raciocínio lógico-científico acerca das partículas elementares. Muitos alunos já possuem algum grau de conhecimento ou já tiveram contato com algum conceito ou fenômeno quântico, o que facilita no engajamento do conteúdo.

Outro aspecto que foi dado ênfase foi no processo de “fazer ciência” e habilidades correlatas. Isso porque a maioria dos estudantes tem a convicção de que a ciência é estática e não evolui, em outras palavras, muitos pensam que todos os conceitos e leis já estão estabelecidos e nada vai mudar, dito isso é necessário lembrá-los a grande característica da ciência, que a incessante busca pela teoria mais satisfatória possível e sempre aberta a questionamentos. E no momento, um dos melhores temas que nos proporciona essas indagações é justamente a Física de Partículas, uma vez que há muitas questões ainda em aberto.

Alfabetização científica: em tempos em que vem crescendo o fenômeno do negacionismo científico em nosso país, mostrar como se constrói a ciência é fundamental para formar pessoas que desenvolvem seus questionamentos e teses acerca dos mais variados temas

sempre apoiados em estudos científicos.

Aulas dispostas da seguinte maneira:

Tabela 2: Delineamento das aulas da sequência didática.

Aulas	Descrição	Duração
	Apresentação do tema;	
Aula 1: Introdução à Física de Partículas	Motivação: Vídeo filme “Homem-formiga” Discussão: Vídeo “As quatro forças fundamentais”	1 hora-aula
Aula 2: Estrutura atômica da matéria	Motivação: Simulação “Espalhamento de Rutherford” Discussão: O experimento de Thomson	1 hora-aula
Aula 3: Léptons e quarks	Motivação: Vídeo “Do fio de cabelo até o átomo” Discussão: Antimatéria é real?	1 hora-aula
Aula 4: O Modelo Padrão e o LHC	Motivação: Vídeo “O que é o Modelo Padrão” Discussão: O que é o LHC	1 hora-aula

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

4.2 Metodologia do Trabalho

Em nosso primeiro contato com a escola, fomos recepcionados pelo gestor qual se colocou à disposição, e pelo professor da disciplina de Física do terceiro ano do Ensino Médio e na ocasião foi apresentado o projeto de pesquisa a ser aplicado, bem como os métodos e estratégias utilizadas durante as aulas.

De acordo com as orientações recebidas por parte da escola, fomos informados dos horários disponíveis para aplicação da sequência didática, além dos espaços que nos seria cedido, entre eles, laboratório de informática com livre acesso à internet, laboratório de ciências e sala maker, uma vez que se o estabelecimento de ensino em questão se tratava de um Centro de Estudos de Tempo Integral (CETI), o que nos proporcionou maiores possibilidades de aplicação do produto educacional.

4.2.1 Descrição das aulas e aplicação da sequência didática

Com a autorização por parte da escola para a aplicação da Sequência Didática, nos direcionamos para a sala do 3º ano, turma 02, e público de 30 alunos.

No primeiro contato com a turma escolhida foi explicado brevemente a razão da realização da pesquisa, e a quantidade de aulas necessárias para aplicação do produto. Em seguida foi solicitado a todos o preenchimento de uma autorização escrita para que pudessemos realizar a pesquisa, pois os mesmos eram menores de idade, o que proporcional maior segurança para realização das aulas.

Em se tratando da parte pedagógica das aulas, foram utilizados os laboratórios de ciências para as aulas dialogadas e laboratório de informática para utilização de softwares de simulação como por exemplo o Physics Education Technology (Phet), e sala maker onde estava disponível uma impressora 3D, o que tornou possível imprimir e montar modelos atômicos e simular a interação entre partículas elementares.

Em relação às avaliações, no primeiro momento foi aplicado questionário com a intenção de descobrir como eles se sentiam mais a vontade para aprender e uma série de perguntas diagnósticas para sondar a turma sobre a física de partículas e seus conhecimentos prévios, além disso no início de cada aula era feito uma revisão da aula anterior para verificar o que havia sido compreendido e preparar o terreno para o próximo tópico. Ao final da aplicação da sequência didática foi aplicado uma avaliação objetiva individual para toda a turma.

Aula 1

Na primeira aula foi aplicado um questionário diagnóstico e utilizado um trecho do filme Homem-formiga, a intenção foi mostrar que muitos conceitos da Física de Partículas estão presentes em superproduções que eles corriqueiramente assistem, mas que geralmente não se questionam se aquilo de fato faz sentido do ponto de vista científico ou se é possível. Além disso utilizar esses recursos pode motivar e proporcionar maior engajamento durante as aulas. Também foi exposto uma matéria de uma conhecida rede de televisão sobre as quatro forças fundamentais da natureza, o que serviu para dialogar sobre como as notícias relacionadas ao tema em questão são vinculadas pela mídia.

Aula 2

A segunda aula foi realizada na sala maker, pois ela dispunha de data show e uma impressora 3D, e objetos impressos previamente, possibilitando a montagem do modelo atômico de Rutherford-Bohr, além do uso dos simuladores do Phet para demonstrar o experimento que levou à formulação do modelo em questão. Com a utilização de modelos atômicos impressos e de simulações de softwares foi possível estabelecer questionamentos acerca da estrutura da matéria, algo que havia sido proposto nos objetivos da pesquisa, além de mostrar como um conhecimento científico é construído com a colaboração de vários cientistas ao longo dos anos.

Passando pelo detalhamento do experimento de Thomson foi possível mostrar a descoberta da primeira partícula elementar conhecida, o elétron.

Aula 3

Sempre era iniciada uma aula com a revisão do tópico anterior e em seguida, uma rodada de perguntas para a turma para diagnosticar o aprendizado. Na terceira aula foi introduzido o conceito e definição dos léptons e quarks, quais os tipos e características de cada um. Para motivar foi utilizado um vídeo curto mostrando a perspectiva partindo da escala do nosso dia a dia até as menores escalas, chegando até o núcleo atômico. A ideia era trabalhar a pergunta motivadora que nos guiou no início de nossa jornada “Do que são feitas todas as coisas?”. Para complementar essa questão foi utilizado uma pequena parte do filme Anjos e Demônios (Sony Pictures 2009), que tem como pano de fundo a antimatéria sendo utilizada como arma de destruição em massa, mais uma vez o vídeo serviu para questionar o uso racional do conhecimento científico e o potencial de cada descoberta para a humanidade.

Aula 4

A quarta e última aula foi destinada exclusiva para dialogar sobre o que é o Modelo Padrão da Física de Partículas, e como foram descobertas as partículas ao longo do tempo. Partindo de uma reportagem jornalística sobre o Modelo Padrão, os alunos aprenderam como cada partícula está distribuída dentro do modelo, qual delas atua para cada força fundamental e os alunos conheceram o maior responsável por essas descobertas, o Large Hadron Collider (LHC), bem como uma breve explanação da vida e obra de um dos maiores cientistas brasileiro

descobridor do méson pi, Cesar Lattes, encerrando com os limites e desafios para encontrar uma teoria que satisfaça melhor a compreensão do universo..

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é discutido os resultados obtidos após a aplicação da sequência didática, além da aplicação de questionários, questões dissertativas e de avaliação objetiva levando em consideração as orientações e diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) e da Proposta Curricular Pedagógica do Amazonas (PCP), documentos que norteiam e fundamentam o novo ensino médio.

Nesse sentido o PCP orienta que,

A avaliação interna das aprendizagens no Ensino Médio será entendida como processo contínuo de intervenção pedagógica, em que se explicitam, enquanto referenciais o desenvolvimento das Competências Gerais da BNCC, das habilidades gerais e específicas associadas aos Eixos Estruturantes, das habilidades relacionadas aos objetos do conhecimento trabalhados em cada IF e das competências socioemocionais (AMAZONAS, 2021, p. 418).

Ou seja, cada atividade avaliativa é a parte de um todo, que deve ser considerado os avanços progressivos e considerando os aspectos qualitativos acima dos quantitativos.

5.1 Análise dos resultados do questionário para determinar o perfil da turma.

O objetivo do questionário era conhecer ao perfil de cada aluno e assim determinar a melhor maneira de abordar os conceitos da Física de partículas. Em sua maioria as perguntas eram simples e direta no formato de múltipla escolha. Dentre elas podemos citar “Qual sua faixa etária?”, “Qual classe social você se considera?”, “Qual o nível de formação acadêmica você almeja alcançar?” e “Como você prefere adquirir novos conhecimentos?”. Tendo em vista as respostas dos alunos pudemos quantificar da seguinte maneira:

Tabela 3: Respostas do questionário - perfil dos alunos

Perguntas	Respostas dos alunos
Faixa etária da turma	15 – 18 anos
	Classe média baixa – 12 alunos
Classe social	Classe média – 10 alunos
	Classe baixa – 8 alunos

Pergunta	Resposta dos alunos
Nível de formação acadêmica dos pais	Fundamental incompleto – 2 alunos
	Fundamental completo – 5 alunos
	Médio incompleto – 4 alunos
	Médio completo – 1 alunos
	Ensino superior – 3 alunos
Nível de formação acadêmica que deseja alcançar	Ensino médio – 2 alunos
	Ensino técnico – 4 alunos
	Ensino superior – 20 alunos
	Pós-graduação – 4 alunos
Em relação à formação acadêmica recebida na escola	Está de acordo com suas aspirações – 18 alunos
	Precisa de mais estudos para atingir a meta – 12 alunos
Como prefere adquirir novos conhecimentos?	Livros e leitura individual – 10 alunos
	Participando de aulas presenciais – 15 alunos
	Participando de vídeos e cursos online – 5 alunos
Area de interesse profissional	Ciências exatas/Ciências da Natureza – 13 alunos
	Ciências humanas – 8 alunos
	Engenharia e tecnologia – 5
	Artes e cultura – 4 alunos
Já participou de programas de assistência estudantil ou bolsa de estudos?	Sim, atualmente participo – 2 alunos
	Sim, já participei no passado – 1 aluno

	Não, nunca participei – 20 alunos
	Não, mas tenho interesse – 7 alunos
Pergunta	Resposta dos alunos
Quais suas principais fontes de apoio para tomadas de decisões acadêmicas e profissionais?	Pais ou responsáveis – 20 alunos
	Professores – 5 alunos
	Amigos e colegas – 2 alunos
	Mídias sociais e internet – 1 aluno
	Outras fontes – 2 alunos

Fonte 1: Elaborada pelo autor (2024)

Alisando as respostas da turma podemos notar que todos estão matriculados na idade certa para o Ensino Médio, a grande maioria pertence à classe média ou média baixa. Alguns possuem pais com nível de escolaridade baixo o que pode refletir no seu desempenho aquém nos estudos, uma vez que em muitos lares há pouco disponibilidade a um acervo de livros ou acesso à internet, além de atividades culturais. Há ainda que se destacar a forma como a maioria se sente à vontade para buscar novos conhecimentos, o que nos forneceu os caminhos para abordar a Física de partículas.

5.2 Análise dos resultados da avaliação objetiva

A primeira questão da avaliação relacionava o conceito das quatro forças fundamentais com o fenômeno de uma reação química, ou seja, era necessário o aluno conhecer as forças fundamentais e relacionar esses conceitos em uma aplicação prática. Ao todo tivemos 18 acertos e 12 erros, o que corresponde a 60% dos alunos.

A segunda questão exigia dos alunos maior abstração e domínio correto dos conceitos, além de raciocínio lógico-dedutivo. A situação envolvia uma ginasta e as forças que atuavam em seu movimento, mas o foco era descobrir qual das forças fundamentais dava origem às forças mostradas no diagrama, por esse motivo os alunos sentiram maior dificuldade, e o aproveitamento caiu para somente 15 acertos e 15 erros, totalizando somente 50% de acertos.

Na questão três, apesar de trabalhar a carga fracionária dos quarks, em si não era uma

questão complicada, trava-se de uma questão conceitual e o rendimento foi bastante satisfatório. A ideia era responder sobre a carga do quark up, dessa forma contabilizamos um total de 25 acertos e somente 5 erros, correspondendo um aproveitamento de 83,4% para a questão.

A questão quatro se relacionava com a questão anterior, porém dava ênfase para os quarks que se combinam para formar o próton e o nêutron, os alunos deveriam realizar um cálculo simples de soma de frações para determinar a “carga líquida” das duas partículas, nessa questão foi possível os alunos revisarem conceitos básicos de soma de frações, bem como a quantidade de quarks necessários para formação dos prótons e nêutrons. Aqui a quantidade de acertos foi de 22 alunos contra 08 erros, correspondendo a 73,4%.

Para a questão cinco, foi trabalhado o conceito de partícula mediadora, e na ocasião se trava da força eletromagnética, tema da aula sobre forças fundamentais e partículas mediadoras, por se tratar de uma questão de carácter conceitual, não houve muitos problemas para a maioria dos alunos e sendo assim, o aproveitamento para a questão ficou em torno de 76,6%, com um total de 23 acertos contra 07 erros.

Continuando, a questão de número seis, tratava de um aspecto importante e fundamental para a sequência didática, pois tratava do conceito de partículas fundamentais, a qual foi uma das questões norteadoras no início da aplicação da pesquisa, sendo várias vezes frisada nos questionamentos e indagações para os alunos. Para esta questão tivemos bons resultados, sendo seu rendimento de 73,4%, sendo 08 erros e 22 acertos.

O conceito de léptons foi trabalhado na sétima questão, em uma amostra de cinco opções era preciso determinar quais das partículas citadas eram léptons. Aqui os alunos tiveram um pouco de dificuldade, surgindo dúvidas sobre a natureza dos léptons, resultando em penas 18 acertos contra 12 erros, algo em torno de 60% de aproveitamento.

A questão oito versava sobre as limitações do Modelo Padrão e a perspectiva de detectar a partícula mediadora da força gravitacional, a questão foi escolhida para exemplificar o debate em sala de aula dos próximos objetivos da Física de partículas em sua busca de unificar todas as forças fundamentais em uma teoria sólida. No entanto, aqui eles obtiveram êxito em apenas 50% das respostas, portanto, 15 acertos e 15 erros.

Na penúltima questão era necessário conhecer a intensidade e alcance das forças

fundamentais, haja visto, por exemplo a força nuclear forte que tem grande intensidade, mas curto alcance, em comparação com a força gravitacional que possui menor intensidade, mas grande alcance. Nessa questão houve 24 acertos e 06 erros, contabilizando 80% de êxito por parte dos alunos.

Para finalizar a avaliação objetiva, o tópico escolhido para a questão foi o acelerador de partículas LHC do Cerne, o qual é um dos grandes responsáveis pelas importantes descobertas relacionadas à Física de Partículas nas últimas décadas. Na ocasião houve citação ao projeto brasileiro, o acelerador de partículas Sírius. Mas o destaque estava centrado na incrível notícia vinculada nas mídias de todo planeta no ano de 2012, a detecção da partícula que ficou conhecida como Bóson de Higgs. No entanto o aproveitamento por parte dos alunos ficou aquém do esperado para essa questão, cerca de 17 acertos, contra 13 erros, totalizando somente algo em torno de 56,7% de respostas corretas.

A seguir, temos uma tabela mostrando de forma mais clara o rendimento da avaliação.

Tabela 4: Rendimento dos alunos após aplicação da sequência didática

QUESTÃO	APROVEITAMENTO (%)
1	Acertos – 60% Erros – 12%
2	Acertos – 50% Erros – 50%
3	Acertos – 83,4% Erros – 16,6%
4	Acertos – 73,4% Erros – 26,6%
5	Acertos – 76,6% Erros – 23,4%
6	Acertos – 73,4% Erros – 26,6%

7	Acertos – 60%
	Erros – 40%
8	Acertos – 50%
	Erros – 50%
9	Acertos – 80%
	Erros – 20%
10	Acertos – 56,7%
	Erros – 43,3%

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Portanto, se analisarmos cada questão e verificarmos a quantidade de acertos, podemos concluir que os resultados em sua maioria são satisfatórios, principalmente no que diz respeito ao objetivo do projeto de pesquisa e da sequência didática, ou seja, buscar uma forma de introduzir o tópico da Física de partículas, mas precisamente a teoria do Modelo Padrão no Ensino Médio por meio de uma estratégia dinâmica, pautada na teoria cognitiva de Vygotsky, fazendo uso de situações e recursos disponíveis na própria escola, e incentivando os alunos apoiarem seus argumentos em teorias científicas.

5.3 Análise geral da sequência didática como ferramenta de ensino do Modelo Padrão

Partindo dos objetivos estabelecidos no início do projeto de pesquisa e fazendo uma análise com os resultados obtidos, é possível destacar alguns aspectos desta sequência didática: em primeiro lugar houve a intenção deliberada de aproximar conceitos e fundamentos da experiência cotidiana dos alunos, fazendo uso de filmes e incentivo à percepção da física de partículas presentes em seu dia a dia, mesmo que não possamos visualizar tais partículas, ainda assim é possível ter a percepção através de fenômenos, como a gravidade, a presença da luz visível, reações químicas, entre outros.

Em segundo lugar, procuramos ter uma postura de diálogo, sempre propondo situações que incentivavam ao raciocínio lógico e a abstração, que são características próprias do método científico. Além, de não perder de vista a teoria de ensino fundamentada em Vygotsky, fazendo intervenções à medida que julgamos necessário.

Em terceiro lugar essa estratégia dialógica proporciona condições de avaliar continuamente o aprendizado dos alunos, por meios de questionamentos sobre a teoria, bem como a correlação com outras áreas, por exemplo, biologia, matemática, engenharia, enfim, isso abre um leque muito amplo de possibilidades, sendo necessário somente a percepção de direcionar aos objetivos que se almeja alcançar.

Por fim, é evidente que a mesma pode ser adaptada a diferentes contextos, utilizando de diferentes métodos e estratégias, mas é inegável que se trata de uma boa ferramenta para uso em sala de aula, bem como de divulgação dessa importante área da Física.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desde a escolha do conteúdo que viria a ser trabalhado nesta sequência, uma coisa era certa, precisava ser voltado para a Física Moderna e contemporânea, e o motivo para isso está no fato de que é preciso mostrar para os alunos que o desenvolvimento científico da Física não é estático, mais do que isso, é preciso aproximar esse conhecimento desenvolvido nas últimas décadas do grande público, através de debates e formações.

Durante a escolha, percebemos que pouco se falava da Física de Partículas, seja pelo desafio que isso se impõe, ou pela falta de material didático disponível mesmo em livros didáticos distribuídos pelo sistema de educação. Corriqueiramente, em grande parte, somente conteúdo da chamada Física Clássica são abordados nas aulas de ensino médio de nossas escolas locais, em detrimento de toda Física desenvolvimento nos últimos dois séculos. Há, contudo, exceções, mas ainda de forma tímida, esperamos que esta pesquisa tenha a sua contribuição nessa importante tarefa de transposição didática e divulgação de tópicos de Física Moderna.

Salientamos ainda, que este trabalho pode e deve ser melhorado, se adaptando a diferentes contextos, introduzindo tópicos que não foram explorados, através de oficinas, workshops, intercâmbio com outras escolas, palestras, entre outros.

Fica aqui o registro da nossa pequena contribuição no sentido de trazer para as aulas de Física um tema atual, interdisciplinar, e em pleno desenvolvimento, que os desafios da Física de Partículas possam encorajar novas reflexões acerca da estrutura e funcionamento do Universo e novos trabalhos de transposição didática possam ser desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, M. C. B. Sobre o discreto charme das partículas elementares. **Revista Física na Escola**, v. 6, n. 1, 2005. Disponível em <http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol06-Num1/charme1.pdf>. Acesso em 15 jan. 2023
- ALMEIDA, D. P. G. **Física Moderna e Contemporânea no ensino médio**: o livro didático e as representações sociais de docentes. 2019 (Tese de Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- AMAZONAS. Secretaria de Estado de Educação e Desporto. Proposta curricular e pedagógica do ensino médio. Manaus: SEDUC, 2021.
- BASTOS, K. L.; GONÇALVES, K. M.; NETO, J. dos S. C. Modelo padrão: uma análise dos livros didáticos do PNL D para identificar conceitos relacionados a Física de Partículas Elementares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0153>
- BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília: MEC, 2018.
- CABRAL, R. B. S. et al. A câmara de nuvens como estratégia pedagógica para o ensino de raios cósmicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0397>
- CARUSO, F.; OGURI, V. A busca eterna do indivisível: do átomo filosófico aos quarks e leptos. Rio de Janeiro, RJ. 1996. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/qn/v20n3/4954.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.
- CARUSO, F.; OGURI, V. **Física moderna**: origens clássicas e fundamentos quânticos. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CARUSO, F.; OGURI, V.; SANTORO, A. **Partículas Elementares: 100 anos de descobertas**. 1 ed. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2005.
- DAMASIO, F.; CALLONI, G. Plasma: dos antigos gregos à televisão que você quer ver. **Revista Física na Escola**. Física na Escola, v. 9, n. 1, 2008. Disponível em <http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol09-Num1/plasma1.pdf>. Acesso em 12 jan. 2023.
- DORSCH, G. C.; GUIO, T.C.C. Física de partículas no ensino médio Parte I: Eletrodinâmica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0083>
- ENDLER, A. M. F. **Introdução à Física de Partículas**. 1.ed. São Paulo: Livraria da Física, 2010.
- GRIFFITHS, D. J. **Eletrodinâmica**. 3 ed. São Paulo: Pearson, 2011.
- MOREIRA, M. A. O modelo padrão da Física de Partículas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 1, 2009. Disponível em <https://www.scielo.br/j/rbef/a/sMFh5cP7J9S8RzcX-GsmV3fR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 09 de jan. 2023.
- NOBREGA, F. K.; MACKEDANZ, L. F. O LHC (Large Hadron Collider) e a nossa física de cada dia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 1, 2013. Disponível em <https://www.scielo.br/j/rbef/a/pCcqDpv9fTfBFnxKzdM7JDP/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 jan. 2023.

ROSENFELD, R. Os 10 anos da detecção do bóson de Higgs: passado, presente e futuro. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0251>

SCHÄFFER, D.; SCHUMACHER, F.; ORENGO, G. Uma introdução à Física de Partículas para o ensino médio: uma tradução adaptada do texto de Bettelli, Bianchi-Streit e Giacomelli. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0018>

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física moderna**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.