



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ



SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

MNPEF Mestrado Nacion
Profissional em
Ensino de Física

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 43

LARISSA DE SOUSA OLIVEIRA

**INVESTIGANDO O GRANDE MUNDO DAS PEQUENAS PARTÍCULAS: UMA
PROPOSTA PARA ENSINAR FÍSICA DE PARTÍCULAS NO ENSINO MÉDIO**

FORTALEZA

2024

LARISSA DE SOUSA OLIVEIRA

INVESTIGANDO O GRANDE MUNDO DAS PEQUENAS PARTÍCULAS: UMA
PROPOSTA PARA ENSINAR FÍSICA DE PARTÍCULAS NO ENSINO MÉDIO

Dissertação apresentada ao Polo 43 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Ensino de Física Moderna e Contemporânea.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Wellysson de Alencar Sobreira.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O48i Oliveira, Larissa de Sousa.
Investigando o grande mundo das pequenas partículas : uma proposta para ensinar física de partículas no Ensino Médio / Larissa de Sousa Oliveira. – 2024.
164 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Física, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Fernando Wellysson de Alencar Sobreira.
1. Física de Partículas. 2. Aprendizagem Significativa Crítica. 3. Ensino de Física. I. Título.
CDD 530
-

LARISSA DE SOUSA OLIVEIRA

INVESTIGANDO O GRANDE MUNDO DAS PEQUENAS PARTÍCULAS: UMA
PROPOSTA PARA ENSINAR FÍSICA DE PARTÍCULAS NO ENSINO MÉDIO

Dissertação apresentada ao Polo 43 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Ensino de Física Moderna e Contemporânea.

Aprovada em 19/11/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando Wellysson de Alencar Sobreira (Orientador)
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Andrey Chaves
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Marcia Begalli
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Dedico este trabalho aos meus pais, Luzia e Jaziel, que, sob muito sol, fizeram-me chegar até aqui na sombra.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

A Deus, pela oportunidade de realizar esse trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora, Andrey Chaves e Marcia Begalli, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao Prof. Dr. Fernando Wellysson de Alencar Sobreira, pela excelente orientação e pelo apoio em todos os projetos nos quais pedi seu auxílio.

Aos colegas do mestrado, pelo apoio e encorajamento em momentos difíceis da jornada acadêmica.

Ao Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), ao Centro de Pesquisa e Análise de São Paulo (SPRACE), à Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (CERN) e ao Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP), pela organização da Escola de Física no CERN para Professores em Língua Portuguesa, um programa muito importante para a formação continuada de professores de Física.

A todos os familiares, amigos, vizinhos e até desconhecidos que me apoiaram, tanto emocionalmente quanto financeiramente, para que eu pudesse participar da Escola de Física no CERN para Professores em Língua Portuguesa. Essa experiência foi muito importante para o desenvolvimento deste trabalho.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), por ter financiado as diárias referentes à estadia em Portugal durante minha participação na Escola de Física do CERN, e à Secretaria de Educação do Estado do Ceará (SEDUC-CE) por ter autorizado meu afastamento para a participação no referido Programa.

Ao núcleo gestor e professores da EEMTI Professora Adalgisa Bonfim Soares, pelo apoio durante a realização desse mestrado, assim como aos alunos da escola, que aceitaram fazer parte da pesquisa.

Ao meu noivo Breno Rabelo, pela compreensão e suporte oferecidos em todos os momentos.

Às minhas amigas Ana Hélia e Ana Carmélia, pelo apoio e estímulo constantes.

A minha família, meus pais Jaziel e Luzia, meu irmão Jazierison e minha avó Maria Lopes, pelo amor e esforço sem medidas para que eu pudesse concluir esta etapa.

RESUMO

Uma revisão da literatura sobre os desafios do ensino de Física no contexto do Ensino Médio revelou que há grande preocupação com a baixa participação de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no currículo das escolas. Dada a importância do ensino de FMC para que os estudantes desenvolvam uma visão de ciência como parte integrante da sociedade, o presente trabalho buscou construir uma proposta didática que proporcionasse a inserção de tópicos de Física Contemporânea no Ensino Médio. Para tal, adotou-se como marco teórico-educacional a Teoria da Aprendizagem Significativa Crítica, o que resultou na elaboração de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) sobre o tema Física de Partículas. O Produto Educacional produzido consiste em uma cartilha contendo os materiais para se trabalhar desde as primeiras concepções sobre a constituição da matéria até o desenvolvimento do Modelo Padrão das Partículas Elementares e de tecnologias de detecção de partículas subatômicas. A implementação do produto em uma turma de primeira série do Ensino Médio de uma escola da rede pública do Ceará revelou resultados positivos em relação ao conhecimento adquirido pelos alunos e ao protagonismo desenvolvido por eles, facilitando sua aprendizagem significativa crítica. Além disso, verificou-se que, por meio de sua aplicação, o Produto Educacional contribuiu para que os estudantes se sentissem mais motivados a estudar Física.

Palavras-chave: física de partículas; aprendizagem significativa crítica; ensino de física.

ABSTRACT

A review of the literature on the challenges of teaching physics in secondary schools revealed that there is great concern about the low contribution of Modern and Contemporary Physics topics to the school curriculum. Given the importance of teaching Modern and Contemporary Physics for students to develop a vision of science as an integral part of society, this study sought to build a didactic proposal that would allow Contemporary Physics topics to be included in secondary education. To this end, the Critical Meaningful Learning Theory was adopted as the theoretical-educational framework, which resulted in the development of a Potentially Meaningful Teaching Units (UEPS) on the subject of particle physics. The Educational Product developed consists of a booklet containing materials for working from the earliest conceptions of the constitution of matter to the development of the Standard Model of Elementary Particles and technologies for detecting subatomic particles. The implementation of the product in a first grade high school class at a public school in Ceará revealed positive results in terms of the knowledge acquired by the students and the protagonism developed by them, easing up their meaningful critical learning. In addition, it was found that, through its application, the Educational Product contributed to students feeling more motivated to study Physics.

Keywords: particle physics; critical meaningful learning; physics teaching.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Dispositivo de Thomson para determinar a razão e/me de um elétron.	30
Figura 2 – (a) As partículas α emergem de uma fonte radioativa e atravessam a folha de ouro, sendo espalhadas na região angular de Θ a $\Theta + d\Theta$; (b) no equipamento de fato utilizado, há uma placa fluorescente em uma extremidade e um microscópio móvel na outra, permitindo a observação do sinal luminoso sutil provocado pelo impacto de uma partícula α	34
Figura 3 – Equação de transmutação do nitrogênio em um isótopo do oxigênio.....	38
Figura 4 – Traço de ionização deixado por pósitron originário de raios cósmicos ao atravessar uma placa de chumbo de 6 mm em uma câmara de nuvens.....	41
Figura 5 – Uma das primeiras fotos de um pión, que vem dos raios cósmicos e em seguida decai em um múon.	44
Figura 6 – Quadro resumo das partículas do Modelo Padrão.....	49
Figura 7 – Os principais tipos de aceleradores.	50
Figura 8 – Esquema da estrutura de um acelerador linear.....	51
Figura 9 – Partícula de carga Q e massa m entrando com velocidade v em uma região de campo magnético uniforme B . A força magnética F_{mag} faz a carga descrever uma trajetória de raio R	51
Figura 10 – (a) Esquema do ciclotron proposto por Lawrence, com as duas caixas em forma de D, a câmara de vácuo e o oscilador de radiofrequência. (b) Ciclotron de 4.5 polegadas construído por Lawrence e Livingston.	52
Figura 11 – O Bevatron durante o período de construção.....	53
Figura 12 – Representação esquemática de um acelerador do tipo síncrotron.....	54
Figura 13 – O acelerador de partículas Sirius.	55
Figura 14 – O detector ATLAS.	58
Figura 15 – Subsistemas do detector interno.....	59
Figura 16 – Os calorímetros do ATLAS.	60
Figura 17 – Os subsistemas da câmara dos múons.....	61
Figura 18 – Realização do quiz sobre Modelos Atômicos.	78
Figura 19 – Aluno com melhor pontuação recebendo premiação.	80
Figura 20 – Treinamento dos monitores para o MasterClass.	81
Figura 21 – Monitores auxiliando os colegas nas análises dos eventos.	83
Figura 22 – Resultado gerado pelo OPloT a partir das análises dos estudantes.....	83

Figura 23 – Estudante mostrando detecção de evento candidato a bóson de Higgs decaindo em dois fótons..... 89

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultados dos estudantes para o quiz sobre Modelos Atômicos.	79
Gráfico 2 – Respostas para a pergunta “Que atividade você mais gostou de fazer?”.....	88
Gráfico 3 – Respostas para a pergunta “Participar da eletiva fez você se interessar mais por Física?”.	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – As famílias dos léptons.....	46
Quadro 2 – As famílias dos quarks.....	46
Quadro 3 – As partículas mediadoras das interações fundamentais.....	47
Quadro 4 – Cronograma de implementação do Produto Educacional.....	64
Quadro 5 – Aspectos sequenciais para elaboração de uma UEPS.	65
Quadro 6 – Cronograma de aulas aspecto sequencial 4, bloco 1.	67
Quadro 7 – Cronograma de aulas aspecto sequencial 4, bloco 2.	68
Quadro 8 – Cronograma de aulas para realização do MasterClass em Física de Partículas.	69
Quadro 9 – Divisão de equipes para a análise dos eventos do MasterClass.	82
Quadro 10 – Respostas dos estudantes para a pergunta “De forma geral, você gostou de participar da eletiva?”	85
Quadro 11 – Justificativas das respostas para a pergunta “De forma geral, você gostou de participar da eletiva?”	86
Quadro 12 – Exemplos de respostas para a pergunta “O que você mais gostou na eletiva”?..	87
Quadro 13 – Resposta e justificativa da aluna A.J.	91
Quadro 14 – Respostas e justificativas das estudantes G.S. e L.V.....	91
Quadro 15 – Justificativas das estudantes B.F. e F.R.....	92
Quadro 16 – Justificativas de alunos que aumentaram seu interesse em estudar Física após a eletiva.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALICE	<i>A Large Ion Collider Experiment</i>
ATLAS	<i>A Toroidal LHC ApparatuS</i>
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
CERN	Organização Europeia para Pesquisa Nuclear
CMS	<i>Compact Muon Solenoid</i>
CNPEM	Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais
EEMTI	Escola de Ensino Médio em Tempo Integral
FMC	Física Moderna e Contemporânea
HYPATIA	<i>Hybrid Pupil's Analysis Tool for Interactions in Atlas</i>
IPPOG	<i>International Particle Physics Outreach</i>
LAr	<i>Liquid Argon</i>
LHC	<i>Large Hadron Collider</i>
LHCb	<i>Large Hadron Collider beauty</i>
LINACS	Aceleradores Lineares
LNLS	Laboratório Nacional de Luz Síncrotron
MDTs	<i>Monitored Drift Tubes</i>
PD	<i>Pixel Detector</i>
PNLD	Programa Nacional do Livro Didático
PNLEM	Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio
QCD	<i>Quantum Chromodynamics</i> (Cromodinâmica Quântica)
rf	Radiofrequência
RPTs	<i>Resistive Plate Chambers</i>
sTGCs	<i>Small-Strip Thin-Gap Chambers</i>
TGCs	<i>Thin Gap Chambers</i>
UEPS	Unidade de Ensino Potencialmente Significativa
UERJ	Universidade Estadual do Rio de Janeiro
UFJF	Universidade de Juiz de Fora
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USP	Universidade de São Paulo
ZnS	Sulfeto de Zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

e^-	Elétron
ν_e	Neutrino do elétron
μ	Múon
ν_μ	Neutrino do múon
τ	Tau
ν_τ	Neutrino do tau
u	Quark Up
d	Quark Down
c	Quark Charm
s	Quark Strange
t	Quark Top
b	Quark Bottom
g	Glúons
γ	Fóton
W^\pm	Bósons W
Z_0	Bóson Z
H	Bóson de Higgs

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
3	REFERENCIAIS TEÓRICOS PEDAGÓGICOS	19
3.1	Aprendizagem significativa crítica	19
3.1.1	<i>Princípio da interação social e do questionamento</i>	20
3.1.2	<i>Princípio da não centralidade no livro de texto</i>	20
3.1.3	<i>Princípio do aprendiz como perceptor/representador</i>	21
3.1.4	<i>Princípio do conhecimento como linguagem</i>	21
3.1.5	<i>Princípio da consciência semântica</i>	22
3.1.6	<i>Princípio da aprendizagem pelo erro</i>	22
3.1.7	<i>Princípio da desaprendizagem</i>	23
3.1.8	<i>Princípio da incerteza do conhecimento</i>	23
3.1.9	<i>Princípio da diversidade de estratégias/princípio da não utilização do quadro-de-giz</i>	24
3.2	As unidades de ensino potencialmente significativas (UEPS)	24
4	A FÍSICA DE PARTÍCULAS	28
4.1	Da teoria atomista grega ao modelo padrão das partículas elementares – um histórico	28
4.2	O modelo padrão das partículas elementares	45
4.3	Como as partículas subatômicas são descobertas?	49
4.3.1	<i>Aceleradores de partículas</i>	50
4.3.2	<i>Detectores de partículas</i>	56
4.3.3	<i>O experimento ATLAS</i>	58
5	METODOLOGIA	62
5.1	Descrição do produto educacional	64
5.2	Desenvolvimento da UEPS	65
5.3	Princípios da aprendizagem significativa crítica destacados na UEPS	73
5.3.1	<i>Princípio da interação social e do questionamento</i>	73
5.3.2	<i>Princípio da não centralidade no livro de texto</i>	73
5.3.3	<i>Princípio do aprendiz como perceptor/representador</i>	74
5.3.4	<i>Princípio da incerteza do conhecimento</i>	74
5.3.5	<i>Princípio da diversidade de estratégias/princípio da não utilização do quadro-de-giz</i>	75
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
6.1	Avaliação das produções dos estudantes	76

6.1.1	<i>Quiz modelos atômicos</i>	77
6.1.2	<i>MasterClass em física de partículas</i>	80
6.2	Avaliação da UEPS do ponto de vista dos alunos	85
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL	101

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), o ensino de Física nas escolas deve contribuir para que os estudantes compreendam a Física como parte integrante da sociedade em que vivem (Brasil, 2008). Uma vez que a Física Moderna e Contemporânea (FMC) está muito presente na sociedade atual, seja por meio das tecnologias, da divulgação de descobertas no campo das ciências ou mesmo de mídias de entretenimento, abordar tópicos de FMC no Ensino Médio torna-se indispensável para que esse objetivo seja alcançado.

Contudo, para Moreira (2017), o ensino de Física na educação contemporânea está desatualizado tanto em termos de conteúdo como em termos de tecnologias. De fato, apesar de a sociedade estar no século XXI, a Física ensinada nas escolas ainda se encontra no século XIX, pois praticamente não aborda temas como mecânica quântica, física de partículas e supercondutividade. Por que essa realidade é observada, uma vez que a importância de inserir FMC no Ensino Médio já é reconhecida?

Monteiro, Nardi e Bastos Filho (2009) trazem alguns desafios relatados pelos professores: o pouco tempo de aulas semanais frente à grande quantidade de conteúdos de Física Clássica presente no currículo e que precisa ser trabalhada, o formalismo matemático presente em tópicos de FMC e as lacunas na formação docente em relação a como fazer a transposição didática desses conteúdos para o Ensino Médio.

Além disso, não seria interessante introduzir os conceitos de FMC da mesma forma descontextualizada que a Física Clássica vem sendo trabalhada nas escolas (Moreira; Ostermann, 2000). No contexto atual, o ensino centra-se no professor e foca-se na preparação para provas, deixando de lado o aspecto da Física como uma ciência baseada em perguntas, modelos, metáforas e aproximações. Devido a esse fato, acaba não incentivando uma aprendizagem significativa.

Levando em conta o panorama apresentado, o presente trabalho buscou desenvolver uma proposta didática para inserir Física Contemporânea no Ensino Médio. Como tema específico, escolheu-se a Física de Partículas, pois, a partir dela, é possível apresentar a Física como uma ciência viva e dinâmica. Além disso, é um assunto que pode ser trabalhado com uma abordagem que não utilize um formalismo matemático muito elaborado. Buscando colocar o estudante como protagonista do processo de aprendizagem, foi adotada a teoria da Aprendizagem Significativa Crítica como referencial teórico pedagógico para o desenvolvimento dessa proposta pedagógica. Assim, foi elaborada uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) para trabalhar Física de Partículas no Ensino Médio,

abordando desde as primeiras concepções acerca da constituição da matéria até as técnicas modernas de detecção de partículas subatômicas.

Nesse sentido, o trabalho está organizado em seis partes:

- a) introdução, que apresenta ao leitor um panorama geral do trabalho realizado, além de enumerar os capítulos que o constituem;
- b) referencial teórico, abordando desafios na inserção de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, além de questões conceituais acerca da Aprendizagem Significativa Crítica e como implementá-la em sala de aula por meio das UEPS, e finalizando como uma revisão conceitual acerca da Física de Partículas;
- c) metodologia, que traz uma descrição dos processos metodológicos adotados no desenvolvimento da pesquisa, bem como dos aspectos sequenciais da UEPS elaborada e do Produto Educacional desenvolvido;
- d) resultados e Discussões acerca da aplicação do Produto Educacional com uma turma da primeira série do Ensino Médio de uma escola da rede estadual do Ceará;
- e) considerações finais, conectando os resultados alcançados aos objetivos inicialmente propostos;
- f) apêndice, que contém o Produto Educacional desenvolvido e pronto para ser utilizado por outros professores.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo construir uma proposta didática que proporcione a inserção de tópicos de Física Contemporânea no Ensino Médio. Com a aplicação dessa proposta, espera-se contribuir para que os estudantes se sintam mais motivados a estudar Física.

A fim de que esse objetivo seja alcançado, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) selecionar o tema específico de Física Contemporânea a ser trabalhado;
- b) definir o referencial teórico-pedagógico norteador da proposta pedagógica;
- c) desenvolver o produto educacional, incorporando a ele uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS);

- d) implementar o produto educacional e apresentar os resultados obtidos a partir de sua aplicação;
- e) avaliar se houve mudança na motivação para estudar Física entre os estudantes que participaram da aplicação do produto educacional.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Principalmente a partir da década de 1980, diversos estudos acerca da inserção de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio começaram a ser desenvolvidos (Silva; Arengi; Lino, 2013). Dentro dessa linha, uma problemática que surge em muitos trabalhos é a desatualização dos currículos escolares em comparação ao progresso da própria Física.

Terrazzan (1992) destaca que usualmente a física escolar é dividida em temas como Mecânica, Física Térmica, Ondas, Óptica e Eletromagnetismo, todos pertencentes à Física Clássica. Moreira (2017) reitera essa visão, afirmando que a Física ensinada nas escolas praticamente não aborda temas como mecânica quântica, física de partículas e supercondutividade. Ou seja, há uma baixa participação de tópicos de FMC no currículo do Ensino Médio.

Além disso, há a questão de que, em geral, o ensino de Física nas escolas centra-se no professor e foca-se na preparação para provas, deixando de lado o aspecto da Física como uma ciência baseada em perguntas, modelos, metáforas e aproximações (Moreira, 2017). Essa realidade acaba não incentivando uma aprendizagem significativa. Ademais, contribui para que os estudantes criem uma visão da Física como uma disciplina difícil e desinteressante. Conseqüentemente, tem-se a formação de cidadãos passivos e resistentes a mudanças, despreparados para lidar com as constantes transformações que acontecem na sociedade.

Por outro lado, a própria Base Nacional Comum Curricular (BNCC), um dos principais documentos que norteiam a educação no Brasil, destaca a importância de formar estudantes que sejam capazes de investigar, analisar e discutir situações problema que emergem de diferentes contextos socioculturais. Além disso, espera-se que as Ciências da Natureza contribuam para que os alunos possam avaliar o impacto de tecnologias contemporâneas em seu cotidiano, em seus setores produtivos, na economia e nas dinâmicas sociais (Brasil, 2008). Ou seja, espera-se a formação de cidadãos capazes de participar ativamente e de atuar de forma crítica na sociedade em que vivem.

Nesse contexto, a inserção de FMC no Ensino Médio faz-se extremamente relevante, pois ela está presente de muitas formas na sociedade atual. Diariamente, estudantes utilizam tecnologias como lasers e LEDs. Além disso, estão expostos à divulgação de descobertas científicas, como a de que a gravidade afeta igualmente matéria e antimatéria, divulgada em 2023. Essa realidade pode tornar a Física mais instigante, pois mostra cientistas

contemporâneos falando sobre seus experimentos, trazendo a ciência para mais próximo do cotidiano dos estudantes.

Uma experiência desse tipo foi promovida pela Seara da Ciência, equipamento de divulgação científica da Universidade Federal do Ceará (UFC), que organizou uma palestra ministrada pelo professor Cláudio Lenz César, pesquisador em antimatéria no ALPHA/CERN, com o tema “O antiuniverso existe?”. A palestra foi aberta ao público, e contou com a participação de estudantes e professores do Ensino Médio e do Ensino Superior.

Por fim, há também a presença de temas de FMC em mídias de entretenimento, como jogos, filmes e séries. Um exemplo que pode ser diretamente citado é o filme “Oppenheimer”, lançado em 2023, que foi sucesso de bilheteria e ganhou muitos prêmios em festivais de cinema. No filme, o físico J. Robert Oppenheimer trabalha com uma equipe de cientistas durante o projeto Manhattan, o que levou ao desenvolvimento da primeira bomba atômica.

Uma vez reconhecida a importância de se inserir FMC no Ensino Médio, surgem duas outras questões: 1) que assuntos de FMC devem ser ensinados? 2) Como incluir esses assuntos nas aulas?

Buscando responder ao primeiro questionamento, Ostermann e Moreira (2001) realizaram uma pesquisa com físicos, pesquisadores em ensino de Física e professores de Física do Ensino Médio, que apontou a Física de Partículas como um dos tópicos mais indicados para se trabalhar com estudantes a nível médio. Uma das justificativas para a escolha desse tema em específico é o fato de a Física de Partículas prestar-se a apresentar a Física como uma ciência viva e dinâmica, uma vez que o Modelo Padrão, aceito atualmente para essa área, continua em estudo e pode mudar com a descoberta de novas informações (Ostermann; Moreira, 2001).

Esse aspecto da Física de Partículas está em concordância com um ensino de Ciências que busque fazer uma contextualização social, histórica e cultural da ciência e da tecnologia, conforme orienta a BNCC. Trabalhando-se assuntos, por exemplo, a evolução das concepções acerca da estrutura da matéria, é possível mostrar aos estudantes uma Física que é resultado de uma construção social, com impasses e contradições, e que é influenciada por condições políticas, econômicas e tecnológicas de cada local, época e cultura (Brasil, 2008).

Em relação à segunda pergunta, entre as dificuldades relatadas por professores estão o pouco tempo semanal de aulas de Física em comparação com a grande quantidade de conteúdos de Física Clássica que precisam ser trabalhados, a dificuldade trazida pelo formalismo matemático presente em FMC e as lacunas na formação docente no que se refere à

abordagem desses tópicos com estudantes do Ensino Médio (Monteiro; Nardi; Bastos Filho, 2009).

Também é citado como problemática o fato de haver pouco material didático e em ponto de uso disponível para professores, principalmente no que se refere à Física Contemporânea.

Paulo Neto, Oliveira e Siqueira (2019) realizaram uma análise dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea presentes em quatro coleções de livros didáticos aprovadas no Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLEM) de 2009 e no Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) dos anos de 2012, 2015 e 2018. Concluíram que, apesar de temas como teoria da Relatividade e Física Quântica estarem presentes em quase todas as obras, outros temas, por exemplo, Partículas Elementares e Radioatividade, são pouco contemplados ou não aparecem nos livros.

Além disso, muitas vezes os tópicos de Física Moderna e Contemporânea acabam concentrando-se no final do volume 3 das coleções, o que pode gerar duas principais problemáticas: 1) transmitir uma noção de uma Física fragmentada e estagnada no tempo, com a FMC descontextualizada das áreas de estudo da Física Clássica; 2) dificultar a abordagem dos assuntos de FMC, uma vez que a carga horária destinada à disciplina de Física é pequena e pode não dar tempo do professor abordar esses conteúdos (Paulo Neto; Oliveira; Siqueira, 2019).

Nesse contexto, uma estratégia interessante para ensinar FMC seria utilizar a carga horária referente à parte diversificada do currículo trazida dentro da proposta do Novo Ensino Médio. Além disso, conforme explicitam Ostermann e Moreira (2001), pode-se adotar uma abordagem informativa ao tratar desses tópicos, sem envolver complicações matemáticas e utilizando estratégias que envolvam os estudantes ativamente no processo de aprendizado.

3 REFERENCIAIS TEÓRICOS PEDAGÓGICOS

Nessa seção, serão abordadas as principais características da Aprendizagem Significativa Crítica, teoria psicológica da aprendizagem escolhida para fundamentar a elaboração do Produto Educacional. Serão apresentados os princípios necessários para o desenvolvimento desse tipo de aprendizagem nos estudantes, além dos aspectos sequenciais para a elaboração de sequências didáticas baseadas na Aprendizagem Significativa Crítica e denominadas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS).

3.1 Aprendizagem significativa crítica

Buscando contribuir para a diminuição dos desafios enfrentados para a inclusão de temas de FMC no Ensino Médio, o presente trabalho adotou como referencial teórico pedagógico a Aprendizagem Significativa, especificamente sua visão crítica. Portanto, esse tópico aborda aspectos dessa teoria.

Apesar de ter sido proposto há mais de quarenta anos, o conceito de aprendizagem significativa é de grande atualidade (Moreira, 2006). Ao longo dos anos, muitos autores trouxeram significados originais e diferentes perspectivas para esse conceito. Assim, existem distintas visões acerca da aprendizagem significativa, iniciando-se com a visão clássica, proposta por David Ausubel, passando pela humanista de Novak, a interacionista social de Gowin, a cognitiva contemporânea de Johnson-Laird, a da complexidade e progressividade de Vergnaud, a autopoietica de Maturana, a computacional de Araujo e Veit, até chegar à visão crítica de Moreira (Moreira, 2006).

A partir dos resultados advindos desse extenso desenvolvimento, é possível destacar algumas características da aprendizagem significativa:

- a) para haver aprendizagem significativa, novos significados devem ser adquiridos a partir de um material potencialmente significativo. Para tal, a estrutura cognitiva do aprendiz precisa conter ideias de ancoragem relevantes com as quais o novo material possa ser relacionado (Ausubel, 2000);
- b) na aprendizagem significativa, o aprendiz constrói e produz seu conhecimento, pois é um receptor ativo; é seu dever fazer uso dos significados já internalizados para captar os significados dos materiais educativos (Moreira, 2006);
- c) para haver aprendizagem significativa, é fundamental que o aprendiz apresente uma pré-disposição para aprender (Moreira, 2007).

Apesar de reconhecer a importância de todos esses aspectos, para Moreira (2007), não basta que o estudante adquira novos conhecimentos de forma significativa, é necessário, além disso, adquiri-los criticamente. É nesse contexto que se insere a Aprendizagem Significativa Crítica. É por meio dessa aprendizagem que o estudante poderá lidar com as mudanças de forma construtiva, sem deixar-se dominar por elas, e manejar as informações sem sentir-se impotente frente a sua grande disponibilidade e a sua elevada velocidade de fluxo (Moreira, 2006).

Para que seja possível promover uma aprendizagem significativa crítica em sala de aula, Moreira (2006, 2007) apresenta princípios a serem adotados. As seções terciárias abaixo trazem mais informações acerca desses princípios.

3.1.1 Princípio da interação social e do questionamento

Um ensino que se baseia em respostas transmitidas do professor para os alunos durante as aulas e depois dos estudantes para o professor durante as provas tende a gerar aprendizagem mecânica e não crítica. É necessário, portanto, ensinar os estudantes a fazerem perguntas no lugar de decorar respostas.

Se o estudante sabe elaborar sistematicamente perguntas relevantes, apropriadas e substantivas acerca de determinado assunto, mostra que sabe utilizar seu conhecimento prévio de forma não-arbitrária e não-literal, uma evidência da aprendizagem significativa crítica (Moreira, 2006).

3.1.2 Princípio da não centralidade no livro de texto

Esse princípio não trata do abandono do livro texto, e sim da utilização de outros recursos, por exemplo, artigos científicos, contos, poesias, crônicas, obra de arte, dentre outros materiais que representem a produção do conhecimento humano.

Para Moreira (2006), a utilização de materiais diversificados, desde que cuidadosamente selecionados, para além do livro texto é um princípio facilitador da aprendizagem significativa crítica porque contrapõe a ideia de existir um material transmissor de verdades e certezas.

3.1.3 Princípio do aprendiz como perceptor/representador

Em geral, a escola vê o aluno como um receptor de respostas certas, que devem ser memorizadas e reproduzidas (Moreira, 2007). Porém, essa visão é equivocada, pois o aprendiz é, na verdade, um perceptor e representador do mundo: ele o percebe e então o representa.

Para explicitar sua opinião, Moreira (2006) destaca a teoria cognitiva de Johnson-Laird, na qual as pessoas constroem modelos mentais para representar internamente o que captam do mundo. Portanto, tudo que se vê é produto do que se acredita estar lá. Mas o que isso significa no contexto da educação?

Significa que o professor lidará com percepções dos estudantes, que são frutos de percepções prévias de cada um, e por isso únicas, a cada instante. Além disso, o próprio professor é também um perceptor, portanto o que ensina é fruto das suas percepções (Moreira, 2006).

Portanto, para que haja aprendizagem significativa crítica, de nada adianta a transmissão de conceitos absolutos e de verdades universais. Tal aprendizagem apenas se efetivará se o estudante for tratado como um perceptor, que é capaz de representar o mundo a partir do que lhe é ensinado (Moreira, 2006).

3.1.4 Princípio do conhecimento como linguagem

Embora seja verdade que outros animais (além dos seres humano) possuam sistemas de sinais, parece que apenas as pessoas desenvolveram línguas com sistemas de sinais e símbolos (Gowin, 1981).

Ainda segundo Gowin (1981), quando um escritor e um editor compartilham um manuscrito ou quando um professor e um aluno leem juntos um poema, as pessoas envolvidas aprendem significados, pois cada uma dessas práticas humanas desenvolve sua própria linguagem.

Assim, cada linguagem representa uma maneira singular de perceber a realidade (por isso o princípio do conhecimento como linguagem e o princípio do aprendiz como perceptor estão intimamente ligados), e praticamente tudo que se chama “conhecimento” é, na verdade, uma linguagem (Moreira, 2003).

Quando há aprendizagem significativa crítica de determinado assunto, o estudante aprende, para além do conteúdo, sua linguagem (as palavras, os signos, os instrumentos e os

procedimentos) e, por conta disso, abrem-se para ele novas possibilidades de percepção (Moreira, 2003).

3.1.5 Princípio da consciência semântica

Para Moreira (2003), esse princípio implica várias conscientizações, dentre elas:

- a) o significado está nas pessoas, e não nas palavras. Isso ocorre porque, independente do significado que uma palavra possa ter, quem atribuiu esse significado foi uma pessoa. Para fazê-lo, essa pessoa valeu-se de seus conhecimentos prévios e de sua experiência;
- b) ao se representar algo com uma palavra, podem existir vários níveis de abstração. Algumas palavras são mais abstratas ou gerais, enquanto outras são mais concretas e específicas;
- c) o significado das palavras muda, pois o mundo está em constante mudança, porém a fixação de nomes tende a “fixar” o que está sendo nomeado. Nesse sentido, se não há consciência semântica acerca da mudança de significados que as palavras adquirem ao longo do tempo, a percepção da mudança pode ser dificultada.

Para aprender um conteúdo de forma significativa e crítica, o estudante e o professor precisam estar cientes dessas conscientizações. Assim, o estudante pensará em escolhas, no lugar de cair na armadilha da causalidade simples, e em graus de certeza, ao invés de acreditar que as respostas precisam ser necessariamente certas ou erradas (Moreira, 2003).

3.1.6 Princípio da aprendizagem pelo erro

Segundo Moreira (2007), a aprendizagem pelo erro é natural em situações fora da escola: erra-se continuamente e aprende-se continuamente com esses erros. O próprio método científico é uma correção sistemática do erro (Moreira, 2006).

Porém, na escola, o erro é punido. Aprender parece estar restrito a saber enunciar fatos, leis, conceitos e teorias, como se fossem verdades absolutas, que sempre existiram e sempre existirão daquela mesma forma. Para que haja aprendizagem significativa crítica, é preciso que os estudantes se ocupem também dos erros daqueles que pensavam ter descoberto fatos importantes e compreendam o erro, e sua superação, como um mecanismo humano para construir o conhecimento (Moreira, 2006).

3.1.7 Princípio da desaprendizagem

De acordo com Moreira (2006), no contexto da aprendizagem significativa crítica, desaprender é aprender a distinguir entre o relevante e o irrelevante no conhecimento prévio.

Um dos motivos pelos quais esse princípio deve ser adotado está relacionado ao próprio processo de aprender significativamente, segundo a aprendizagem significativa subordinada de Ausubel. Para se aprender significativamente, um novo conhecimento interage com o conhecimento prévio e ancora-se nele. Porém, há situações em que o conhecimento prévio impede o estudante de captar os significados do novo conhecimento. Nesse caso, é preciso que haja uma “desaprendizagem” (Moreira, 2006).

Um exemplo de tal situação, trazido por Paulo e Moreira (2011), surge quando os professores abordam conteúdos relativos à Mecânica Quântica com estudantes que até então estudaram apenas Mecânica Clássica. As duas são muito diferentes. Por exemplo, embora o conceito de posição apareça em ambas, na Mecânica Quântica nem sempre a posição de uma onda-partícula é bem definida. Já o conceito de trajetória, tão importante para a Mecânica Clássica, não faz sentido quando se fala em Mecânica Quântica.

Portando, há certa dificuldade, por parte dos estudantes, em assimilar os conceitos da Mecânica Quântica, uma vez que seus conhecimentos prévios são relativos à Mecânica Clássica. Nesse caso, a aprendizagem significativa crítica acontece quando o aluno “desaprende” (no sentido de não utilizar) os conceitos e estratégias que não são relevantes para o novo aprendizado (Moreira, 2006).

3.1.8 Princípio da incerteza do conhecimento

Esse princípio não reforça o relativismo, nem a indiferença, mas sim defende que não há sentido em ensinar de forma dogmática (Moreira, 2007).

Moreira (2006) destaca que o conhecimento humano está em constante evolução. Modelos que antes eram tidos como “corretos”, hoje não são mais utilizados. Da mesma forma, não há garantias de que, no futuro, os modelos que existem hoje não sejam substituídos por outros mais elaborados.

Desse modo, a aprendizagem significativa crítica ocorre quando o estudante percebe que a humanidade possui uma visão de mundo construída a partir de definições criadas por ela para responder perguntas que ela formulou. Para isso, utiliza-se, por vezes, de metáforas também criadas pela própria humanidade (Moreira, 2006).

Um exemplo pode ser dado quando se pensa na evolução dos modelos atômicos. A humanidade perguntou-se “do que é constituída a matéria?”. Muitos cientistas debruçaram-se sobre essa questão, levando ao surgimento de respostas: modelos atômicos como o de Dalton, o de Thomson, o de Rutherford, o de Bohr, até chegar ao regido pela Mecânica Quântica.

Cada modelo atômico surgia para explicar um fenômeno ou observação que o modelo anterior não podia fazê-lo. Nesse processo, metáforas foram utilizadas, por exemplo, no caso do modelo de Rutherford, conhecido como planetário devido a sua “semelhança”, em termos de estrutura, com o sistema solar. Contudo, quando se aprende de forma significativa e crítica, sabe-se que os elétrons não são planetas, da mesma forma que o núcleo atômico não é um sol (Moreira, 2006).

3.1.9 Princípio da diversidade de estratégias/princípio da não utilização do quadro-de-giz

Apesar do nome, o princípio da não utilização do quadro-de-giz não traz a necessidade de se abolir completamente esse recurso, e sim destaca a necessidade de que o professor diversifique as estratégias de ensino.

Para Moreira (2006), esse princípio e o da não centralização no livro texto são complementares. Enquanto o livro texto representa “a autoridade de onde vem o conhecimento”, o quadro-de-giz simboliza o “método de ensino a ser sempre adotado”. É o que garante que o aluno irá estudar o que foi parafraseado pelo professor e poderá reproduzir na prova tudo que conseguir lembrar.

Utilizar apenas uma estratégia, a do quadro-de-giz (e a de seus sucessores mais modernos, como *datashow*), é considerado por Moreira (2006) como sendo um ensino anti-aprendizagem significativa crítica: o professor escreve, o estudante copia, decora e posteriormente reproduz.

Para que haja aprendizagem significativa crítica, o professor deve utilizar diferentes estratégias instrucionais, que provoquem participação ativa dos estudantes e promovam um ensino centralizado no aluno (Moreira, 2006).

3.2 As unidades de ensino potencialmente significativas (UEPS)

A Aprendizagem Significativa é uma Teoria Psicológica da Aprendizagem. Ausebel, por exemplo, descreve processos psicológicos abstratos, sem citar metodologias

específicas que possam ser adotadas em sala de aula para o desenvolvimento da aprendizagem significativa (Silva Filho; Ferreira, 2018).

Moreira (2006, 2007) aproxima mais essa teoria da realidade da sala de aula e realiza uma mudança de foco ao incluir elementos de uma dimensão crítica quando propõe os princípios que devem ser adotados para que se desenvolva a aprendizagem significativa crítica dos estudantes. Visando a dar um passo adiante, no sentido de propor uma **Teoria da Educação** com base na Teoria da Aprendizagem Significativa, Moreira (2011), sugere a elaboração de sequências didáticas denominadas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS).

Uma revisão da literatura revelou que as UEPS têm sido utilizadas para desenvolver tópicos de Física Moderna e Contemporânea com estudantes da Educação Básica.

Ferreira, Damásio e Rodrigues (2014), trabalharam Física Moderna e Contemporânea no Ensino Fundamental por meio da produção e implementação de UEPS. Foram trabalhados especificamente os temas de Relatividade e Radioatividade, e os resultados indicaram que quando a abordagem foi feita por meio da Radioatividade promoveu-se aprendizagem significativa nos estudantes.

Souza e Andrade Neto (2020) utilizaram UEPS com estudantes da terceira série do Ensino Médio para trabalhar problemas em aberto de Física Contemporânea, por exemplo, Sonoluminescência e Supercondutores de Altas Temperaturas. Os alunos ficaram surpresos ao descobrirem que ainda existem fenômenos que não são completamente explicados pela ciência (retoma-se aqui o Princípio da Incerteza do Conhecimento), e os resultados obtidos indicaram que o desenvolvimento das atividades por meio dos referenciais utilizados e das UEPS foram eficientes no sentido de contribuir para o desenvolvimento do senso crítico e do espírito de pesquisa por parte dos estudantes.

Uma outra experiência é trazida por Schittler e Moreira (2016). Os autores desenvolveram uma UEPS com o tema “laser de rubi” para o ensinar tópicos de Física Moderna e Contemporânea a estudantes da primeira série do Ensino Médio. Como resultado, destacaram que, após a aplicação da UEPS, houve um aumento na predisposição dos estudantes para aprender nas aulas de Física.

Zanette (2021) apresenta uma proposta para ensinar Física de Partículas por meio da vida e da obra do físico brasileiro César Lattes. Para tal, a autora desenvolveu uma UEPS que foi aplicada com estudantes da terceira série do Ensino Médio. Entre os resultados obtidos, destacou que, no decorrer das aulas, as perguntas feitas pelos estudantes foram se tornando mais complexas, demonstrando domínio do conteúdo (fato importante para a consolidação da

aprendizagem, como será visto posteriormente). Além disso, o engajamento dos alunos nas aulas foi aumentando progressivamente, inclusive daqueles que normalmente não participam.

Os resultados obtidos a partir desses trabalhos destacam a importância de serem realizados investimentos em programas de formação continuada para professores, a fim de que esses profissionais possam estar efetivamente preparados para orientar os estudantes e conduzir as discussões em nível mais alto de complexidade que vão surgindo ao longo das aulas.

A partir do exposto, é possível concluir que as UEPS podem ser empregadas, com bons resultados, para o estudo de tópicos de Física Moderna e Contemporânea, por isso sua escolha como Teoria da Educação que fundamenta o desenvolvimento do Produto Educacional desta dissertação. Assim, os próximos parágrafos são dedicados a compreender a estrutura de uma UEPS e os passos necessários para seu desenvolvimento e aplicação.

Segundo Silva Filho e Ferreira (2018), a estrutura das UEPS deve conter: levantamento dos conhecimentos prévios dos estudantes; elaboração dos organizadores prévios; construção das situações-problema; realização da diferenciação progressiva dos conceitos; realização da reconciliação integradora; efetivação do processo de consolidação e avaliação da aprendizagem significativa. Moreira (2011) conceitualiza alguns desses termos:

- a) o **organizador prévio** é um material introdutório, apresentado antes do material a ser aprendido significativamente. A principal função do organizador prévio é fazer a ponte entre o que o estudante já sabe e o que ele deveria saber para que seja possível aprender o novo conteúdo;
- b) a **diferenciação progressiva** ocorre quando as ideias, os conceitos e as proposições mais gerais do conteúdo são apresentadas no início do ensino e vão sendo diferenciadas progressivamente ao longo do processo;
- c) para que haja **reconciliação integradora**, o ensino deve explorar as relações existentes entre ideias, conceitos e proposições, apontando as semelhanças e diferenças e reconciliando discrepâncias reais ou aparentes;
- d) nessa estrutura, a **consolidação** apenas poderá ocorrer quando houver domínio do que se está estudando antes que novos materiais sejam introduzidos.

Estabelecida a estrutura das UEPS, quais devem ser os aspectos sequenciais a serem realizados para seu desenvolvimento? De acordo com Moreira (2011), são:

- a) definir o tópico específico a ser abordado;
- b) criar/propor situações que levem o estudante a externalizar seu conhecimento prévio no contexto da matéria de ensino;

- c) propor situações problema, em nível introdutório, que preparem o estudante para a introdução do tema que se pretende ensinar. Essas situações podem funcionar como organizador prévio, e podem ser propostas por meio de simulações, vídeos ou perguntas relacionadas a problemas do cotidiano, mas sempre com caráter acessível e problemático, não como atividade de aplicação rotineira de um algoritmo;
- d) apresentar o conhecimento a ser ensinado/aprendido, levando em conta a diferenciação progressiva e usando estratégias que envolvam a participação ativa do estudante, por exemplo, realizar uma pequena exposição oral sobre o tema e, em seguida, propor uma atividade em grupo para os alunos;
- e) dar continuidade ao conteúdo da unidade de ensino, contudo, fazê-lo em nível mais alto de complexidade. Para tal, o professor deve dar novos exemplos e destacar semelhanças e diferenças relativas às situações já trabalhadas;
- f) concluir a unidade, dando seguimento ao processo de diferenciação progressiva ao retomar-se as características mais relevantes do conteúdo sob uma perspectiva integradora;
- g) realizar uma avaliação somativa individual, com a utilização de questões, sobre o conteúdo trabalhado na UEPS. Ao final do processo, os resultados obtidos pelos estudantes na avaliação somativa são adicionados aos resultados obtidos com a avaliação formativa, ou seja, com tudo que foi produzido pelos estudantes ao longo da aplicação da UEPS e que possa ser considerado indício de aprendizagem significativa;
- h) finalizar realizando uma avaliação da própria UEPS. Sua aplicação apenas pode ser considerada exitosa se a avaliação de desempenho dos estudantes fornecer evidências de aprendizagem significativa.

Destaca-se que, em todos os passos, deve-se incluir os princípios trazidos por Moreira (2006, 2007) para efetivação da aprendizagem significativa crítica: os materiais e as estratégias devem ser diversificados, o questionamento deve ser privilegiado e o diálogo deve ser estimulado (Moreira, 2011).

4 A FÍSICA DE PARTÍCULAS

Esta seção contém a fundamentação teórica, a nível de ensino superior, acerca dos conteúdos de FMC trabalhados com os estudantes na implementação do Produto Educacional. Foram eles: evolução das ideias acerca da concepção da matéria, Modelo Padrão das Partículas Elementares e obtenção e detecção de partículas subatômicas. Portanto, as informações aqui apresentadas podem servir de apoio ao professor que deseje mais detalhes acerca desses conteúdos.

4.1 Da teoria atomista grega ao modelo padrão das partículas elementares – um histórico

Desde a antiguidade, o homem se interessa pela origem dos fenômenos naturais. Ainda hoje, perguntas como "do que a matéria é composta?", "por que é estável?" e "qual sua origem?" fazem parte da rotina dos físicos (Abdalla, 2006).

Na Grécia Antiga, uma escola conhecida como teoria atomista, criada pelo filósofo grego Leucipo (480 - 420 AEC) e desenvolvida por seu aluno Demócrito (460 - 370 AEC), acreditava que toda a matéria do mundo era composta por pequenas partículas indestrutíveis, os átomos, palavra derivada do grego *atomos*, que significa indivisível (Abdalla, 2006).

De acordo com Peduzzi (2008), os átomos de Demócrito seriam feitos todos de uma mesma substância, diferindo apenas em tamanho, forma, movimento e arranjos geométricos. Eles não possuíam cor, cheiro ou sabor. Suas formas e movimentos explicariam as sensações humanas, as propriedades da matéria e os fenômenos naturais.

Por exemplo, átomos lisos e arredondados eram responsáveis pela sensação doce ao paladar, enquanto átomos pontiagudos e irregulares causavam o gosto azedo. Átomos arredondados também eram responsáveis por formar sons agradáveis aos ouvidos, enquanto os de forma irregular formavam sons estridentes (Peduzzi, 2008).

Apesar de ter sido aceita e adotada por outros filósofos gregos, por exemplo, Epicuro (341 – 270 AEC), a noção de átomo ficou “adormecida” durante muitos anos, sendo retomada apenas no século XVII. Esse fato pode ser associado tanto à impossibilidade de ser realizada qualquer experiência que comprovasse a teoria atomista, quanto à influência exercida pelas ideias aristotélicas, que eram contrárias à existência do vazio necessário para a cinemática atomista (Abdalla, 2006; Peduzzi, 2008).

No século XVII, os experimentos de Evangelista Torricelli (1608 – 1647), Blaise Pascal (1623 – 1662) e Otto von Guericke (1602-1686) sobre pressão do ar reforçaram as

convicções de Pierre Gassendi (1529-1655) de que os átomos e o vazio dos atomistas estariam no cerne de todas as explicações científicas (Peduzzi, 2008). As concepções atomísticas de Gassendi parecem ter influenciado o próprio Isaac Newton, como pode ser visto em um trecho de sua obra “Óptica”:

Parece-me provável que no princípio Deus formou a matéria segundo partículas sólidas, maciças, duras, impenetráveis, móveis, com tamanhos, formas e propriedades, e em proporção em relação ao espaço, condizentes aos fins para os quais Ele as criou; e que essas partículas primitivas, sendo sólidas, são incomparavelmente mais duras do que quaisquer corpos porosos que elas constituem; e tão sumamente duras que não se consomem ou se partem em pedaços, pois nenhum poder ordinário é capaz de dividir o que o próprio Deus fez uno no princípio da criação. (Newton, 2002, p. 290).

Contudo, foi apenas no século XVIII, mais precisamente em 1808, que a teoria atomista ganhou ímpeto. Tal fato se deu com a publicação da obra “Um novo sistema de filosofia química”, na qual o inglês John Dalton apresenta sua teoria atômica para a constituição da matéria. De acordo com Abdalla (2006), a ideia principal da teoria de Dalton, que ficou conhecida como teoria da bola de bilhar, era que os átomos, corpúsculos materiais indivisíveis e indestrutíveis, compunham toda a matéria, sendo que um mesmo elemento químico possuiria átomos idênticos, enquanto diferentes elementos químicos possuiriam átomos diferentes em massa e outras propriedades.

Peduzzi (2008) destaca que o átomo grego não é um precursor do átomo de Dalton, pois as duas teorias atômicas estruturam-se em bases conceituais e epistemológicas distintas. Enquanto o atomismo de Leucipo e Demócrito é intuitivo, especulativo e teórico, o atomismo de Dalton é científico, apoiando-se em medidas e experimentos concretos. Por exemplo, a lei das proporções definidas, generalizada por Louis Proust (1754 – 1826) e a lei das proporções múltiplas, enunciada pelo próprio Dalton, deduzem-se como consequências naturais a partir da teoria atômica de Dalton.

A teoria de Dalton também difere das concepções atomísticas existentes no século por ser mais robusta, enquanto as ideias de Gassendi, por exemplo, expressavam de modo vago e pouco preciso a descontinuidade da matéria (Peduzzi, 2008).

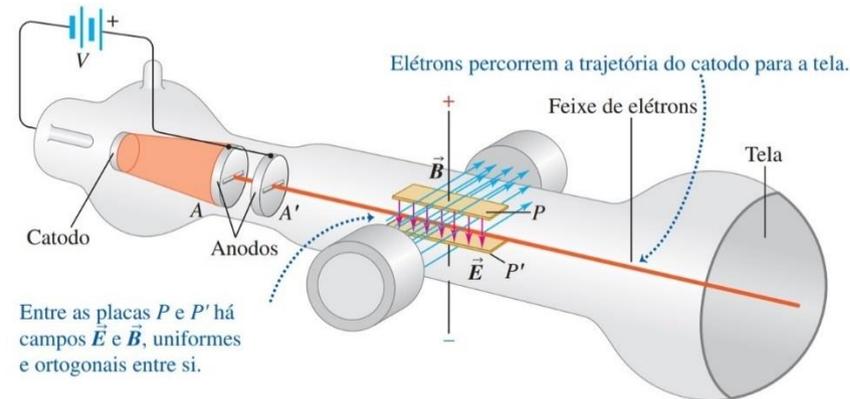
Apesar de ter vigorado durante quase cem anos, o modelo atômico de Dalton não contemplava a natureza elétrica da matéria. Os fenômenos elétricos já eram conhecidos desde a Antiguidade. Contudo, foi em meados do século XIX que Heinrich Geissler, Johann Hittorf e Willian Crookes, ao desenvolverem experimentos em tubos de raios catódicos com gases em

baixa pressão e submetidos a altas tensões elétricas, observaram que aparecia uma luminosidade dentro do tubo. Estudando as propriedades desses raios, os cientistas concluíram que eles eram formados por partículas, e não ondas, que se propagavam em linha reta (Gomes, 2017).

O cientista inglês John Thomson (1856 – 1940) deu continuidade aos estudos com tubos de raios catódicos, tendo inicialmente descoberto que as partículas constituintes desses raios eram dotadas de carga elétrica negativa. No final do século XIX, Thomson flagrou a divisibilidade o átomo, descobrindo o elétron, a primeira partícula subatômica observada (Abdalla, 2006).

A aparelhagem usada por Thomson para realizar seus experimentos é mostrada na Figura 1. Ela consiste em um recipiente de vidro sob alto vácuo, dentro do qual elétrons provenientes de um catodo quente são acelerados e agrupados em um feixe devido a uma diferença de potencial V entre dois anodos, A e A' . Cada elétron do feixe possui carga elétrica e , massa m_e e entra com velocidade v na região entre as placas P e P' do dispositivo. Entre essas placas, há um campo magnético \vec{B} e um campo elétrico \vec{E} , ambos perpendiculares à velocidade dos elétrons e ortogonais entre si. Após emergir da região entre P e P' , os elétrons colidem com a tela no final do tubo, que é recoberto com um material que cintila no ponto onde ocorre a colisão (Young; Freedman, 2015).

Figura 1 – Dispositivo de Thomson para determinar a razão e/m_e de um elétron.



Fonte: Young; Freedman (2015).

Os valores de $|\vec{B}|$ e $|\vec{E}|$ podem ser ajustados de modo que a força elétrica sobre o elétron possua módulo igual ao da força magnética, de forma que os elétrons não sofram desvio em suas trajetórias. Nesse caso, tem-se:

$$\vec{F}_{mag} = \vec{F}_{el}$$

$$evB = eE$$

$$v = \frac{E}{B} \quad (1)$$

Uma vez que os valores de $|\vec{B}|$ e $|\vec{E}|$ são conhecidos, obtém-se o valor da velocidade v . Por outro lado, a velocidade dos elétrons é determinada pelo potencial V que os acelera. Desse modo, a energia cinética ganha é igual à diferença de energia potencial para os elétrons, ou seja:

$$\frac{1}{2}m_e v^2 = eV$$

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m_e}} \quad (2)$$

Comparando-se as equações (1) e (2), obtém-se a relação entre a carga e a massa do elétron em termos de valores conhecidos:

$$\frac{E}{B} = \sqrt{\frac{2eV}{m_e}}$$

$$\frac{e}{m_e} = \frac{E^2}{2VB^2} \quad (3)$$

Desse modo, Thomson conseguiu calcular a velocidade e a razão entre a carga elétrica e e a massa m_e das partículas que constituíam os raios catódicos. Além disso, descobriu que e/m_e não dependia do tipo de metal utilizado nas placas nem do gás residual no interior do tubo e era o mesmo encontrado a partir do efeito fotoelétrico. Assim, Thomson conclui que essas partículas, que ele chamou de elétrons, deveriam fazer parte de todo tipo de matéria (Abdalla, 2006).

De acordo com Eisberg e Resnick (1979), por volta de 1910, o panorama que se tinha em relação à estrutura da matéria era o seguinte:

- a) muitas evidências experimentais de que os átomos de fato continham elétrons. Entre essas evidências, pode-se citar o espalhamento de raios X por átomos e o efeito fotoelétrico;
- b) conhecimento de que os átomos são eletricamente neutros. Portanto deveriam conter uma carga positiva igual, em módulo, à carga negativa de seus elétrons;
- c) a massa do elétron, obtida com precisão pelo físico norte-americano Robert Millikan em 1909 a partir da medição da carga do elétron combinada com a relação e/m_e de Thomson, era muito pequena se comparada com a de qualquer átomo, o que indicava que a maior parte da massa do átomo deveria estar associada à carga positiva.

Portanto, era necessário um novo modelo atômico, que explicasse como seria a distribuição de cargas positivas e negativas dentro do átomo. Um modelo assim foi proposto pelo descobridor do elétron, J. J. Thomson. Nele, os elétrons carregados negativamente estariam dentro de uma distribuição esférica e contínua de cargas positivas, de forma “análoga” a ameixas dentro de um pudim. Por essa semelhança, o modelo de Thomson ficou conhecido como modelo do pudim de ameixas¹ (Eisberg; Resnick, 1979) (Abdalla, 2006).

Em 1911, Ernest Rutherford, físico neozelandês e ex-aluno de Thomson, demonstrou que o modelo do pudim de ameixas não era adequado. Para tal, valeu-se de resultados obtidos a partir do estudo da radioatividade (Eisberg; Resnick, 1979).

A radioatividade foi descoberta em 1896, pelo físico francês Henri Becquerel. Com o objetivo de investigar se havia relação entre a emissão de raios X e a fluorescência de uma substância, Becquerel realizou experimentos usando o sal sulfato duplo de potássio e urânio, $K_2(UO_2)(SO_4)_2$. Nessas experiências, descobriu que esse sal emitia raios capazes de penetrar um papel opaco à luz, tivesse ou não sido exposto previamente à luz do Sol (Segrè, 1987).

Após sua descoberta, Becquerel continuou dedicando-se ao estudo da radioatividade, contudo, restringiu-se à utilização do urânio, pois estava mais interessado em entender a natureza do fenômeno do que sua generalidade.

Cerca de dois anos após a descoberta de Becquerel, entra em cena o casal de físicos Marie e Pierre Curie. Tendo escolhido a radioatividade como tema para sua tese de doutorado, Marie Salomea Skłodowska (posteriormente Marie Curie, ao casar com Pierre Curie) não apenas confirmou os resultados obtidos por Becquerel para o urânio, como decidiu investigar todos os elementos conhecidos, a fim de descobrir se também apresentavam o “novo fenômeno”. Nessa empreitada, descobriu que o tório também emitia radiação espontânea, e propôs a palavra radioatividade para esse fenômeno (Segrè, 1987).

Segundo Segrè (1987), Marie Curie não se conteve ao estudo dos compostos de urânio e tório: decidiu investigar também os minérios naturais. Assim, descobriu que a calcolita, um minério natural de urânio, emitia uma radiação muito maior do que a que poderia ser atribuída à quantidade de urânio que possuía. Porém, o mesmo minério, quando reproduzido em laboratório, não apresentava essa radioatividade fora do normal. A partir disso, Madame Curie concluiu que deveria haver alguma impureza desconhecida muito mais radioativa que o urânio.

¹ Em inglês, o modelo de Thomson ficou conhecido como *plum pudim*. Em alguns livros, esse termo foi traduzido para “pudim de ameixas”, em outros, para “pudim de passas”. Ambas as traduções referem-se ao mesmo modelo.

Nesse ponto, Pierre, que estava engajado com pesquisas em magnetismo, passou a trabalhar junto à esposa no campo da radioatividade. A partir do estudo dos minérios naturais, utilizando um método de análise desenvolvido pela própria Marie, o casal descobriu dois elementos radioativos e completamente desconhecidos até então. Para esses elementos, deram os nomes polônio e rádio (Segrè, 1987).

Enquanto os Curie dedicavam-se ao estudo da radioatividade na França, Ernest Rutherford dedicava-se ao estudo da radioatividade na Inglaterra. Em 1898, após longo trabalho no laboratório Cavendish, Rutherford descobriu que o urânio emitia dois tipos de radiação, os quais chamou de alfa (α) e beta (β) (Segrè, 1987). A diferença entre os dois tipos está em suas capacidades de absorção na matéria: as partículas α são mais facilmente absorvidas pela matéria e alcançam apenas as camadas mais superficiais, já as partículas β têm maior poder de penetração (Reis, 2021).

Apenas alguns meses depois da descoberta de Rutherford, Becquerel demonstrou que os raios β são elétrons. Posteriormente, em 1900, um terceiro tipo de radiação foi descoberta pelo físico francês Paul Villard, os raios gama (γ). Contudo, a origem da radioatividade continuava sendo um enigma, o que motivou Rutherford a analisar outras substâncias radioativas conhecidas: o rádio e o tório (Reis, 2021).

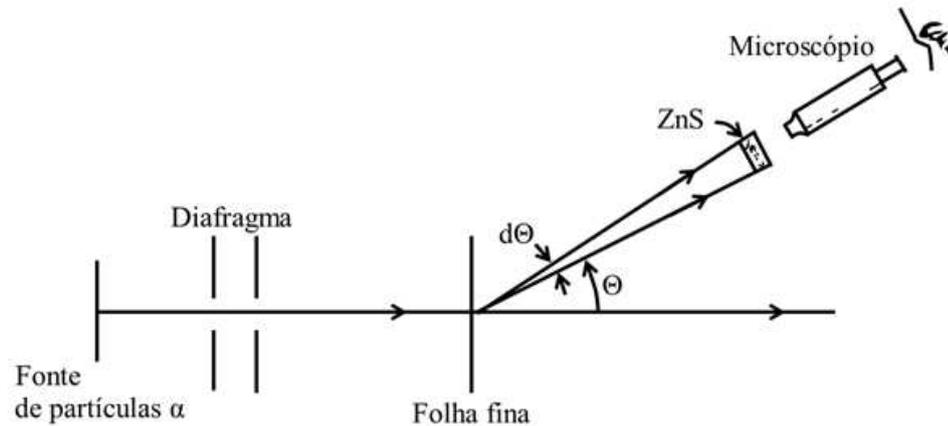
Em colaboração com o químico Frederick Soddy, Rutherford concluiu que a radioatividade tinha origem na desintegração de alguns tipos de átomos, que se transformavam em átomos de outros elementos. Nesse processo de desintegração, havia átomos que emitiam apenas partículas alfa, outros apenas partículas beta, e outros apenas raios gama, indicando que os átomos possuíam uma estrutura interna mais complexa do que se imaginava (Reis, 2021).

A essa altura, Rutherford já estava convencido de que as partículas alfa eram íons de hélio, e tinha a intuição de que essas partículas seriam a chave para a compreensão do que se passava no interior do átomo. Portanto, com o objetivo de conhecer com mais precisão as propriedades das partículas alfa, elaborou, junto aos físicos Hans Geiger e Ernest Marsden, um experimento que viria a ser o protótipo de quase todos os experimentos modernos em Física de Partículas (Reis, 2021). A Figura 2(a) traz um esquema representativo desse experimento, enquanto a Figura 2(b) apresenta o equipamento de fato utilizado.

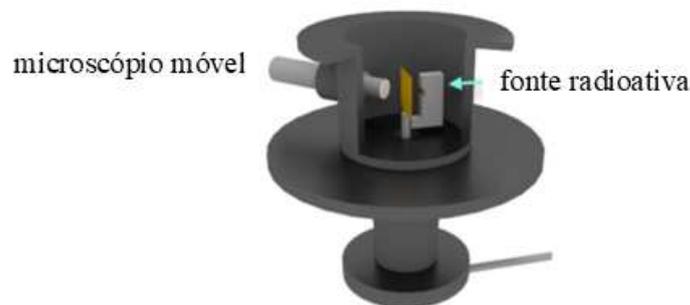
No experimento, uma fonte radioativa emite partículas alfa, que são posteriormente colimadas para formar um feixe paralelo estreito. Em seguida, esse feixe incide sobre uma folha de ouro. Essa folha deveria ser tão fina que as partículas alfa a atravessariam completamente sem sofrer grandes mudanças em sua velocidade.

Figura 2 – (a) As partículas α emergem de uma fonte radioativa e atravessam a folha de ouro, sendo espalhadas na região angular de Θ a $\Theta + d\Theta$; (b) no equipamento de fato utilizado, há uma placa fluorescente em uma extremidade e um microscópio móvel na outra, permitindo a observação do sinal luminoso sutil provocado pelo impacto de uma partícula α .

(a)



(b)



Fonte: (a) Eisberg; Resnick (1979); (b) Reis (2021).

Ao atravessar o material, cada partícula alfa sofre muitas deflexões, devido às interações coulombianas entre sua carga e as cargas positivas e negativas dos átomos da folha. Como consequência dessas interações, o feixe emerge da folha como um feixe divergente, e uma medida quantitativa dessa divergência pode ser feita ao medir-se o número de partículas alfa espalhadas em cada região angular de Θ a $\Theta + d\Theta$ (Eisberg; Resnick, 1979).

O aparato contava também com um detector de partículas: uma camada do composto sulfeto de zinco (ZnS) associado a um microscópio móvel. Quando atingido por uma partícula alfa, o ZnS produz uma pequena cintilação. Assim, um observador poderia contar o número de cintilações que uma única partícula alfa produziu por unidade de tempo em função da posição angular do detector (Eisberg; Resnick, 1979).

Segundo o átomo de Thomson, as partículas alfa não deveriam sofrer grandes deflexões, pois:

- a) os elétrons têm massa muito pequena quando comparados às partículas alfa;
- b) a carga positiva está distribuída sobre todo o volume do átomo de $r \cong 10^{-10}$ m, não podendo causar repulsão coulombiana intensa o bastante para grandes desvios (Eisberg; Resnick, 1979).

Contudo, o que foi observado por Geiger e Marsden a partir da contagem de cintilações foi que algumas partículas alfa eram espalhadas por ângulos muito grandes, até de 180° . Conforme apresenta Segrè (1987), para explicar os resultados observados no experimento, Rutherford imaginou a hipótese de que toda a carga positiva e a massa do átomo estariam concentradas em um pequeno volume central, o qual chamou de núcleo, que estaria cercado por elétrons que giravam ao seu redor. Sendo Z o número de elétrons orbitando o núcleo e e a carga do elétron, a carga positiva do núcleo deveria ser igual, em módulo, ao produto $Z \cdot e$, pois o átomo é neutro. Por ser construído à semelhança do sistema solar, o modelo atômico proposto por Rutherford ficou conhecido como “modelo atômico planetário”.

Apesar de validado por detalhada verificação experimental, o modelo de Rutherford apresentava sérios problemas quanto à estabilidade do átomo. Conforme apresentam Eisberg e Resnick (1979), se os elétrons circulassem em torno do núcleo em órbitas semelhantes às dos planetas em torno do Sol, perderiam energia devido à radiação emitida por cargas aceleradas a redor do núcleo, um resultado já conhecido da teoria eletromagnética clássica. Assim, acabariam caindo em espiral até atingir o núcleo. Além disso, essa radiação emitida teria um espectro contínuo, não estando de acordo com o espectro experimental discreto emitido por átomos, os chamados espectros atômicos.

Porém, as dificuldades encontradas no modelo de Rutherford não abalaram o físico dinamarquês Niels Bohr. Tendo sido aluno de Rutherford, Bohr levou o modelo planetário muito a sério, e pensou bastante sobre os problemas e ideias acerca dele, buscando encontrar algo que explicasse sua estabilidade. Isso acabou levando Bohr a apresentar um novo modelo atômico, em 1913.

Para elaborar seu modelo, Bohr demonstrou que a posição estável dos átomos não poderia ser completamente obtida a partir da mecânica clássica. Portanto, ele incorporou em seu modelo as ideias revolucionárias de quantização da energia, introduzidas por Max Planck para explicar o espectro de radiação do corpo negro e utilizadas por Albert Einstein para explicar o efeito fotoelétrico.

O modelo atômico de Bohr apresentava concordância quantitativa precisa com alguns dados espectroscópicos, por exemplo, para o espectro do hidrogênio, envolvia uma matemática de fácil compreensão e estava baseado em postulados. De acordo com Eisberg e Resnick (1979, p. 138), são eles:

1. Um elétron em um átomo se move em uma órbita circular em torno do núcleo sob influência da atração coulombiana entre o elétron e o núcleo, obedecendo às leis da mecânica clássica.
2. Em vez da infinidade de órbitas que seriam possíveis segundo a mecânica clássica, um elétron só pode se mover em uma órbita na qual seu momento angular orbital L é um múltiplo inteiro de \hbar (a constante de Plack dividida por 2π).
3. Apesar de estar constantemente acelerado, um elétron que se move em uma dessas órbitas possíveis não emite radiação eletromagnética. Portanto sua energia total E permanece constante.
4. É emitida radiação eletromagnética se um elétron, que se move inicialmente sobre uma órbita de energia total E_i , muda seu movimento descontinuamente de forma a se mover em uma órbita de energia total E_f . A frequência da radiação emitida ν é igual à quantidade $(E_i - E_f)$ dividida pela constante de Planck h .

A partir dos postulados de Bohr, seria possível encontrar uma expressão para o raio de um átomo constituído por um núcleo de carga $+Ze$ e massa M , com um único elétron de carga elétrica negativa com módulo igual a e e massa m_e (Eisberg; Resnick, 1979).

Do postulado 1, para que o átomo tenha estabilidade mecânica, tem-se:

$$F_{\text{coulombiana}} = F_{\text{centrípetas}}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} = m_e \frac{v^2}{r} \quad (4)$$

Na equação (4), v é a velocidade do elétron em sua órbita e r é o raio da órbita.

Do postulado 2, tem-se que:

$$L = n\hbar$$

$$m_e v r = n\hbar$$

$$v = \frac{n\hbar}{m_e r} \quad , \text{ com } n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Substituindo v na equação (4), obtém-se:

$$Ze^2 = 4\pi\epsilon_0 m_e \left(\frac{n\hbar}{m_e r} \right)^2 r$$

$$r = 4\pi\epsilon_0 \frac{n^2\hbar^2}{m_e Z e^2} \quad , \text{ com } n = 1,2,3,\dots \quad (6)$$

A equação (6) traz o raio das órbitas permitidas. Substituindo-se “r” na equação (5), obtém-se os valores possíveis de velocidade para o elétron em cada órbita permitida:

$$v = \frac{n\hbar}{m_e \left(4\pi\epsilon_0 \frac{n^2\hbar^2}{m_e Z e^2} \right)}$$

$$v = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z e^2}{n\hbar} \quad , \text{ com } n = 1,2,3,\dots \quad (7)$$

Também é possível calcular a energia total de um elétron atômico se movendo em uma das órbitas possíveis. A energia potencial V a uma distância r finita pode ser obtida integrando-se o trabalho que seria realizado pela força coulombiana que atua de r a ∞ , definindo-se a energia potencial como sendo zero quando o elétron está infinitamente longe do núcleo. Assim, a energia total do elétron seria:

$$E = \frac{1}{2} m_e v^2 + \int_r^\infty -\frac{Z e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr$$

$$E = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{Z e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (8)$$

Usando os resultados das equações (6) e (7) na equação (8), obtém-se:

$$E = \frac{1}{2} m_e \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z e^2}{n\hbar} \right)^2 - \frac{Z e^2}{4\pi\epsilon_0 \left(4\pi\epsilon_0 \frac{n^2\hbar^2}{m_e Z e^2} \right)}$$

$$E = -\frac{m_e Z^2 e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2} \frac{1}{n^2} \quad , \text{ com } n = 1,2,3,\dots \quad (9)$$

A equação (9) mostra que a quantização do momento angular orbital do elétron implica na quantização de sua energia total.

Por fim, do postulado 4 combinado com a equação (9), é possível calcular a frequência ν da radiação eletromagnética emitida quando o elétron sofre uma transição do estado quântico n_i para o estado quântico n_f :

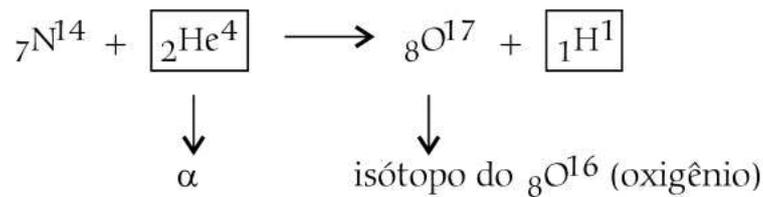
$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h}$$

$$\nu = + \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{m_e Z^2 e^4}{4\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad , \text{ com } n = 1,2,3,\dots \quad (10)$$

O modelo de Bohr foi bem-sucedido em muitos aspectos, por exemplo, no cálculo do comprimento de onda das linhas de todas as séries conhecidas do espectro do hidrogênio. Posteriormente, o físico Arnold Sommerfeld aperfeiçoou esse modelo, supondo que o elétron poderia se mover em órbitas elípticas. Fez isso na tentativa de explicar a estrutura fina do espectro do hidrogênio (Eisberg; Resnick, 1979).

Em 1919, Ernest Rutherford publicou seus resultados sobre a primeira desintegração artificial em um artigo que tratava das colisões da partícula α sobre átomos leves. Nesse trabalho, Rutherford mostrava que, quando as partículas α incidiam sobre o nitrogênio, produziam núcleos de hidrogênio, transmutando o nitrogênio em um isótopo do oxigênio, conforme mostrado na Figura 3. Descobriu, dessa forma, o próton, um constituinte fundamental do núcleo atômico.

Figura 3 – Equação de transmutação do nitrogênio em um isótopo do oxigênio.



Fonte: ABDALLA (2006).

Em muitos aspectos, a velha antiga teoria quântica, onde estava inserido o modelo de Bohr-Sommerfeld, foi bem-sucedida, porém, apresentava alguns aspectos indesejáveis. Destaca-se, aqui, o fato dela ser exitosa apenas para átomos contendo um elétron, falhando quando aplicada mesmo ao átomo de He, que contém apenas dois elétrons (Eisberg; Resnick, 1979).

Essa questão foi resolvida em 1925, quando o físico Erwin Schrödinger desenvolveu sua teoria da mecânica quântica. De acordo com Segrè (1987), o trabalho de Schrödinger foi publicado em janeiro de 1926 e trazia a famosa equação:

$$\nabla^2\Psi(x, y, z) + \frac{8\pi^2m}{h^2}[E - U(x, y, z)]\Psi(x, y, z) = 0 \quad (11)$$

Essa é uma equação típica de movimentos ondulatórios. Nela, ∇^2 é o operador laplaciano, E é a energia do sistema e $U(x,y,z)$ é o potencial que caracteriza o sistema. Schrödinger chamou a função $\Psi(x,y,z)$ de função de onda.

A equação de Schrödinger tem soluções tais que $\int|\Psi(x,y,z)|^2dx dy dz$ é finito apenas para valores específicos de E . Tais valores são chamados de autovalores, e seu conjunto

forma um espectro. Para o caso do hidrogênio, o espectro obtido pela equação de Schrödinger é idêntico aos níveis de energia de Bohr, porém, no caso de Schrödinger, a quantização ocorre de forma automática (Segrè, 1987).

A teoria de Schrödinger foi admirada pelos físicos da época, contudo, faltava a interpretação do que seria o Ψ . O significado dessa função começou a tornar-se claro apenas em 1926, quando Max Born o interpretou como sendo uma densidade de probabilidade, ou seja, $|\Psi(x, y, z)|^2 d\tau$ seria a probabilidade de encontra-se um elétron em um elemento de volume $d\tau$ (Segrè, 1987).

Até este momento, a física quântica pode ser vista com uma sequência de investigações, com resolução cada vez maior, acerca da natureza microscópica da matéria (Eisberg; Resnick, 1979). Foi descoberto que os átomos eram formados por núcleos e elétrons; em seguida, Rutherford descobriu que o núcleo abrigava uma partícula subatômica: o próton. Os anos trinta trouxeram a proposição de mais quatro partículas subatômicas: o neutrino do elétron, o pósitron, o nêutron e o múon.

O neutrino do elétron foi proposto pelo físico alemão Wolfgang Pauli em 1930. Pauli o propôs para explicar o mistério da aparente falha da conservação da energia nas medidas do momento dos elétrons ejetados em decaimentos radioativos, chamados decaimento β (Abdalla, 2006).

Na tentativa de entender tal resultado, alguns físicos da época chegaram a duvidar da conservação da energia. Pauli, porém, sugeriu que esse desbalanceamento energético acontecia porque, no processo de emissão, entrava em cena uma nova partícula leve, neutra e fracamente interagente com a matéria. Segundo Abdalla (2006), Pauli inicialmente chamou essa partícula de nêutron, porém precisou mudar o nome para neutrino (ν), pois o termo nêutron foi usado para nomear outra partícula subatômica, descoberta em 1932. Posteriormente, ela passou a ser representada por ν_e (neutrino do elétron), pois foram descobertos outros neutrinos.

Inicialmente, as tentativas para encontrar o neutrino falharam, e seu apelido passou a ser “o pequenino que não está lá”. Ele foi observado experimentalmente pela primeira vez apenas em 1956, no reator nuclear Savannah River, na Carolina do Sul, Estados Unidos. A confirmação definitiva da sua existência, e da existência do antineutrino, foi feita por Clyde Cowan e Frederick Reines, que ganharam o prêmio Nobel em 1995 (Abdalla, 2006).

Ainda no início dos anos trinta, outra partícula foi detectada: o pósitron. Sua proposição foi resultado dos esforços feitos pelo físico inglês Paul Dirac para “unir” a Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade Restrita, desenvolvida por Einstein em 1905.

Einstein já havia apresentado a equação que relaciona a energia (E), o momento (p) e massa de repouso (m_0) das partículas:

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 \quad (12)$$

com “c” sendo a velocidade da luz no vácuo. Segundo Abdalla (2006), Dirac percebeu, pouco antes de 1930, que, na equação (12), devia-se extrair a raiz quadrada incluindo os dois sinais possíveis para a energia, ou seja:

$$E_{\pm} = \pm \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} \quad (13)$$

Contudo, uma partícula livre não poderia ter energia negativa. Então como interpretar fisicamente os estados de energia negativa? Dirac respondeu essa pergunta com a teoria do Mar de elétrons ou Mar de Dirac.

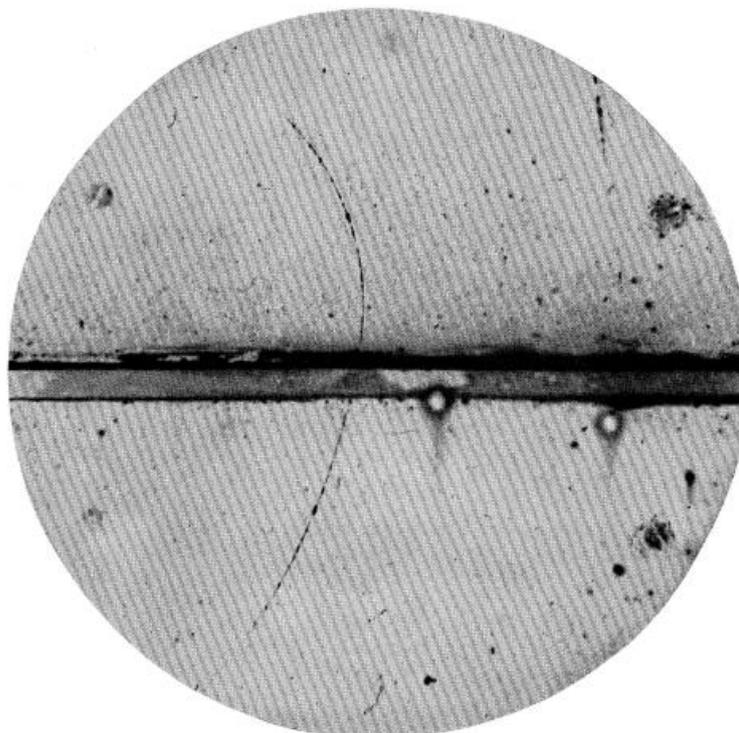
Conforme explica Caruso (2012), o mar de elétrons seria o estado com todos os níveis de energia negativa, começando no valor $-m_0 c^2$ e estendendo-se ao infinito negativo, ocupados pelos elétrons. Um elétron de energia positiva não poderia sofrer transição para estados de energias negativas, pois todos já estavam ocupados. Porém, um elétron de energia negativa poderia ser excitado e ir para um estado de energia positiva, deixando um “buraco” no mar. Cada buraco teria o comportamento de uma partícula com as mesmas características do elétron, porém, com carga elétrica positiva. Posteriormente, essa partícula recebeu o nome de pósitron.

A detecção do pósitron ficou a cargo do físico norte-americano Carl David Anderson, em 1932. Para tal, ele utilizou uma câmara de nuvens, ou câmara de Wilson, sob a ação de um campo magnético, para observar traços deixados por raios cósmicos (partículas subatômicas altamente energéticas originadas no espaço cósmico) (Abdalla, 2006).

Em uma câmara de nuvens, um vapor supersaturado forma gotas ao longo do caminho das partículas. Ao atravessar um meio material, as partículas carregadas perdem energia e ionizam os átomos presentes. Se adequadamente iluminados, os traços deixados pelas partículas tornam-se visíveis e podem ser fotografados (Abdalla, 2006).

Conforme relatado pelo próprio Anderson (1933), de um grupo de 1300 fotografias de traços deixados por raios cósmicos em uma câmara de Wilson, quinze deles tiveram o comportamento de uma partícula com carga positiva, mas com massa de mesma magnitude que a de um elétron livre. Uma das fotografias trazidas por Anderson em seu artigo “*The Positive Electron*” pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 – Traço de ionização deixado por pósitron originário de raios cósmicos ao atravessar uma placa de chumbo de 6 mm em uma câmara de nuvens.



Fonte: Anderson (1933).

Observa-se que o pósitron é uma das primeiras partículas elementares detectadas que não se encontra naturalmente no interior dos átomos.

A descoberta da próxima partícula subatômica, o nêutron, levou dois anos para ser concluída. Alguns físicos, entre eles, Rutherford, buscavam a existência de uma partícula neutra no núcleo, pois, se ele fosse constituído apenas por prótons, não seria estável devido à força repulsiva entre eles. Além disso, sabia-se que as substâncias radioativas emitiam tanto raios alfa quanto raios beta, ou seja, do núcleo atômico emergiam prótons e elétrons.

Pensando nisso, Rutherford concebeu a existência de uma partícula neutra, de massa igual à do próton e que consistia em um átomo de hidrogênio no qual o elétron teria se introduzido no núcleo (Segrè, 1987). Com o desenvolvimento da Mecânica Quântica, a ideia acabou não vingando, pois seria impossível confinar o elétron em um espaço tão pequeno como o núcleo de acordo com o Princípio da Incerteza.

Contudo, manteve-se na consciência dos alunos de Rutherford a ideia da existência de uma partícula neutra no interior do núcleo. Sendo uma partícula sem carga e que não produzia ionização direta quando atravessava a matéria, o desafio para os físicos experimentais era conseguir detectá-la.

Segundo Segrè (1987), em 1928, os físicos Walter Bothe e Herbert Becker deram o primeiro passo para a detecção do verdadeiro nêutron quando bombardearam berilo com partículas alfa de polônio. Como resultado, descobriram uma radiação neutra altamente penetrante, mas a interpretaram erroneamente como raios gama.

Quatro anos após, o casal Irène Curie (filha de Marie e Pierre Curie) e Frédéric Joliot dedicou-se ao estudo da radiação penetrante de Bothe utilizando uma fonte excepcionalmente forte de polônio, mas também interpretaram erroneamente os resultados que obtiveram.

Foi o físico James Chadwick, que havia sido aluno de Rutherford, que refez a experiência do casal Joliot-Curie para o Hidrogênio, o Hélio e o Nitrogênio, e conseguiu provar que a radiação emitida continha um componente neutro de massa aproximadamente igual à do próton: estava descoberto o nêutron (Segrè, 1987).

O próton de Rutherford e o nêutron de Chadwick trouxeram um consenso quanto aos constituintes do núcleo do átomo, mas a coesão desse sistema ainda era um mistério. A gravitação e o eletromagnetismo não eram suficientes para manter o núcleo coeso, pois a força de repulsão entre dois prótons no núcleo é cerca de 10^{37} vezes maior que a atração gravitacional entre eles. Assim, era necessário revisar o conceito das forças fundamentais da natureza (Peduzzi, 2010).

Buscando solucionar essa questão, em 1933, o físico japonês Hideki Yukawa propôs uma teoria para a força nuclear. Nessa teoria, a força em questão teria um raio de ação muito pequeno, cerca de 10^{-13} cm, e manteria os núcleons, próton e neutro, unidos. De forma semelhante ao campo magnético, que produz fótons, essa força deveria ser capaz de produzir uma partícula ainda desconhecida, de massa intermediária entre o próton e o elétron. Tal partícula “carregaria” a força forte (Abdalla, 2006).

Em 1937, foi descoberta, por Seth Neddermeyer e Carl Anderson, a primeira partícula elementar com massa compreendida entre a do elétron e a do próton. Logo pensou-se que essa seria a partícula prevista pela teoria de Yukawa, e ela foi batizada inicialmente de méson, depois de méson e por fim passou a ser chamada múon (Abdalla, 2006).

Porém, a ideia de que os múons seriam a partícula de Yukawa teve de ser abandonada quando observaram que eles se deslocavam facilmente através da atmosfera terrestre, penetravam placas de chumbo e eram encontrados até mesmo no fundo de lagos e em minas profundas. Como tais partículas podiam ser os agentes de interação entre os prótons e os nêutrons? (Abdalla, 2006).

Um fato interessante sobre os múons é que eles são partículas instáveis (ou seja, decaem em outras partículas) e têm um tempo de vida média, em seu referencial, igual a 2,2

microssegundos. É a teoria da relatividade que explica o fato de os múons produzidos na alta atmosfera, pelos raios cósmicos, serem capazes de viajar vários quilômetros para um observador terrestre (Peduzzi, 2010). A dilatação temporal para um observador na Terra obtida da teoria da relatividade restrita é dada pela equação (14):

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (14)$$

O múon viaja com velocidade v igual a 0,998 vezes a velocidade da luz (c). Assim, substituindo na equação (14) o tempo médio de vida do múon no seu próprio referencial, tem-se:

$$t = \frac{2,2 \times 10^{-6}}{\sqrt{1 - (0,998)^2}} = 3,480 \times 10^{-5} \text{s} \quad (15)$$

Nesse tempo, para um observador da Terra, antes de decaírem, os múons percorrem uma distância de aproximadamente 10,44 km (Peduzzi, 2010).

Os físicos levaram dez anos para perceber que o múon não era a partícula prevista por Yukawa (Abdalla, 2006). Tal partícula foi descoberta apenas em 1947, e contou com a importante participação do físico brasileiro César Lattes.

Durante sua graduação em física na Universidade de São Paulo, Lattes desenvolveu trabalhos teóricos com Gleb Wataghin, físico russo naturalizado italiano, e Mário Schenberg, físico brasileiro, além de ter sido aluno do físico experimental italiano Giuseppe Occhialini (Peduzzi, 2010).

Occhialini acabou voltando para a Europa em plena segunda guerra mundial, tendo instalado-se em Bristol, na Inglaterra. Lá, foi acolhido por Cecil Powell, ex-aluno de Rutherford que tinha especial interesse em métodos de detecção de partículas.

Antes da primeira Guerra Mundial, Kinoshita, um físico japonês, havia mostrado que partículas alfa, ao atravessarem uma emulsão fotográfica, deixavam em seu rastro uma coleção de “grãos” de partículas (Segrè, 1987). Conforme conta Peduzzi (2010), Occhialini ficou muito entusiasmado ao tomar conhecimento, em Bristol, da produção de emulsões fotográficas mais concentradas, feitas pela empresa Ilford.

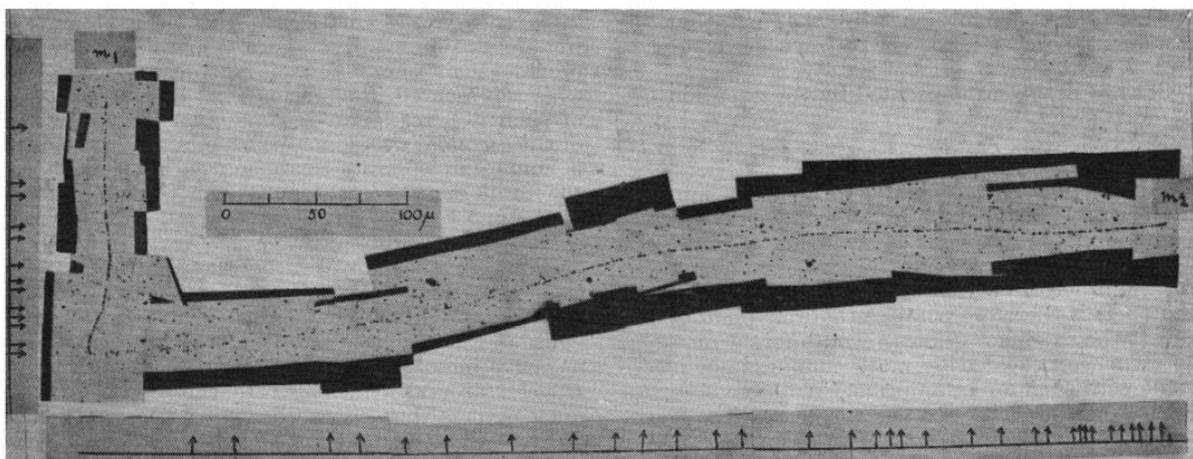
De Bristol, Occhialini envia a Lattes fotomicrografias de traços de prótons e de partículas alfa obtidas utilizando-se as novas emulsões. Interessando-se por tais descobertas, Lattes parte para Bristol e recebe a tarefa de calibrar as novas emulsões de acordo com o tamanho do número de “grãos” que possuíam (Peduzzi, 2010).

Quando Occhialini seguiu em uma viagem de férias para Pic du Midi, nos Pirineus, a 2800 metros de altitude, Lattes pediu-lhe que levasse algumas chapas tratadas com bórax e outras normais, todas embebidas com a nova emulsão resultado da sua tarefa. Quando as chapas com bórax foram reveladas (veja a Figura 5), observou-se evidências de desintegrações múltiplas, que pareciam ser causadas pela captura de partículas lentas, de pequena massa, por núcleos atômicos (Peduzzi, 2010).

Para obter novos dados para a pesquisa, Lattes viajou até Chacaltaya, nos Andes, 5500 metros de altitude, levando suas emulsões fotográficas tratadas com bórax. As chapas ficaram expostas por um mês e, quando reveladas, trouxeram a confirmação: estava detectado o pión (π), a verdadeira partícula prevista pela teoria de Yukawa (Abdalla, 2006).

À descoberta do pión na natureza, seguiu-se a observação do pión com duas possibilidades de carga, π^+ e π^- , no acelerador Cosmic, na Califórnia. O último pión a ser detectado, em 1950, foi o pión neutro, completando o tripleto formado pelos pions e coroando a teoria de Yukawa (Abdalla, 2006).

Figura 5 – Uma das primeiras fotos de um pión, que vem dos raios cósmicos e em seguida decai em um múon.



Fonte: Lattes; Muirhead; Occhialini; Powell (1947).

Segundo Abdalla (2006), o desenvolvimento da técnica na fabricação de emulsões sensíveis associado à utilização de aceleradores de partículas mais sofisticados levou à descoberta de uma grande quantidade de partículas. De fato, a partir da década de 1950, um número espantoso de partículas novas foi descoberto, trazendo a necessidade de organizá-las e classificá-las de acordo com um modelo.

Como resultado do esforço comum de físicos teóricos, fenomenológicos e experimentais, chegou-se ao Modelo Padrão, que será abordado com mais detalhes no próximo tópico.

4.2 O Modelo padrão das partículas elementares

Para entender as características desse Modelo, primeiramente é necessário compreender o que são partículas **elementares**. De acordo com Abdalla (2006), partículas elementares são aquelas que não podem ser “quebradas”, ou seja, todas as que possuem um único constituinte. Na linguagem da Mecânica Quântica, a função de onda que descreve uma partícula elementar não pode ser redutível à função de onda de outras partículas.

Do ponto de vista experimental e teórico, o conceito de elementar depende tanto dos limites intrínsecos à observação quanto da concepção dos modelos teóricos que descrevem a estrutura da matéria. Por exemplo, até o início da década de 1950, muitas das partículas descobertas foram erroneamente classificadas como elementares, pois não havia métodos de observação capazes de conferir se havia uma estrutura ainda mais interna (Abdalla, 2006). Entre os exemplos, pode-se citar o próton e o nêutron, que foram considerados elementares quando descobertos, mas que hoje se sabe serem formados por outras partículas elementares: os quarks.

Aponta-se para a importância de não confundir o conceito de **elementar** com o de **estável**. De acordo com Abdalla (2006), a partícula será estável quando não houver possibilidade dela decair em partículas com massas menores. Assim, uma partícula pode ser elementar e instável; é o caso do múon, que tem seu decaimento dado por:



onde $\bar{\nu}_e$ é o antineutrino do elétron (a antipartícula do neutrino do elétron) e ν_μ é o neutrino do múon.

A formulação do Modelo Padrão teve início na década de 1970, tendo sido ele provisoriamente estabelecido no começo de 1980. Desde então, a teoria tem sido testada e verificada por meio de experimentos rigorosos, e suas previsões têm sido confirmadas (Kane, 2003). Nas palavras de Kane (2003, p. 70):

(...) o Modelo Padrão é um modelo abrangente que identifica as partículas básicas e especifica como elas interagem. Tudo o que acontece em nosso mundo (exceto os efeitos da gravidade) resulta de partículas do Modelo Padrão interagindo de acordo com suas regras e equações ²(tradução nossa).

² [...] the Standard Model is a comprehensive theory that identifies the basic particles and specifies how they interact. Everything that happens in our world (except for the effects of gravity) results from Standard Model particles interacting according to its rules and equations.

Assim, há dois tipos principais de partículas no Modelo: as partículas de matéria e as partículas mediadoras de força. As partículas de matéria dividem-se em léptons e quarks, enquanto as partículas de força são os bósons de gauge.

Segundo Abdalla (2006), os léptons são partículas elementares que não estão sujeitas à força forte (a interação responsável por manter prótons e nêutrons juntos no interior do núcleo). Existem três famílias, também chamadas gerações, de léptons, representadas no Quadro 1.

Quadro 1 – As famílias dos léptons.

Geração ou família	Lépton	Símbolo
Primeira	Elétron	e^-
	Neutrino do elétron	ν_e
Segunda	Múon	μ
	Neutrino do múon	ν_μ
Terceira	Tau	τ
	Neutrino do tau	ν_τ

Fonte: elaborado pela autora.

Cada uma dessas partículas possui uma antipartícula, totalizando doze léptons.

Os quarks, o segundo tipo de partículas de matéria, também aparecem em três gerações, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – As famílias dos quarks.

Geração ou família	Quark	Símbolo
Primeira	Up	u
	Down	d
Segunda	Charm	c
	Strange	s
Terceira	Top	t
	Bottom	b

Fonte: elaborado pela autora.

Os quarks apresentados no Quadro 2 possuem uma propriedade chamada carga de cor³, que pode se manifestar de três formas: carga de cor vermelha (r), carga de cor verde (g) e carga de cor azul (b). É preciso combinar três valores diferentes de carga de cor para obter o valor neutro, tal que $r + g + b = 0$. Além disso, cada quark possui uma antipartícula, que possuirá anti-carga de cor (anti-vermelho, anti-verde ou anti-azul). Portanto, tem-se 36 quarks no total.

Quarks e antiquarks unem-se para formar as partículas compostas chamadas *hádrons*. O próton e o nêutron, dois principais componentes do núcleo, são hádrons. Essa interação é estudada pela Cromodinâmica Quântica, mais conhecida por sua sigla em inglês - QCD. Hádrons formados por três quarks ou três antiquarks são chamados bárions. Como exemplo, tem-se o próton, que é formado por dois quarks up e um quark down. Hádrons constituídos por um quark e um antiquark são chamados mésons, como méson π^+ , formado por um antiquark down e um quark up (Moreira, 2009).

Identificadas as partículas básicas, para completar a compreensão acerca do Modelo Padrão, falta a identificação de como elas interagem.

Na natureza, existem quatro interações fundamentais: gravitacional, eletromagnética, nuclear fraca e nuclear forte. Consequentemente, há também quatro forças fundamentais: gravitacional, eletromagnética, forte e fraca. As responsáveis por transmitir a mensagem das forças entre as partículas interagentes são as chamadas partículas mediadoras de força, ou bósons vetoriais. Pode-se fazer uma analogia com um jogo de futmesa⁴: os quarks e os léptons são os jogadores, enquanto a bola desempenha o papel das intermediadoras; é por meio da bola que os jogadores se comunicam. O Quadro 3 traz os tipos de partículas mediadoras e quais interações elas “carregam”.

Quadro 3 – As partículas mediadoras das interações fundamentais.

Tipo de interação	Nome	Símbolo
forte	Glúons	g
eletromagnética	Fóton	γ
fraca	Bósons W	W ⁺ W ⁻
	Bóson Z	Z ⁰

Fonte: elaborado pela autora.

³ A cor de um quark é uma propriedade, e não uma cor propriamente dita (Moreira, 2009).

⁴ O futmesa é uma mistura de futebol, futevôlei e tênis de mesa. Utiliza-se uma bola, uma mesa curvada e uma rede para sua prática, sendo possível jogar um contra um ou em duplas. Em ambos os casos, a bola deve ser lançada por cima da rede em direção ao lado oposto da mesa, podendo ser utilizada qualquer parte do corpo para o serviço, exceto mãos e braços.

A força gravitacional é a força de atração entre duas porções de matéria (Abdalla, 2006). Ela age em longas distâncias e, em geral, não é considerada quando se trata de interações fundamentais entre partículas, pois, na escala de comprimento dessas interações, a força gravitacional torna-se desprezível frente às outras forças. A partícula mediadora dessa força seria o gráviton, porém ainda não foi formulada uma teoria consistente que contemple essa partícula e, portanto, ela não está presente no Modelo Padrão.

A força eletromagnética é a responsável pela interação entre partículas carregadas eletricamente, enquanto a força fraca explica os processos nucleares de decaimento radioativo. Por fim, tem-se a força forte, responsável por manter a coesão nuclear, cuja partícula mediadora é o glúon.

As forças eletromagnética e fraca foram unificadas em uma única força, a eletrofraca, pelos físicos Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam e Steven Weinberg (fato que lhes rendeu o prêmio Nobel de Física em 1979). Isso, porém, trazia um problema para o Modelo Padrão. Como as forças eletromagnética e fraca poderiam ser manifestações de uma mesma força se suas partículas mediadoras são tão diferentes?

O fóton, mediador da força eletromagnética, não possui massa. Já os bósons W e Z, mediadores da força fraca, são massivos. Portanto, aparentemente a existência da força eletrofraca quebraria uma simetria do Modelo Padrão. Os físicos François Englert e Peter Higgs propuseram, então, um mecanismo que explicava o porquê de os bósons Z e W (e todas as partículas massivas) adquirirem massa, enquanto o fóton não (CERN, ©2023).

O mecanismo propõe que o Universo nasceu simétrico, ou seja, à época do *Big Bang*, todas as partículas eram desprovidas de massa. Contudo, em fração de segundos após o *Big Bang*, um novo campo entra em ação: o campo de Higgs, que está associado a uma partícula denominada bóson de Higgs, também chamada bóson escalar. Apenas as partículas que interagem com esse campo são capazes de adquirir massa (CERN, 2023).

Após anos de busca, a detecção de um bóson de Higgs foi anunciada em 4 de julho de 2012 pelo CERN⁵. A detecção ocorreu em dois experimentos do CERN: *A Toroidal LHC ApparatuS* (ATLAS) e *Compact Muon Solenoid* (CMS) (Rosenfeld, 2022). O Prêmio Nobel de Física em 2013 foi concedido aos físicos François Englert e Peter Higgs pela descoberta teórica do mecanismo que contribui para o conhecimento sobre a origem da massa das partículas subatômicas (Rose, 2023).

⁵ CERN é a sigla de Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, atualmente denominado the European Organization for Nuclear Research, em português, Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear, mas mantendo a sigla para designar seu nome.

Portanto, as partículas do Modelo Padrão podem ser sumarizadas em um esquema como o apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Quadro resumo das partículas do Modelo Padrão.

		três gerações da matéria (fêrmions)			partículas mediadoras (bósons)	
		I	II	III		
Massa		$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
Carga		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
		u up	c charm	t top	g glúon	H higgs
	QUARKS	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		d down	s strange	b bottom	γ fóton	
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		e elétron	μ múon	τ tau	Z bóson Z	
	LÉPTONS	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
		0	0	0	± 1	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau	W bóson W	
						BÓSONS ESCALARES
						BÓSONS VETORIAIS

Fonte: elaborada pela autora.

É importante destacar que, no caso de partículas subatômicas, a unidade mais adequada para expressar a massa, m , é a energia, E , dividida por c^2 , onde c é a velocidade da luz. Essa unidade vem diretamente da relação entre massa e energia, estabelecida pelo físico alemão Albert Einstein e apresentada na equação (17).

$$E = mc^2 \quad (17)$$

4.3 Como as partículas subatômicas são descobertas?

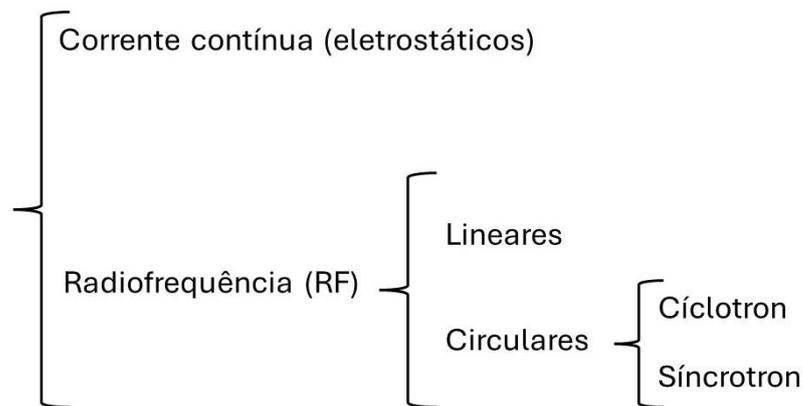
Os tópicos anteriores apresentaram um histórico sobre o descobrimento de partículas elementares, bem como mais detalhes acerca do Modelo Padrão. Agora, é interessante que seja discutido de que formas essas partículas são detectadas e obtidas para estudo.

4.3.1 Aceleradores de partículas

Os experimentos realizados por Rutherford, em 1917, mostraram que a aceleração de partículas por meio de aparelhagem laboratorial era uma ótima forma de conseguir progresso na área da desintegração nuclear. Assim, surgiram os primeiros aceleradores de partículas, dispositivos que empregam campos elétricos para acelerar partículas estáveis, por exemplo, prótons, elétrons e íons pesados, a altas energias.

Os principais aceleradores de partículas podem ser classificados de acordo com o esquema apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Os principais tipos de aceleradores.



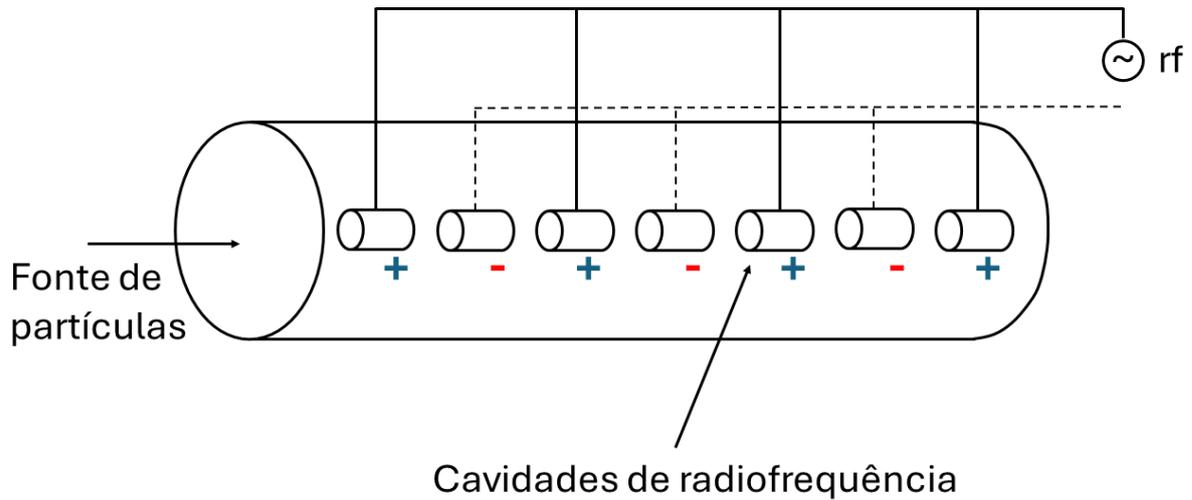
Fonte: elaborada pela autora.

Soria (2015) traz informações sobre cada tipo de acelerador.

Os aceleradores de corrente contínua foram os primeiros a serem desenvolvidos, e podem ser divididos em dois tipos principais: Cockroft-Walton e Van de Graaff. O primeiro tipo é baseado em um circuito multiplicador de voltagem, enquanto o segundo é genuinamente eletrostático, pois transporta mecanicamente, por meio de uma correia, a cargas elétricas desde o gerador até o terminal de alta voltagem. Utilizando um gerador do primeiro tipo, os físicos D. Cocroft e T. Walton obtiveram, em 1932, a desintegração do lítio em duas partículas alfa: $p + {}^7_3\text{Li} \rightarrow \alpha + \alpha$ (Segrè, 1987).

Os aceleradores lineares, também chamados LINACS, são constituídos por um tubo de vácuo em linha reta, dentro do qual as partículas se movimentam. Em seu interior, são instalados tubos cilíndricos nos quais se conecta, alternativamente, a voltagem de radiofrequência (rf). Um esquema da estrutura de um LINAC pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Esquema da estrutura de um acelerador linear.

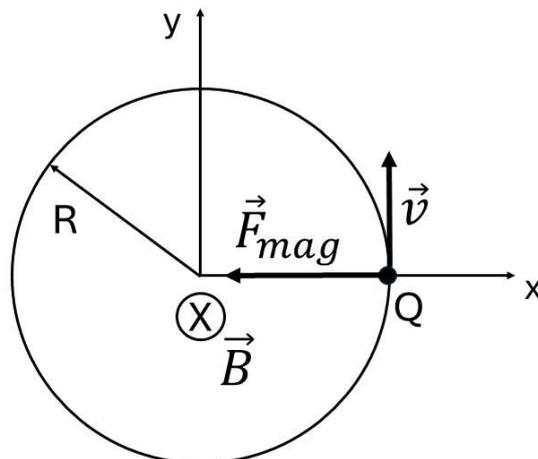


Fonte: adaptada de Soria (2015).

O ciclotron foi idealizado por Ernest Lawrence, em 1932, e seu funcionamento baseia-se no movimento tipicamente circular de uma partícula carregada em um campo magnético.

Considerando a situação apresentada na Figura 9, na qual um campo magnético uniforme \vec{B} aponta para dentro da página, se uma carga Q , de massa m , entra na região do campo com velocidade v perpendicular a \vec{B} , a força magnética, \vec{F}_{mag} , exercerá o papel da força resultante centrípeta, \vec{F}_{rc} , fazendo que a carga tenha uma trajetória de raio R (Griffiths, 1999).

Figura 9 – Partícula de carga Q e massa m entrando com velocidade v em uma região de campo magnético uniforme \vec{B} . A força magnética \vec{F}_{mag} faz a carga descrever uma trajetória de raio R .



Fonte: elaborada pela autora.

Portanto:

$$\begin{aligned}\vec{F}_{mag} &= \vec{F}_{rc} \\ QvB &= \frac{mv^2}{R} \\ v &= \frac{QRB}{m}\end{aligned}\quad (18)$$

A partícula carregada no interior do campo magnético uniforme executa um movimento circular, de raio R , com velocidade angular w dada pela equação (19):

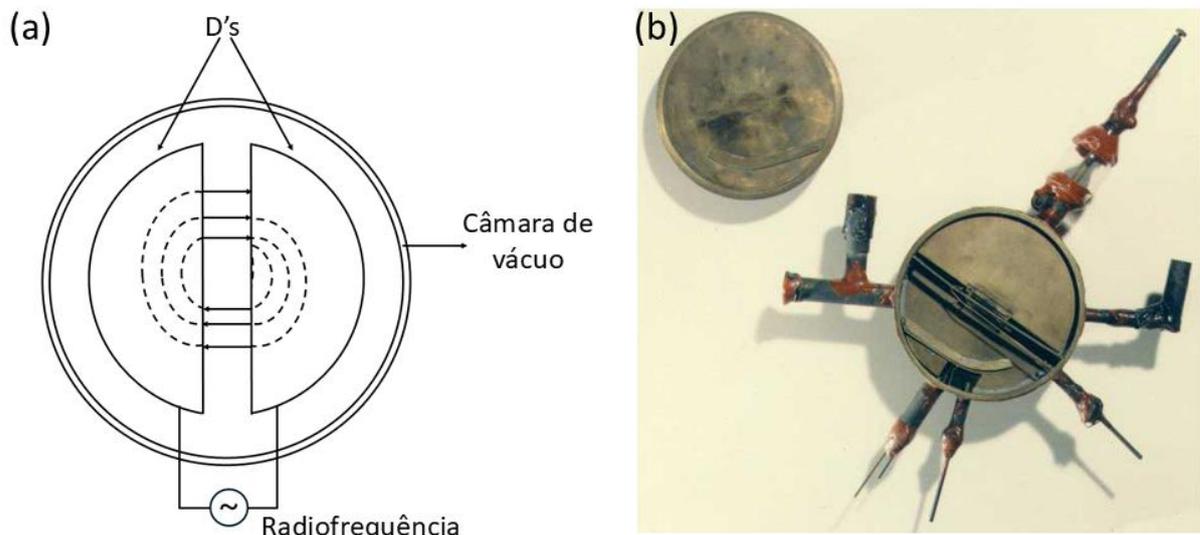
$$\begin{aligned}w &= \frac{v}{R} \\ w &= \frac{QB}{m}\end{aligned}\quad (19)$$

e frequência f dada pela equação (20):

$$\begin{aligned}f &= \frac{w}{2\pi} \\ f &= \frac{qB}{2\pi m}\end{aligned}\quad (20)$$

De acordo com Soria (2015) e Segrè (1987), o cíclotron proposto por Lawrence é composto por duas caixas em forma de D, entre as quais se acrescenta um campo elétrico alternado perpendicular a \vec{B} em um diâmetro das trajetórias e variando com a mesma frequência f do movimento da carga. Todo o sistema fica dentro de uma câmara de vácuo. Veja um esquema e um dos primeiros exemplares de cíclotron na Figura 10.

Figura 10 – (a) Esquema do cíclotron proposto por Lawrence, com as duas caixas em forma de D, a câmara de vácuo e o oscilador de radiofrequência. (b) Cíclotron de 4.5 polegadas construído por Lawrence e Livingston.



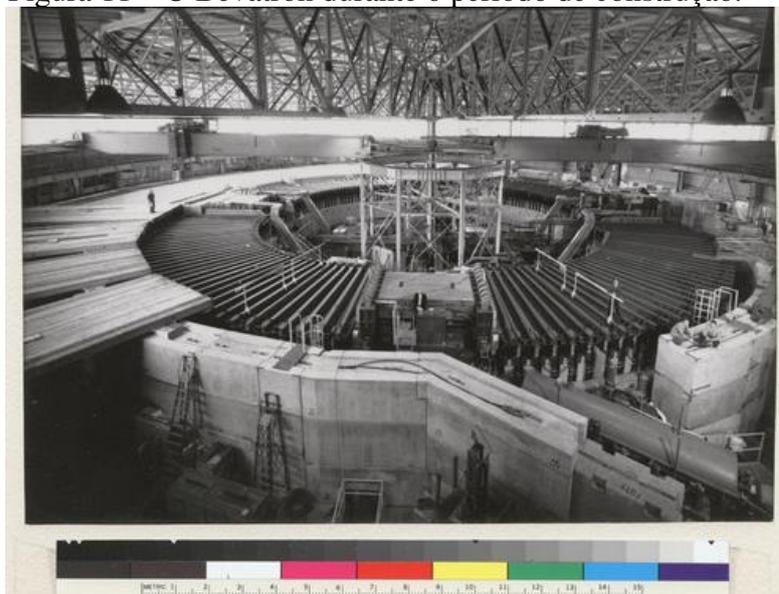
Fonte: (a) elaborada pela autora; (b) American Institute of Physics ([s.d.]).

A trajetória da partícula carregada está representada pela linha tracejada na Figura 10(a). Uma vez que a frequência de alternância da direção do campo elétrico coincide com a frequência do movimento da partícula carregada, a partícula é acelerada a cada vez que passa através do espaço que separa os D's.

Quando as partículas atingem velocidades próximas à da luz, a velocidade da partícula começa a crescer cada vez menos conforme o elétron vai ganhando energia, causando uma quebra na sincronia entre a frequência do movimento da partícula e a frequência de alternância do campo elétrico. Esse problema pode ser contornado mudando-se a frequência da radiofrequência de forma a manter a sincronia (é o que se faz nos sincrociclotrons) (CNPEM, 2021a).

Uma das utilizações de aceleradores ciclotrons é a pesquisa. Nesse caso, as partículas de um feixe, uma vez aceleradas, podem ser direcionadas a alvos materiais fixos para estudar as reações entre as partículas e os núcleos. Um exemplo desse tipo de acelerador foi o Bevatron (Figura 11), um ciclotron para prótons que começou a operar em 1954, no Laboratório Lawrence Berkeley. Nesse acelerador, que alcançava a energia de 6,4 GeV, Emilio Segrè e Owen Chamberlain descobriram o antipróton, fazendo incidir um feixe de prótons em um alvo de cobre (Segrè, 1987). Por essa descoberta, foram laureados com o Prêmio Nobel de Física em 1959.

Figura 11 – O Bevatron durante o período de construção.



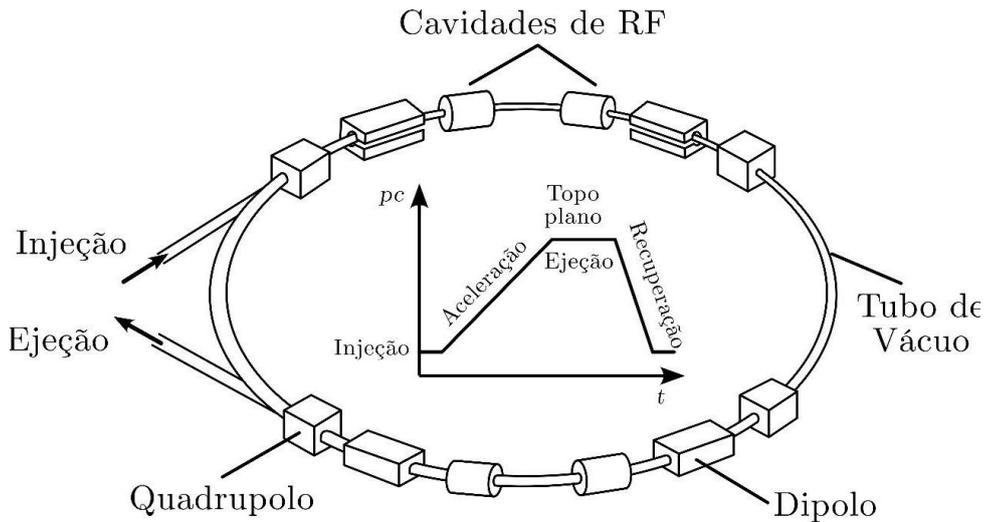
Fonte: CALISPHERE - University of California ([s.d]).

Um outro tipo de acelerador circular é o síncrotron. De acordo com Zhang (2023), esses aceleradores são caracterizados pelo campo magnético em sincronia com a energia dos feixes de partículas, enquanto o campo elétrico é sincronizado com a frequência de circulação

dos feixes. Assim, é possível obter feixes de partículas que circulem ao longo de órbitas com raio fixo e que são continuamente acelerados.

Em geral, os síncrotrons são compostos por: sistema magnético, sistema de fonte de alimentação, sistema de radiofrequência, sistema de vácuo, sistema de instrumentação e diagnóstico de feixe, sistema de controle, sistema de injeção, sistema de ejeção (Zhang, 2023). Veja um esquema na Figura 12.

Figura 12 – Representação esquemática de um acelerador do tipo síncrotron.



Fonte: adaptada de Zhang (2023).

Nas cavidades de radiofrequência, as partículas são aceleradas por campos elétricos alternados. Para manter fixa a trajetória dos feixes de partículas, são utilizados dipolos e quadrupolos magnéticos. Conforme visto anteriormente, uma partícula carregada no interior de um campo magnético uniforme tem sua trajetória curvada. Assim, os dipolos magnéticos permitem que o feixe de partícula faça “curvas” dentro do acelerador. Já os quadrupolos magnéticos são utilizados para focalizar o feixe, funcionando como lentes que mantêm o movimento das partículas ao longo e ao redor da órbita central (Zhang, 2023) (CNPEM, 2021a).

Os síncrotrons podem ser utilizados como fonte de radiação síncrotron, um tipo de radiação eletromagnética composta por diversos tipos de luz, desde o infravermelho, passando pela luz visível e pela radiação ultravioleta e chegando aos raios X (CNPEM, 2021b). Um exemplo desse tipo de acelerador é o acelerador principal do Sirius (Figura 13), localizado no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), no campus do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM).

Figura 13 – O acelerador de partículas Sirius.



Fonte: DIVULGAÇÃO/CNPEM (2020).

Nesse acelerador, os elétrons são mantidos circulando por muitas horas em órbitas estáveis, guiados por dipolos magnéticos. Quando os elétrons são desviados pelos campos magnéticos, sendo forçados a fazer uma curva, eles emitem a radiação síncrotron. Com essa radiação, pode-se estudar características da estrutura molecular e atômica da matéria, bem como acompanhar a evolução de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem em frações de segundos (LNLS - Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, [s.d.]).

Os síncrotrons também podem ser do tipo colisores. Nesse caso, circulam dentro do acelerador, simultaneamente e em sentidos opostos, dois feixes de partículas. Pode-se fazer esses feixes colidirem em vários pontos do síncrotron, gerando colisões de alta energia onde serão produzidas várias e novas partículas (Soria, 2015).

Um exemplo de colisor é o *Large Hadron Collider* (LHC) – Grande Colisor de Hádrons – o maior acelerador de partículas em operação no mundo atualmente. Ele faz parte do complexo de aceleradores do CERN, e consiste em um anel de aproximadamente 27 km de circunferência, podendo acelerar prótons e íons de chumbo, que são hádrons (por isso seu nome).

Como foi visto na seção anterior, o Modelo Padrão das Partículas resume o presente conhecimento que se tem em física de partículas. Ao longo dos anos, esse modelo tem sido testado e comprovado por experimentos, contudo ainda existem muitas questões em aberto nessa área.

Desse modo, segundo o CERN (2021), o LHC foi criado para ajudar os físicos a responderem algumas dessas principais questões, por exemplo: “qual a origem da massa das partículas?”, “seria a supersimetria a resposta para a unificação das interações fundamentais?”, “o que são matéria e energia escura?”, “por que há mais matéria que antimatéria no Universo?”.

E como o LHC ajuda a responder essas perguntas? Isso é possível devido à grande quantidade de energia que pode ser alcançada no interior do acelerador. Da equação de Einstein, $E = m \cdot c^2$, sabe-se que massa pode se transformar em energia, e energia pode transformar-se em massa. No LHC, ocorrem mais de um bilhão de colisões próton-próton por segundo. Como resultado dessas colisões, obtém-se uma densidade de energia comparável às condições que ocorreram fração de segundos após o *Big Bang*. Essa energia é então convertida em centenas de novas partículas, que podem ser estudadas (CERN, 2021).

Em julho de 2012, por exemplo, a partir dos resultados obtidos pelo LHC, foi possível confirmar a existência do mecanismo de Higgs, ampliando a compreensão dos físicos acerca da origem da massa das partículas.

Assim como acontece no Sirius, quando as partículas são curvadas no interior do LHC, elas perdem energia por radiação. Contudo, o Sirius e o LHC possuem objetivos diferentes: enquanto o Sirius acelera partículas para usar a radiação gerada no processo, o principal propósito do LHC é obter colisões a altas energias e estudar as partículas advindas dessas colisões. É por esse motivo que o Sirius acelera elétrons, enquanto o LHC acelera prótons e íons de chumbo, que são partículas massivas e têm uma perda de energia por radiação síncrotron muito menor que os elétrons.

Há quatro pontos de colisão entre feixes de partículas ao longo da circunferência do LHC. Em cada um desses pontos, existe um experimento instalado. São eles: *A Large Ion Collider Experiment* (ALICE), *A Toroidal LHC ApparatuS* (ATLAS), *Compact Muon Solenoid* (CMS) e *Large Hadron Collider beauty* (LHCb).

4.3.2 Detectores de partículas

A única forma de detectar partículas subatômicas é por meio de sua interação com a matéria, usando detectores de partículas. Isso ocorre porque, além de serem muito pequenas, algumas partículas têm um tempo de vida tão curto que seria impossível para a percepção humana observá-las diretamente.

De acordo com Reis (2021), em geral, um detector de partículas é composto por um volume que contém uma substância, sólida, líquida ou gasosa, com a qual a partícula interage.

Um mecanismo é acoplado ao corpo do detector para captar o resultado da interação. Há também amplificadores, responsáveis por amplificar os sinais analógicos vindos dos detectores antes deles serem digitalizados por dispositivos eletrônicos específicos. Por fim, tem-se o sistema de aquisição de dados e o *trigger*, um mecanismo que dispara o registro dos sinais.

O princípio de funcionamento de um detector depende do tipo de partícula que se deseja identificar: há detectores específicos para partículas carregadas, por exemplo, elétrons, prótons e múons, e há detectores desenvolvidos para partículas neutras, como nêutrons.

Segundo Soria (2015), os detectores de partículas carregadas podem ser do tipo:

- a) **Detectores de ionização.**
- b) **Contadores de cintilação, Cherenkov e radiação de transição;**
- c) **Detectores de traço**, nos quais a trajetória da partícula se torna visível. É o caso da câmara de Wilson, da câmara de bolhas e de emulsões fotonucleares.

Já para detectar partículas neutras, é necessário que essas partículas interajam com o detector e produzam partículas carregadas no estado final da interação. É a partir desses produtos que se pode reconstruir as características da partícula neutra incidente. Assim, para a detecção de fótons, utiliza-se a interação eletromagnética, ou seja, efeito fotoelétrico, efeito Compton e criação de pares. Já para a detecção de nêutrons, aproveita-se a interação forte.

Além disso, o experimento pode registrar diferentes tipos de informação. Se o pesquisador deseja determinar velocidade, trajetória ou massa da partícula, o processo de medida deve causar a menor perturbação possível em sua trajetória. Por outro lado, se o objetivo é medir energia da partícula, esta deve ser totalmente absorvida pelo detector (Reis, 2021).

Os grandes detectores instalados no LHC, por exemplo, têm como principal objetivo identificar partículas secundárias produzidas nas colisões, medindo suas posições no espaço, carga, velocidade, massa e energia. Conforme pode ser encontrado em CERN (2021), para alcançar esse objetivo, eles precisam ser compostos por várias camadas, ou subdetectores, cada um possuindo uma função específica na reconstrução da colisão.

Visto que os dados utilizados no *MasterClass*⁶ vêm no experimento ATLAS, este detector será utilizado para ilustrar as diferentes funções dos subdetectores na identificação de partículas subatômicas.

⁶ O *Masterclass* é um evento Internacional no qual os participantes têm a oportunidade de conhecer, de forma introdutória, a Física de Altas Energias e de analisar eventos reais registrados pelos experimentos do CERN. O *MasterClass* foi criado pela CERN e é atualmente promovido pelo *International Particle Physics Outreach (IPPOG)* (FÍSICA PARA UNIVERSIDADE E CONCURSOS, 2022).

4.3.3 O experimento ATLAS

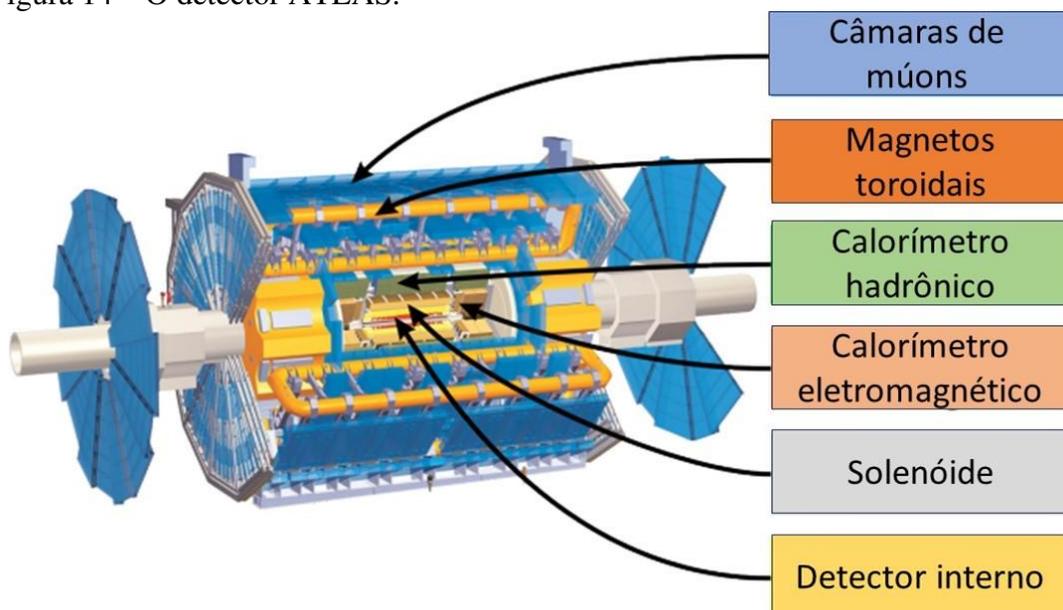
Segundo CERN (2021), o ATLAS é um experimento que foi idealizado para cobrir uma vasta gama de pesquisa em física no LHC, indo desde medições de precisão do bóson de Higgs até a procura por uma física para além do Modelo Padrão.

Esse experimento conta com a colaboração de físicos, engenheiros, técnicos, estudantes e pessoal de apoio do mundo inteiro. O Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP), o Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Juiz de Fora (UFJF), o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), o Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), os departamentos de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal da Bahia (UFBA) e o Instituto de Física da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) fazem parte da colaboração ATLAS (ATLAS Experiment, 2023a).

Os dados utilizados pela colaboração vêm do detector ATLAS - *A Toroidal LHC ApparatuS* (que significa – um aparato toroidal para o LHC). Ele é o maior detector já construído para um acelerador de partículas, possuindo as dimensões de um cilindro de 46 m de comprimento e 25 m de diâmetro, com massa igual a 7000 toneladas.

Esse detector fica localizado em uma caverna 100 m abaixo do solo e é formado por seis subsistemas de detecção distribuídos em camadas concêntricas ao redor do ponto de colisão entre as partículas. A Figura 14 traz uma visão geral do detector ATLAS e seus subsistemas de detecção.

Figura 14 – O detector ATLAS.

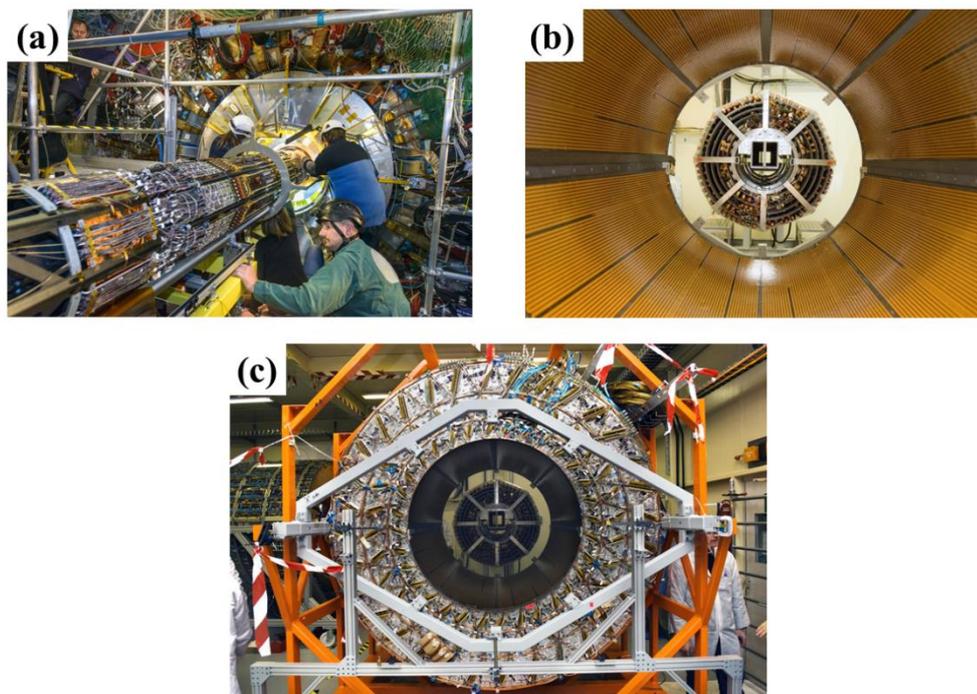


Fonte: adaptada de Peixoto (2022).

ATLAS Experiment (2023b) traz informações sobre cada camada do detector.

A primeira parte do ATLAS é o **detector interno**. Ele mede a direção, o momento e a carga das partículas eletricamente carregadas produzidas nas colisões. É composto por três sistemas diferentes de sensores: *Pixel Detector* - Figura 15(a), *Semiconductor Tracker* - Figura 15(b) e *Transition Radiation Tracker* - Figura 15(c).

Figura 15 – Subsistemas do detector interno.



Fonte: adaptada de ATLAS EXPERIMENT (2023c).

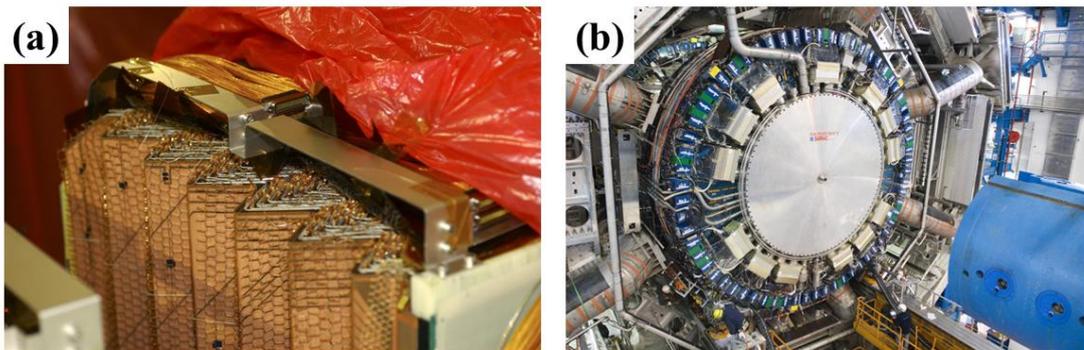
O *Pixel Detector* (PD) é composto por quatro camadas de pixels de silício, que possuem dimensões $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ nas camadas mais externas e $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ nas camadas mais internas. Quando saem do ponto de colisão, as partículas carregadas ionizam os pixels, permitindo registrar com precisão os pontos da trajetória da partícula. O *Semiconductor Tracker* também é usado para detectar e reconstruir os rastros das partículas carregadas produzidas durante as colisões. Ele está posicionado logo após o PD. Por fim, tem-se o *Transition Radiation Tracker*, que é composto por vários “canudos” preenchidos com uma mistura de gases. Ao passar por esses canudos, as partículas carregadas ionizam o gás, criando um sinal elétrico detectável, que também compõe o sistema de reconstrução da trajetória da partícula. Além disso, devido à radiação de transição, é possível saber se a partícula que passou pelo detector era um elétron (ATLAS Experiment, 2023c).

Outros componentes essenciais do detector ATLAS são os **calorímetros**. Eles são projetados para medir a energia da maior parte das partículas produzidas nas colisões entre prótons, parando-as e absorvendo a quantidade de energia liberada. Existem dois tipos

principais de calorímetros: os eletromagnéticos, que medem a energia de elétrons e fótons, e os hadrônicos, que coletam a energia dos hádrons à medida que estes interagem com núcleos atômicos (CERN, 2021).

Segundo ATLAS Experiment (2023d), há dois componentes no sistema de calorímetros do ATLAS: o *Liquid Argon (LAr) Calorimeter* (Calorímetro eletromagnético) - Figura 16(a) e o *Tile Hadronic Calorimeter* (Calorímetro hadrônico) - Figura 16(b).

Figura 16 – Os calorímetros do ATLAS.



Fonte: adaptada de ATLAS EXPERIMENT (2023d).

Segundo Ferreira (2019), o *Liquid Argon (LAr) Calorimeter* utiliza argônio líquido como material ativo e possui material passivo composto por placas de chumbo às quais são adicionados finos eletrodos de cobre. Essas placas são imersas em argônio líquido, intercalando material ativo e passivo.

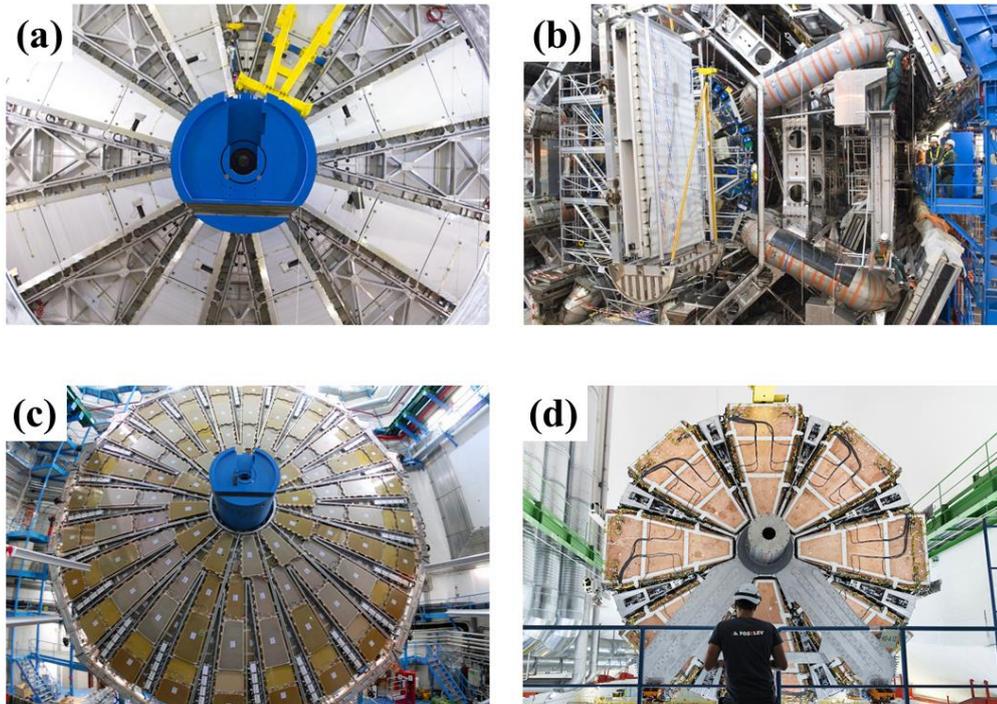
Ao atravessar o calorímetro, um elétron, por exemplo, interage com os átomos do material passivo (chumbo) e libera fótons. Estes decaem em um par elétron-pósitron, que também interagem com o detector. A interação do par gera uma reação em cascata chamada “chuveiro eletromagnético” (Ferreira, 2019).

Os hádrons são detectados no *Tile Hadronic Calorimeter*. Ele é feito de camadas de “telhas” cintilantes de aço e cintilador plástico intercaladas. A colisão das partículas incidentes na camada de aço gera uma chuva de novas partículas. Dentre elas, as partículas carregadas, ao atravessarem os cintiladores plásticos, produzem fótons, que são convertidos em corrente elétrica com intensidade proporcional à energia da partícula original.

Como visto nas seções anteriores, os múons também são léptons. Porém, por possuírem massa cerca de duzentas vezes a massa do elétron, não produzem chuva eletromagnética no *Lar*, conseguindo atravessar tanto o detector interno quanto os calorímetros sem depositar quantidades significativas de energia. Assim, a camada mais externa do ATLAS, a **câmara dos múons**, foi idealizada para identificar e medir o momento dessas partículas. Essa

camada é composta por cinco subdetectores, alguns apresentados na Figura 17: *Thin Gap Chambers (TGCs)*, *Resistive Plate Chambers (RPTs)*, *Monitored Drift Tubes (MDTs)*, *Small-Strip Thin-Gap Chambers (sTGCs)* e *Micromegas* (ATLAS EXPERIMENT, 2023e).

Figura 17 – Os subsistemas da câmara dos múons.



Fonte: adaptada de ATLAS Experiment (2023e).

Os MDTs – Figura 17(a) – são compostos por tubos de alumínio preenchidos com uma mistura de gases. Quando passam por esses tubos, os múons “expulsam” elétrons do gás, que induzem um sinal. As RPCs – Figura 17(b) – circundam a região central do experimento ATLAS, enquanto as TGCs – Figura 17(c) – são encontradas nas extremidades do experimento. Ambas detectam múons quando eles ionizam uma mistura gasosa, gerando um sinal, porém, as primeiras são compostas por pares de placas paralelas com uma diferença de potencial elétrico e separadas por um volume de gás, enquanto as segundas consistem em fios paralelos de $30\ \mu\text{m}$ em uma mistura de gases. Os últimos dois detectores, *Micromegas* – Figura 17(d) – e *sTGCs* são tecnologias de detectores adicionais projetados especialmente para colisões de alta intensidade no LHC (ATLAS Experiment, 2023e).

5 METODOLOGIA

Conforme apresentado na Introdução, o objetivo geral desse trabalho é construir uma proposta didática que proporcione a inserção de tópicos de Física Contemporânea no Ensino Médio. Espera-se que a aplicação dessa proposta possa contribuir de alguma forma para que os estudantes se sintam mais motivados a estudar Física.

Tendo esse objetivo como guia, a metodologia adotada para a produção do trabalho compreendeu as seguintes etapas:

- a) realizar uma revisão bibliográfica a fim de compreender o contexto do atual ensino de Física no Ensino Médio, especialmente no Brasil;
- b) definir o tema específico a ser abordado;
- c) determinar o referencial teórico-pedagógico que subsidiaria o desenvolvimento do Produto Educacional;
- d) elaborar e implementar a UEPS.

A pesquisa bibliográfica realizada no primeiro passo levou à elaboração do Capítulo 2 deste trabalho. Retoma-se aqui quatro problemáticas destacadas nesse capítulo:

1. a baixa participação de tópicos de Física Moderna e Contemporânea no currículo escolar;
2. o fato de o ensino centrar-se no professor e na preparação para provas, deixando de lado o aspecto investigativo da Física como ciência;
3. a carência de material didático e em ponto de uso disponível para professores no que se refere à Física Contemporânea;
4. o pouco tempo semanal de aulas de Física em comparação com a grande quantidade de conteúdos de Física Clássica que precisam ser trabalhados.

Uma vez que a FMC está presente na sociedade atual de diversas formas (tecnologias, mídias de entretenimento, divulgação científica), abordá-la em sala de aula poderia tornar a Física mais atrativa para o estudante, pois ele sentiria que está aprendendo tópicos integrados à sociedade em que vive. Assim, a primeira problemática foi considerada relevante para a questão da falta de incentivo para estudar física apresentada por alguns estudantes, e, na etapa b) da metodologia, optou-se pela escolha do tema **Física de Partículas**.

A seleção dessa temática específica dentro da área da Física Contemporânea é justificada por apresentar a Física como uma ciência viva e dinâmica (Ostermann; Moreira, 2001) e pela sua potencialidade para desenvolver habilidades trazidas pela BNCC, conforme

apresentado no Capítulo 2 deste trabalho. Além disso, seria uma oportunidade para a autora compartilhar com seus estudantes os conhecimentos que obteve ao participar, em 2022, da Escola de Física para Professores no CERN em Língua Portuguesa.

Escolhido o tema, era necessário elaborar uma proposta pedagógica para abordá-lo em sala de aula. Para tal, levou-se em consideração a segunda problemática apresentada anteriormente: o fato de o ensino de física estar centrado no professor e na preparação para provas. Assim, visando a romper com esse padrão e promover uma aprendizagem significativa crítica sobre o tema, escolheu-se elaborar e aplicar uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) sobre Física de Partículas com estudantes da disciplina eletiva Física Moderna e Contemporânea.

Para que isso fosse possível, realizou-se primeiramente um estudo acerca da Aprendizagem Significativa Crítica, a fim de compreender os princípios importantes dessa teoria da aprendizagem, a partir da qual Moreira (2011) sugeriu a elaboração das sequências didáticas denominadas UEPS. De forma complementar, investigou-se acerca dos passos a serem adotados para a elaboração de tal sequência didática.

Com base nas pesquisas realizadas, a UEPS sobre Física de Partículas foi elaborada e o Produto Educacional foi desenvolvido e aplicado. Tendo em vista a terceira problemática citada, a da falta de materiais didáticos sobre FMC, além dos procedimentos para aplicação da UEPS, o Produto contém sugestões de atividades e materiais que podem ser utilizados pelos professores durante sua implementação.

Por fim, houve a aplicação do Produto Educacional, que ocorreu no segundo semestre de 2023, totalizando 26 aulas. O público-alvo foi uma turma da disciplina eletiva Física Moderna e Contemporânea. Havia 48 estudantes da primeira série do Ensino Médio matriculados na disciplina, contudo, apenas cerca de trinta alunos frequentavam regularmente. A escola onde ocorreu a aplicação foi a EEMTI Professora Adalgisa Bonfim Soares, localizada no município de Fortaleza (CE) e pertencente à rede estadual de educação.

Estabelecidas pelo Novo Ensino Médio, as disciplinas eletivas compõem a parte diversificada do currículo, possuindo carga horária separada das aulas das disciplinas consideradas “base” (entre as quais a Física se encontra). Assim, a aplicação da UEPS na disciplina eletiva de Física Moderna e Contemporânea foi uma forma de contornar a quarta problemática destacada nessa seção, apresentando-se aos estudantes tópicos de FMC sem “comprometer” a carga horária da disciplina de Física.

A aplicação do produto educacional seguiu os aspectos sequenciais para o desenvolvimento de uma UEPS especificados na seção 3.2 deste trabalho. O cronograma de implementação do Produto é apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Cronograma de implementação do Produto Educacional.

AÇÃO DESENVOLVIDA	NÚMERO DE AULAS
Investigação dos conhecimentos prévios dos estudantes	2
Estudo dos Modelos Atômicos	11
Estudo do Modelo Padrão das Partículas Elementares	5
Realização do <i>MasterClass</i> em Física de Partículas	5
Realização da Avaliação Somativa Individual	1
Conclusão da UEPS	1
Realização da avaliação da UEPS pelos estudantes	1

Fonte: elaborado pela autora.

5.1 Descrição do produto educacional

O Produto Educacional recebeu o título “Investigando o Grande Mundo das Pequenas Partículas”. Seu principal objetivo é contribuir para que tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) tenham maior presença no Ensino Médio. Assim, para tornar sua aplicação mais acessível a alunos e professores, ele foi organizado no formato de uma cartilha, contendo duas seções, à qual foi incorporada a UEPS desenvolvida.

Na **Seção 1**, realiza-se uma descrição detalhada da UEPS, especificando-se o número de aulas, o objetivo e a descrição de cada etapa de seus aspectos sequenciais. A **Seção 2** foi dividida em três Unidades. Cada Unidade aborda um subtema dentro da Física de Partículas e contém orientações gerais para os professores e materiais prontos para os estudantes utilizarem. Quando necessário, as Unidades foram subdivididas em Capítulos.

Na **Unidade 1**, são apresentadas as atividades voltadas para se trabalhar a evolução das ideias acerca da constituição da matéria, desde a concepção grega até o desenvolvimento do Modelo Padrão das Partículas. A **Unidade 2** traz as atividades voltadas para se trabalhar mais detalhadamente o Modelo Padrão das Partículas Elementares. Por fim, na **Unidade 3**, são

apresentados os materiais necessários para a realização da atividade de *MasterClass-Hands on Particle Physics*, na qual os estudantes poderão identificar partículas por meio de dados reais do experimento ATLAS, no LHC, no CERN.

5.2 Desenvolvimento da UEPS

A UEPS é parte central do Produto Educacional, por esse motivo, os procedimentos adotados para seu desenvolvimento serão detalhados nessa seção.

Conforme apresentado no tópico “3.2 As Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS)”, Moreira (2011) define oito aspectos sequenciais a serem realizados para a elaboração de uma UEPS. Tais aspectos estão sintetizados no Quadro 5.

Quadro 5 – Aspectos sequenciais para elaboração de uma UEPS.

Nº	Aspecto Sequencial
1	Definir o tópico específico a ser abordado.
2	Criar/propor situações que levem o estudante a externalizar seu conhecimento prévio no contexto da matéria de ensino.
3	Propor situações problema, em nível introdutório.
4	Apresentar o conhecimento a ser ensinado/aprendido, levando em conta a diferenciação progressiva.
5	Dar continuidade ao conteúdo da unidade de ensino em nível mais alto de complexidade.
6	Concluir a unidade, dando seguimento ao processo de diferenciação progressiva e retomar as características mais relevantes sob uma perspectiva integradora.
7	Realizar uma avaliação somativa individual, cujos resultados serão somados aos de uma avaliação formativa.
8	Realizar uma avaliação da própria UEPS

Fonte: elaborado pela autora.

Assim, a estrutura da UEPS sobre Física de Partículas enquadra-se nos oito passos mostrados no Quadro 5 da seguinte forma:

1) Definir o tópico específico a ser abordado:

Tópico escolhido: Física de Partículas – Modelos Atômicos e Modelo Padrão das Partículas Elementares.

2) Criar/propor situações que levem o estudante a externalizar seu conhecimento prévio no contexto da matéria de ensino.

Número de aulas para aplicação: 1 aula.

Descrição: apresentar aos estudantes o tópico específico a ser trabalhado. Para tal, propõe-se a utilização da série *The Big Bang Theory* e do personagem fictício Sheldon Cooper como ponto de partida para uma discussão sobre o que é a Física de Partículas e o que ela estuda. Caso os estudantes não conheçam a série, recomenda-se que o professor selecione os episódios nos quais o tema “Física de Partículas” tenha mais destaque e os mostre aos alunos. Pode-se também usar a Tabela Periódica dos elementos e sua lógica de desenvolvimento para introduzir a ideia da Tabela do Modelo Padrão. Essa aula deve ser conduzida de forma dialogada com os estudantes, sem necessariamente chegar a respostas corretas para as questões levantadas.

3) Propor situações problema, em nível introdutório.

Número de aulas para aplicação: 1 aula.

Descrição: entregar aos estudantes um material contendo sete perguntas que envolvem as teorias acerca da constituição da matéria, modelos atômicos e técnicas de detecção de partículas subatômicas. O objetivo é que, por meio dessas questões, os alunos possam compartilhar os conhecimentos prévios relevantes para o aprendizado do tópico definido. As perguntas são:

- 1) Você já parou para pensar na seguinte pergunta: “do que o Universo é feito”?
- 2) Caso nunca tenha pensado na pergunta acima, pense um pouco agora e responda: Do que você acha que o Universo é feito? Caso já tenha pensado no assunto, coloque abaixo sua resposta para essa pergunta.
- 3) Você sabe o que é um átomo? Explique com suas palavras.
- 4) Como você representaria um átomo?
- 5) Você já ouviu falar de modelos atômicos? Quais modelos atômicos você conhece? Fale um pouco sobre cada um.
- 6) Você sabe o que é uma partícula elementar? Explique com suas palavras e dê um exemplo.

7) Existem partículas tão pequenas que o nosso olho não consegue enxergar. Pensando nisso, você sabe como os cientistas descobrem uma nova partícula?

4) Apresentar o conhecimento a ser ensinado/aprendido, levando em conta a diferenciação progressiva.

Número de aulas para aplicação: 16 aulas.

Descrição: iniciar o estudo das partículas subatômicas por meio da evolução das teorias acerca da estrutura da matéria, passando pelos Modelos Atômicos até chegar ao Modelo Padrão das Partículas Elementares. Essa etapa pode ser dividida em dois blocos principais.

No **primeiro bloco**, aborda-se o tema “modelos atômicos”, o qual é utilizado para estudar principalmente o elétron e o próton. Para tal, propõe-se empregar onze aulas, cujos conteúdos são distribuídos conforme Quadro 6.

Quadro 6 – Cronograma de aulas aspecto sequencial 4, bloco 1.

Número da Aula	Conteúdo
3	As primeiras concepções acerca da constituição da matéria.
4 e 5	Modelos atômicos de Dalton e Thomson.
6 e 7	Modelo atômico de Rutherford.
8 e 9	Modelo atômico de Bohr.
10 e 11	- Modelo atômico atual (Mecânica Quântica); - Explicação da atividade de Fanzines ⁷ .
12 e 13	- Entrega dos Fanzines; - Quiz Modelos Atômicos.

Fonte: elaborado pela autora.

Na primeira aula do bloco, as concepções acerca da constituição da matéria são abordadas de maneira geral. Nas aulas seguintes, realiza-se a diferenciação progressiva exemplificando e abordando aspectos específicos de cada modelo atômico.

Para trabalhar os tópicos apresentados, propõe-se a utilização de aulas expositivas em conjunto a atividades que promovam a participação ativa e colaborativa dos estudantes.

⁷ Fanzines são produções independentes das editoras, com o objetivo principal de divulgar produções amadoras em uma rede de comunicação criada entre fãs interessados em determinado tema. Assim, um fanzine pode ser uma revista em quadrinhos, uma colagem, um mural, um cordel ou um desenho, entre outras possibilidades criativas.

Além da avaliação contínua feita ao longo das aulas, ao final do bloco, os estudantes serão avaliados por meio da produção de Fanzines com o tema “Modelos atômicos” e da participação em um quiz sobre o mesmo tema. A sequência de aulas sugeridas, os materiais utilizados, bem como as instruções sobre a produção de fanzines e as perguntas feitas no quiz encontram-se no Produto Educacional.

No **segundo bloco**, aborda-se o Modelo Padrão das Partículas Elementares. Para tal, propõe-se empregar cinco aulas, cujos conteúdos são distribuídos conforme Quadro 7.

Quadro 7 – Cronograma de aulas aspecto sequencial 4, bloco 2.

Número da Aula	Conteúdo
14	Introdução ao Modelo Padrão.
15	As partículas do Modelo Padrão.
16	Tabela do Modelo Padrão: organizando a Construção.
17 e 18	Tabela do Modelo Padrão: montagem e apresentação.

Fonte: elaborado pela autora.

Na primeira aula do segundo bloco, são trabalhadas a importância e a existência de outras partículas subatômicas: o nêutron (pois geralmente é outra partícula subatômica que os estudantes já conhecem), o neutrino do elétron (devido a sua relevância nos processos de decaimento radioativo), o pósitron (por ter sido a primeira antipartícula descoberta), o múon (por ter sido a primeira partícula subatômica instável descoberta) e o pión (por ser uma partícula chave para demonstrar que o modelo de Yukawa para existência da força forte estava correto, além de ter contado com a participação do físico brasileiro Cesar Lattes em sua detecção).

Na aula seguinte, diferencia-se “subatômico” de “elementar” no contexto da Física de Partículas. Destaca-se a grande quantidade de partículas subatômicas descobertas a partir da década de 50 e a necessidade de organizá-las, de forma semelhante ao que foi feito na Tabela Periódica com os elementos químicos.

O Modelo Padrão é então apresentado em seus aspectos mais abrangentes. Em seguida, a diferenciação progressiva é promovida ao especificar-se o que são quarks, léptons e bósons e como eles interagem de acordo com as interações fundamentais da natureza.

Para consolidação do segundo bloco, os estudantes devem construir e apresentar uma Tabela do Modelo Padrão, a ser fixada na parede da sala de aula. Para essa atividade, os alunos devem ser divididos em equipes, cada uma ficando responsável por uma ou duas

partículas do Modelo Padrão. Os materiais utilizados, bem como as instruções sobre a produção e apresentação da Tabela, encontram-se no Produto Educacional.

5) Dar continuidade ao conteúdo da unidade de ensino em nível mais alto de complexidade.

Número de aulas para aplicação: 5 aulas.

Descrição: apresentar formas de detectar partículas subatômicas e realizar um *MasterClass* de Física de Partículas. O *Masterclass* é um evento Internacional no qual os participantes têm a oportunidade de conhecer, de forma introdutória, a Física de Altas Energias e de analisar eventos reais registrados pelos experimentos do CERN. O *MasterClass* foi criado pelo CERN e é atualmente promovido pelo *International Particle Physics Outreach* (IPPOG). No Brasil, é realizado desde 2008, e já contou com a participação de estudantes e professores de São Paulo, Minas Gerais, Ceará, Amazonas, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Pará, Paraná, Bahia, Espírito Santo, Tocantins e Mato Grosso do Sul (Física para Universidade e concursos, 2022).

No *MasterClass* proposto na UEPS, os estudantes buscarão identificar os bósons Z^0 e de Higgs a partir de dados de colisões reais obtidos pelo experimento ATLAS. Para tal, propõe-se utilizar cinco aulas de acordo com o cronograma exposto no Quadro 8.

Quadro 8 – Cronograma de aulas para realização do *MasterClass* em Física de Partículas.

Número da Aula	Conteúdo
19	- Preparação com os estudantes.
20	- Apresentação do HYPATIA ⁸ .
21	- Preparação para a análise dos eventos.
22 e 23	- Análise dos eventos.

Fonte: elaborado pela autora.

Na aula 19, informa-se aos estudantes que eles irão realizar o *MasterClass-Hands on Particle Physics*, explicando-lhes do que se trata a atividade.

A preparação para o *MasterClass* inicia-se com a apresentação de formas de se obter partículas subatômicas para estudo: raios cósmicos e aceleradores de partículas. Em

⁸ O HYPATIA é o programa utilizado no *MasterClass* para visualizar as imagens que mostram como as partículas geradas nas colisões no ATLAS atravessam as camadas do detector.

seguida, apresenta-se formas de identificar as partículas subatômicas por meio do “rastros” que deixam em detectores de partículas.

Na parte de aceleradores, é dado um enfoque no *Large Hadron Collider* (LHC), o maior e mais poderoso acelerador de partículas em operação no mundo atualmente, que fica localizado no CERN. Já em relação aos detectores, dá-se enfoque ao detector ATLAS. Esses destaques são dados devido ao fato de serem desse acelerador e desse detector os dados utilizados no *MasterClass*.

Finalizando a aula, o professor deve mostrar aos estudantes de que formas os bósons Z^0 e de Higgs podem decair, e como esses decaimentos são identificados nas camadas no detector ATLAS.

Na aula 20, os estudantes irão se familiarizar com o programa utilizado para a análise dos eventos do *MasterClass*, o HYPATIA (*Hybrid Pupil's Analysis Tool for Interactions in Atlas*). Para isso, os alunos precisam ser divididos em grupos de, no máximo, três integrantes. Cada grupo precisa ter acesso a um computador com o programa HYPATIA previamente instalado e com a versão atual do Java instalada. O professor também precisa ter acesso a um computador com o HYPATIA e o Java, além de um projetor.

A partir da página inicial do programa, o docente realiza uma nova apresentação, em nível mais alto de complexidade, na qual serão destacadas as relações entre as partes do detector ATLAS previamente estudadas e as ferramentas do programa. O professor deve mostrar também aos estudantes como identificar no programa os rastros deixados pelas partículas envolvidas nos decaimentos dos bósons Z^0 e de Higgs (elétron, pósitron, fótons e múons), de acordo com as propriedades dessas partículas e o funcionamento do detector e do programa, promovendo-se, assim, a reconciliação integradora.

Na aula 21, os grupos formados para a apresentação do HYPATIA são mantidos, e todos analisarão, junto ao professor, o mesmo conjunto de dados. Essa ação é importante para que os alunos possam tirar dúvidas que ainda tenham restado sobre a classificação dos eventos.

As aulas 22 e 23 serão dedicadas à busca dos bósons Z^0 e de Higgs. Nelas, cada equipe de estudantes ficará responsável por um conjunto diferente de dados, e deverá classificar os acontecimentos de acordo com o que foi estudado. Trata-se de uma atividade colaborativa, na qual os alunos precisarão interagir socialmente e negociar significados. Nesse momento, o professor atua como orientador/mediador, circulando entre as equipes e tirando as dúvidas que surgirem.

As instruções para realização do *MasterClass*, assim como um manual para participação no evento que pode ser compartilhado com os estudantes, encontram-se no Produto Educacional.

6) Concluir a unidade, dando seguimento ao processo de diferenciação progressiva e retomar as características mais relevantes sob uma perspectiva integradora.

Número de aulas para aplicação: 1 aula.

Descrição: Nessa etapa, o professor retoma o conteúdo da UEPS e apresenta aos estudantes os resultados obtidos por eles a partir de suas análises no *MasterClass*. Para tal, o docente pode utilizar gráficos gerados pelo OPloT, uma ferramenta que fornece um histograma da distribuição de massa invariante para diferentes canais de decaimento que estão sendo estudados. Contudo, o professor apenas conseguirá utilizar o OPloT se houver um evento de *MasterClass* previamente cadastrado nele. O Produto Educacional traz orientações sobre como realizar esse cadastro.

Realiza-se mais uma diferenciação progressiva ao explicar aos alunos como as análises realizadas por eles são sintetizadas nos gráficos gerados pelo OPloT, e o que esses gráficos informam. Nesse caso, não há resposta individualmente correta ou errada, pois é gerado um perfil estatístico levando em consideração todas as análises feitas.

Sob uma perspectiva integradora, apresenta-se então o gráfico obtido com as análises realizadas pelos estudantes, verificando junto a eles se o comportamento apresentado foi o esperado e, se não, que fatores podem ter levado ao surgimento de discrepâncias.

7) Realizar uma avaliação somativa individual, cujos resultados serão somados aos de uma avaliação formativa.

Número de aulas para aplicação: 1 aula.

Descrição: realização de avaliação somativa individual, composta por oito perguntas. São elas:

- 1) Quais modelos atômicos você estudou na Eletiva? Explique cada um deles.
- 2) Qual o modelo atômico que explica a estrutura do átomo atualmente? Explique esse modelo.
- 3) O que é uma partícula elementar? Cite exemplos.
- 4) Todas as partículas subatômicas são elementares? Justifique.
- 5) As partículas elementares podem ser organizadas em léptons, quarks e bósons de acordo com um Modelo Padrão de Partículas. Fale um pouco sobre os léptons, os quarks e os bósons e cite pelo menos um exemplo de cada grupo.

7) Em sua opinião, o(a) professor(a) demonstrou domínio de conteúdo e conseguiu ser claro(a) na sua abordagem dos conceitos?

Sim Não Parcialmente

Justifique sua resposta.

8) Use o espaço abaixo para deixar comentários sobre a UEPS!

5.3 Princípios da aprendizagem significativa crítica destacados na UEPS

Moreira (2006, 2007) traz os princípios necessários à promoção da Aprendizagem Significativa Crítica em sala de aula. Nessa seção serão apontados quais se destacam diretamente nas atividades propostas pela UEPS.

5.3.1 Princípio da interação social e do questionamento

De forma geral, esse princípio afirma ser necessário ensinar os estudantes a fazerem perguntas no lugar de decorar respostas. Na UEPS, ele pode ser diretamente observado na atividade *MasterClass*.

Nessa atividade, não é possível decorar a classificação correta de todos os eventos contidos nos diretórios de dados utilizados. Além disso, apesar de os decaimentos dos bósons Z^0 e de Higgs envolverem elétrons, múons e fótons, nem todos os eventos que possuem essas partículas são relevantes para a identificação dos bósons procurados.

Portanto, para realizar as análises adequadamente, os estudantes devem levar em consideração as características de cada partícula e perguntar-se quais são relevantes para sua classificação correta no HYPATIA.

5.3.2 Princípio da não centralidade no livro de texto

Esse princípio não trata do abandono do livro texto, e sim da utilização de outros recursos, por exemplo, artigos científicos, contos, poesias, crônicas, obras de arte, dentre outros materiais que representem a produção do conhecimento humano.

Na elaboração e aplicação da UEPS foram utilizados diversos recursos, entre eles, livros didáticos, artigos científicos e vídeos informativos.

Entre os livros, pode-se citar “Moderna Plus Ciências da Natureza e suas Tecnologias: o Conhecimento Científico”, “Partículas para todos” e “Dos Raios-X aos Quarks”. Entre os artigos, destaca-se “Sobre o Discreto Charme das Partículas Elementares”, de autoria da professora Maria Cristina Batoni Abdalla, publicado na revista Física na Escola, volume 6, número 1, 2005. Por fim, entre os vídeos utilizados estão “'Partícula de Deus': como Bóson de Higgs explica o Universo”, produzido pela BBC News Brasil e o “Anúncio da detecção do Bóson de Higgs no Jornal Nacional”.

5.3.3 Princípio do aprendiz como perceptor/representador

Segundo esse princípio, a aprendizagem significativa crítica apenas se efetivará se o estudante for tratado como um perceptor, que é capaz de representar o mundo a partir do que lhe é ensinado (Moreira, 2006).

Na UEPS, o princípio do Aprendiz como perceptor/representador está intimamente relacionado com a produção de Fanzines. Nessa atividade, que podia ser feita em grupo ou individualmente, os estudantes deveriam escolher um entre os modelos atômicos estudados como temática para elaborar um fanzine, que poderia ser uma revista em quadrinhos, uma colagem, um mural, um cordel, um desenho, entre outras possibilidades criativas.

Assim, o estudante (aprendiz) atua como um perceptor e representador do mundo (modelos atômicos): ele o percebe e então o representa.

5.3.4 Princípio da incerteza do conhecimento

Arelado a esse princípio está o fato de que o conhecimento humano está em constante evolução: modelos antes aceitos como “corretos” não são mais usados atualmente, e os modelos aceitos atualmente podem ser substituídos no futuro por outros mais elaborados (Moreira, 2006).

Ao longo das atividades que trabalharam o desenvolvimento dos modelos atômicos, esse princípio esteve bastante presente. Buscou-se que os estudantes percebessem as inconsistências dos modelos anteriores e compreendessem a necessidade de surgimento de um outro que explicasse de forma mais satisfatória os fenômenos observados.

5.3.5 Princípio da diversidade de estratégias/princípio da não utilização do quadro-de-giz

Para que haja aprendizagem significativa crítica, o professor deve utilizar diferentes estratégias instrucionais, que provoquem participação ativa dos estudantes e promovam um ensino centralizado no aluno (Moreira, 2006).

Ao longo da UEPS, além das aulas expositivas, foram realizadas atividades como elaboração de fanzines, quiz, elaboração e apresentação da Tabela do Modelo Padrão e o *MasterClass* em Física de Partículas. Em todas elas, a participação ativa dos estudantes foi um elemento central.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, os resultados obtidos a partir da implementação do Produto Educacional serão apresentados e discutidos. Para melhor estruturação, optou-se por subdividi-lo em dois tópicos principais: “Avaliação das Produções dos Estudantes” e “Avaliação da UEPS do ponto de vista dos alunos”.

No primeiro tópico, as atividades desenvolvidas pelos discentes ao longo da implementação do Produto serão avaliadas de forma a identificar seu impacto na aprendizagem desses educandos.

O segundo tópico será dedicado a realizar uma avaliação da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa a partir da perspectiva dos estudantes. Com isso, espera-se compreender as percepções e as dificuldades compartilhadas pelos discentes acerca de sua participação na implementação do Produto, bem como explicitar suas sugestões para melhorias e aprimoramentos futuros.

6.1 Avaliação das produções dos estudantes

Com o objetivo de efetivar a aprendizagem significativa crítica dos estudantes, foram utilizadas diferentes estratégias instrucionais que promoveram a participação ativa dos alunos ao longo da aplicação do Produto Educacional.

Assim, para trabalhar os modelos atômicos de Dalton e Thomson, adotou-se a técnica rotação por estações, na qual a sala foi dividida em dois espaços (as estações): um dedicado ao modelo de Dalton, e outro ao modelo de Thomson. Os estudantes foram distribuídos em grupos de até cinco integrantes, e todos os grupos passaram pelas duas estações de estudo.

Já para trabalhar os Modelos atômicos de Rutherford, Bohr e o da Mecânica Quântica foram realizadas atividades que precisavam ser desenvolvidas em duplas ou trios. Nesses casos, os integrantes da dupla ou do trio possuíam tarefas específicas e diferentes entre si, mas que se complementavam em prol do alcance de uma meta coletiva.

Nas aulas dedicadas ao Modelo Padrão e no *MasterClass* de Física de Partículas, mais uma vez os estudantes precisaram trabalhar em grupos e participar ativamente do processo.

Acerca dessa estratégia, dois pontos merecem destaque. O primeiro foi que, inicialmente, havia certa resistência por parte dos estudantes para realizar trabalhos em grupos.

Algumas vezes eles pediam para fazer sozinhos, outras pediam para que a quantidade de membros nas equipes fosse alterada.

A forma encontrada para contornar essa situação foi realizar conversas e acordos, a fim de incentivar o efetivo envolvimento dos discentes nas atividades. Quando não era possível mudar a logística da distribuição dos grupos, conversava-se com os alunos, mostrando a importância de manter aquela configuração para que a realização da atividade fosse bem-sucedida. Em dias que os estudantes se mostravam menos dispostos a participar, eram realizados ajustes nas atividades com o objetivo de envolvê-los mais.

O segundo ponto observado foi que grande parte da turma não estava habituada a participar ativamente da aula. Nas primeiras semanas, eles chegavam a “reclamar” porque em toda aula eram responsáveis por realizar uma tarefa. Porém, era perceptível que eles participavam muito mais ativamente durante as atividades.

Na escola onde o Produto foi aplicado, as primeiras séries fazem parte do Ensino em Tempo Integral, e as aulas da eletiva eram as primeiras após o almoço. Por vezes, nos momentos de exposição do conteúdo, os alunos mostravam-se cansados e sonolentos, o que dificilmente era observado quando tinham que se reunir para realizar uma tarefa.

Como citado na metodologia, o Produto Educacional foi aplicado na disciplina eletiva de Física Moderna e Contemporânea, cujo programa contemplava um semestre de aulas. Essa realidade resultou em uma grande quantidade de produções por parte dos estudantes. Realizar uma análise crítica detalhada de todas elas resultaria em um volume extenso de páginas, tornando a apresentação dos resultados excessivamente complexa.

Desse modo, escolheu-se fazer um recorte para a análise de resultados das produções dos estudantes, tendo sido escolhidas as seguintes atividades: quiz sobre Modelos Atômicos e *MasterClass* em Física de Partículas. Essas atividades foram escolhidas pois, conforme relato dos próprios estudantes, foram as que eles mais gostaram de participar e mais se envolveram efetivamente.

6.1.1 Quiz modelos atômicos

O quiz sobre Modelos Atômicos foi a segunda atividade avaliativa executada ao final do bloco sobre Modelos Atômicos. Ele foi realizado no laboratório de informática da escola, como pode ser visto na Figura 18, utilizando-se o Kahoot. Nesse site, o professor pode cadastrar um quiz que estará associado a um código. Os estudantes entram no site, inserem o código disponibilizado pelo professor e escolhem um nome de jogador. Quando o quiz é

iniciado, os alunos respondem as perguntas em tempo real, ganhando pontos de acordo com o número de acertos e o tempo de resposta. A cada pergunta feita, o site vai gerando um pódio com os nomes dos participantes que obtiveram mais pontos.

Figura 18 – Realização do quiz sobre Modelos Atômicos.



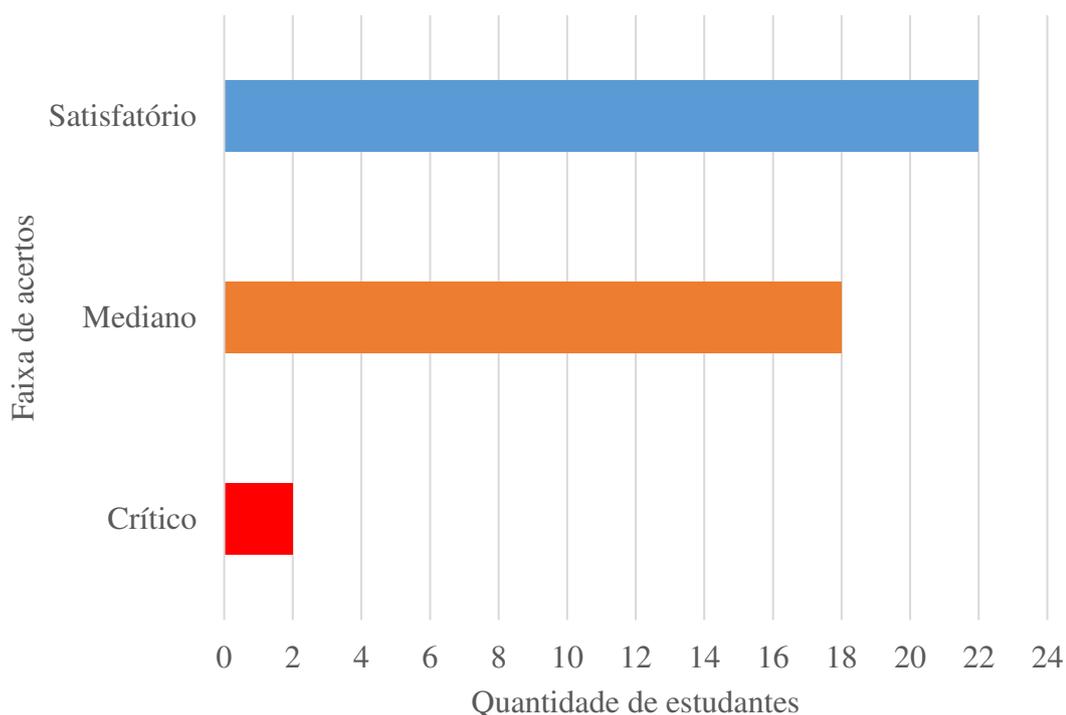
Fonte: arquivo pessoal.

Durante o quiz, foram feitas dezessete perguntas acerca dos modelos atômicos, que podem ser acessadas pelo link: [perguntas do quiz](#). As perguntas também estão disponíveis no Produto Educacional.

Ao total, 42 estudantes participaram, tendo sido uma das aulas com maior frequência. Como não havia computador para todos os estudantes, alguns organizaram-se em duplas e outros fizeram pelo celular. Quando questionados sobre menor equidade no processo devido a esse fato, os próprios estudantes relataram não se incomodar.

Considerando que a nota necessária para aprovação na escola é seis, foram determinados três faixas em relação à porcentagem de acertos dos estudantes: **crítico** (entre 0% e 29%), **mediano** (entre 30% e 59%) e **satisfatório** (entre 60% e 100%). O resultado dos estudantes está sintetizado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Resultados dos estudantes para o quiz sobre Modelos Atômicos.



Fonte: elaborado pela autora.

Esse gráfico indica um bom nível de conhecimento dos alunos em relação ao tema Modelos Atômicos, com apenas dois estudantes ficando na faixa de conhecimento crítico.

Ainda que as questões fossem de múltipla escolha, o que admite respostas escolhidas de forma aleatória, ao longo da aplicação do quiz foi observado um real comprometimento dos estudantes com a atividade. Assim, acredita-se que os resultados observados no gráfico reflitam a realidade da turma.

Em relação à metodologia adotada para a realização do quiz, observou-se que a utilização do Kahoot foi muito positiva, pois os alunos iam acompanhando sua evolução após cada pergunta e sentiam-se motivados a continuar em uma boa posição ou a melhorar sua pontuação, caso não estivessem bem. Ao final do quiz, a porcentagem de acertos de cada estudante foi utilizada como uma nota da disciplina, e os alunos que ficaram no pódio final (as três melhores pontuações) foram premiados com chocolates, conforme pode ser visto na Figura 19. Essa ação também demonstrou exercer grande influência na motivação dos estudantes.

Figura 19 – Aluno com melhor pontuação recebendo premiação.



Fonte: arquivo pessoal.

6.1.2 *MasterClass em física de partículas*

Ao longo das aulas da eletiva, observou-se que alguns estudantes se envolviam bastante nas atividades e se interessavam muito pelo assunto. Buscando incentivar o protagonismo desses alunos, eles foram convidados para atuarem como monitores nas análises dos eventos do *MasterClass* e receberam um treinamento prévio, no qual foram informados que, nessa atividade, seriam analisados eventos obtidos pelo experimento ATLAS no CERN com o objetivo de procurar os bósons Z^0 e de Higgs.

No treinamento, os monitores conheceram um pouco mais sobre os bósons Z^0 e de Higgs e como eles são detectados no ATLAS por meio de seus decaimentos. Além disso, também foram apresentadas aos monitores as partes que compõe o detector ATLAS e como cada camada faz a detecção das partículas. Para finalizar o treinamento, os quatro estudantes analisaram alguns eventos junto à professora, conforme visto na Figura 20, a fim de se familiarizarem com o HYPATIA e esclarecessem as dúvidas sobre os eventos.

Figura 20 – Treinamento dos monitores para o *MasterClass*.



Fonte: arquivo pessoal.

A realização do *MasterClass* ocorreu de acordo com o cronograma definido na Metodologia desse trabalho e contou com a participação ativa de trinta estudantes da eletiva.

Nessa atividade, destaca-se a evidente contribuição positiva da participação da professora na Escola de Física do CERN, pois, a partir dessa experiência, muitas informações, fotos e vídeos puderam ser mostrados aos alunos, que ficaram impressionados com o tamanho do LHC e dos detectores ATLAS e CMS. Além disso, também foi possível observar que eles se viram mais próximos do assunto, tendo feito perguntas, por exemplo, “como a senhora fez para ir para lá (CERN)?”, “como foi a experiência?”.

Uma outra experiência muito proveitosa foi a da exibição de um vídeo gravado previamente pela professora Márcia Begalli especialmente para os estudantes da escola. Nele, a professora falava sobre sua trajetória acadêmica, seu trabalho na área de Física de Partículas, e suas experiências como organizadora do *MaterClass* e como professora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Foi observado que os alunos ficaram felizes por uma pesquisadora da área ter dedicado seu tempo para lhes deixar uma mensagem.

Para a análise dos eventos, escolheu-se o diretório de dados 07. Esse diretório foi escolhido de forma aleatória e baixado previamente, conforme ensinado no Produto Educacional. A divisão de equipes para análise dos dados é apresentada no Quadro 9.

Quadro 9 – Divisão de equipes para a análise dos eventos do *MasterClass*.

Equipe	Grupo
1	DIR07_grupoA
2	DIR07_grupoC
3	DIR07_grupoD
4	DIR07_grupoE
5	Dir07_grupoG
6	Dir07_grupoH
7	Dir07_grupoK
8	Dir07_grupoL
9	Dir07_grupoO
10	Dir07_grupoP
11	Dir07_grupoQ

Fonte: elaborado pela autora.

Durante as análises dos eventos, a professora atuou apenas como facilitadora, auxiliando os estudantes em caso de dúvidas. Destaca-se a importância do papel dos monitores durante as análises, conforme visto na Figura 21, pois eles participaram ativamente, auxiliando os colegas que estavam com dificuldades. Houve grande envolvimento dos estudantes nessa atividade: apenas um grupo (composto por três alunos) não quis participar das análises. Os demais conseguiram analisar vários eventos.

Figura 21 – Monitores auxiliando os colegas nas análises dos eventos.

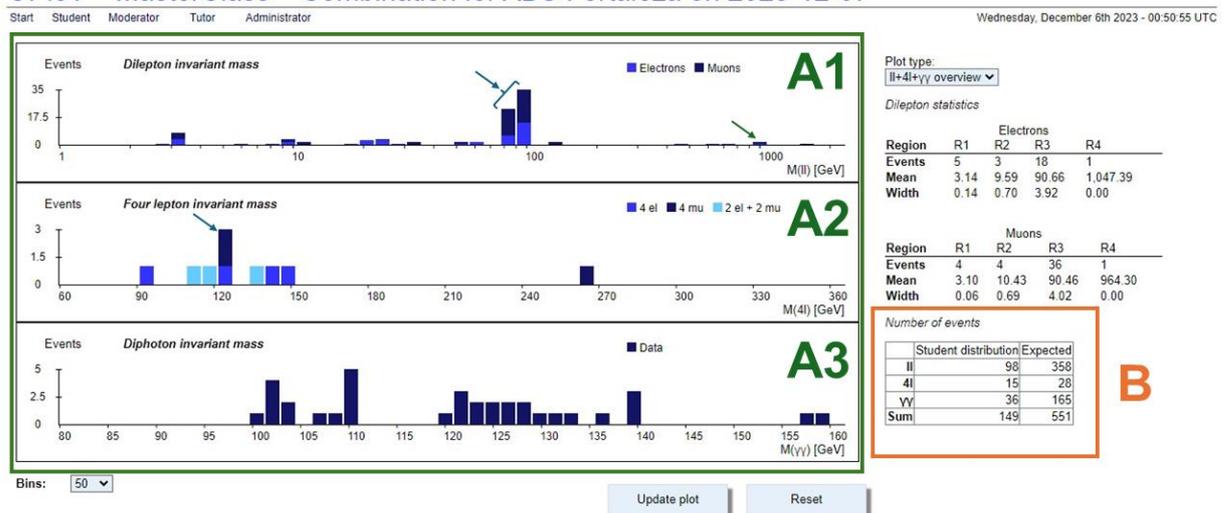


Fonte: arquivo pessoal.

Na última aula dedicada ao *MasterClass*, os resultados obtidos pelos alunos foram apresentados por meio dos gráficos gerados pelo Oplot a partir das análises realizadas. Esses resultados são apresentados na Figura 22.

Figura 22 – Resultado gerado pelo OPlot a partir das análises dos estudantes.

OPlot – MasterClass – Combination for ABS Fortaleza on 2023-12-07



Fonte: arquivo pessoal.

No quadro B, destacado em laranja na Figura 22, é possível ver a relação entre a quantidade de decaimentos identificados pelos estudantes e a quantidade esperada dentro do

diretório que eles analisaram. No total, havia 358 eventos que envolviam decaimento em um par de léptons, dos quais os estudantes detectaram corretamente 98. Já para os eventos contendo dois pares de léptons, foram identificados 15 dentre os 28 esperados. Por fim, entre os 165 eventos envolvendo dois fótons, os alunos identificaram corretamente 36. Assim, foram analisados com sucesso 149 eventos.

Esse foi considerado um bom resultado, levando em conta o tempo que os estudantes tiveram para fazer as análises (duas aulas de cinquenta minutos cada) e o fato de que era a primeira vez que eles estavam tendo contato com o programa HYPATIA.

No quadro A, destacado em verde na Figura 22, é possível ver a distribuição de massa invariante para os eventos envolvendo um par de léptons (A1), dois pares de léptons (A2) e um par de fótons (A3). Para interpretar os resultados obtidos, é necessário relembrar os possíveis decaimentos das partículas de interesse no *MasterClass*: bóson Z^0 e de Higgs.

Os decaimentos buscados para o bóson Z^0 eram desta partícula decaindo em um par de léptons (elétron-pósitron ou múon-antimúon). Já para o bóson de Higgs, os decaimentos buscados eram dessa partícula decaindo em dois pares de léptons (elétron-pósitron + elétron-pósitron; múon-antimúon + múon-antimúon ou elétron-pósitron + múon-antimúon) ou em um par de fótons.

Na distribuição de massa invariante, para eventos que envolvem um par de léptons, seria esperado um pico próximo a $91,19 \text{ GeV}/c^2$, pois esta é a massa aproximada do bóson Z^0 . Conforme destacado pela seta azul em A1, esse pico foi observado. Em A1, também foi destacado o pico em torno de $1000 \text{ GeV}/c^2$ (seta verde). Esse pico corresponde a eventos simulados que são inseridos no pacote de dados a fim de verificar se as análises estão sendo feitas seriamente. Portanto, o fato de ter aparecido o pico em $1000 \text{ GeV}/c^2$ indica o comprometimento dos estudantes com as análises.

Nos eventos que envolvem o decaimento em dois pares de léptons ou em um par de fótons, esperava-se pico próximo a $125 \text{ GeV}/c^2$, pois essa é a massa do bóson de Higgs. Como pode ser observado pela seta azul em A2, o pico para o primeiro tipo de decaimento foi observado, contudo, conforme visto em A3, o pico para o segundo tipo de decaimento não foi predominante.

O resultado negativo evidenciado em A3 pode ser explicado pelo fato de o decaimento do bóson de Higgs em um par de fótons ser muito raro, portanto, é possível que fossem necessários mais eventos identificados corretamente como decaimento em par de fótons para que o pico em $125 \text{ GeV}/c^2$ se destacasse.

6.2 Avaliação da UEPS do ponto de vista dos alunos

O último aspecto sequencial de uma UEPS consiste em realizar uma avaliação da própria Unidade de Ensino Potencialmente Significativa. Deve-se conhecer a percepção dos estudantes acerca da aplicação da Unidade de Ensino, a fim de possibilitar mudanças e melhorias na proposta.

A avaliação da UEPS descrita nesse trabalho foi realizada na última aula da eletiva, por meio de um formulário, disponibilizado de forma impressa, que foi respondido por 35 estudantes.

Uma vez que a aplicação da UEPS ocorreu na eletiva de Física Moderna e Contemporânea, onde se lê “eletiva” nas perguntas do formulário, deve-se entender “aplicação da UEPS”.

Portanto, a primeira pergunta feita “De forma geral, você gostou de participar da eletiva?” deve ser interpretada como “De forma geral, você gostou de participar da aplicação da UEPS?”. As possíveis respostas eram “sim”, “não” e “parcialmente”. Como pode ser visto no Quadro 10, a recepção dos estudantes quanto à eletiva foi muito positiva.

Quadro 10 – Respostas dos estudantes para a pergunta “De forma geral, você gostou de participar da eletiva?”

RESPOSTA	QUANTIDADE
SIM	33
PARCIALMENTE	1
NÃO	1
TOTAL	35

Fonte: elaborado pela autora.

Também foi pedido aos alunos que justificassem suas escolhas. Ao ler as justificativas para as respostas “sim”, observou-se que elas podiam ser divididas em quatro categorias gerais: “Inovação”, “Metodologia utilizada”, “Conteúdo estudado” e “Maior aprendizado sobre Física”. O Quadro 11 traz alguns exemplos de cada categoria, bem como as justificativas para as respostas “parcialmente” e “não”.

Quadro 11 – Justificativas das respostas para a pergunta “De forma geral, você gostou de participar da eletiva?”

JUSTIFICATIVAS PARA AS RESPOSTAS “SIM”	
CATEGORIA	EXEMPLO
INOVAÇÃO	“Por que foi uma atividade que eu nunca vi e nem pratiquei, então tive a oportunidade de participar” (estudante I. G.).
METODOLOGIA UTILIZADA	<p>“Foi uma eletiva que saiu daquele padrão de copiar e realmente nos trouxe para um aprofundamento diferenciado nas aulas” (estudante U.Z.).</p> <p>“Foi muito divertida porque ao mesmo tempo que eu consegui absorver os conteúdos eu me diverti bastante com a forma que as matérias foram explicadas” (estudante S.N.).</p>
CONTEÚDO ESTUDADO	<p>“Gostei do conteúdo, do que era falado que adorei, por conta das histórias e do que se tratava os átomos, elétrons, bósons e outros” (estudante I.R.).</p> <p>“Foi muito bom entender mais sobre os átomos, era um assunto em que eu tinha interesse e é super interessante e científico” (estudante A.J.).</p>
MAIOR APRENDIZADO SOBRE FÍSICA	<p>“Consegui aprender um pouco mais sobre a Física, vi pessoas que fizeram a história dentro da Física. Achei bem interessante” (estudante R.A.).</p> <p>“Sim, porque me ajudou a entender mais sobre a física moderna” (estudante E.B.).</p>
JUSTIFICATIVA PARA RESPOSTA “PARCIALMENTE”	
“Gostei mas não muito porque não era uma coisa/matéria que eu gostei muito” (estudante M.A.).	
JUSTIFICATIVA PARA RESPOSTA “NÃO”	
“Porque não me dou com física” (estudante L.B.).	

Fonte: elaborado pela autora.

A segunda pergunta feita no formulário foi “O que você mais gostou na eletiva?”. A maior parte das respostas esteve associada com as atividades que foram realizadas, com destaque para o *MaterClass*, que foi citado diretamente em onze respostas entre as 35 totais. Também foram citados os conteúdos estudados e uma identificação positiva com a professora. Veja alguns exemplos de respostas no Quadro 12.

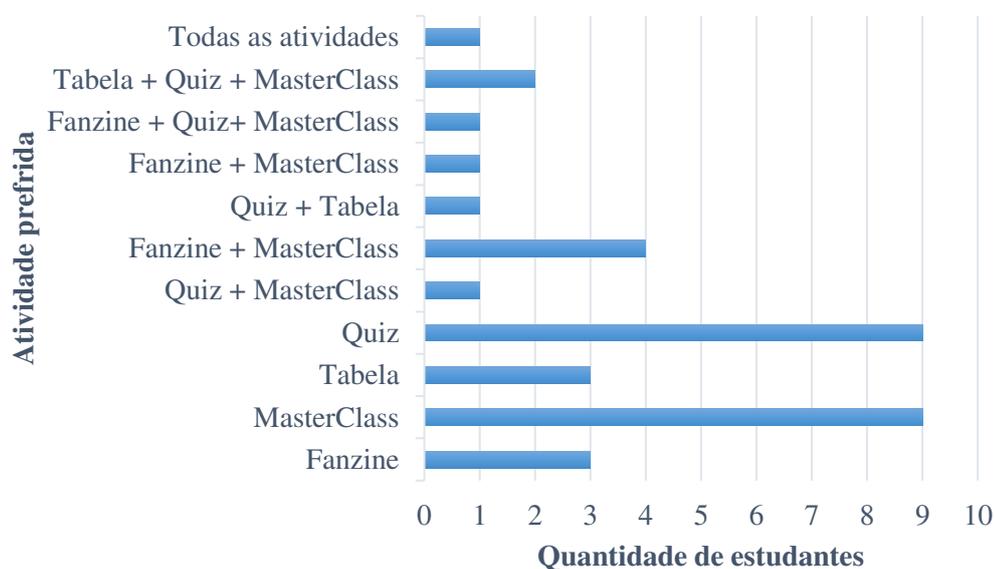
Quadro 12 – Exemplos de respostas para a pergunta “O que você mais gostou na eletiva”?

CATEGORIA	EXEMPLO DE RESPOSTA
<p style="text-align: center;">ATIVIDADES REALIZADAS</p>	<p style="text-align: center;">“Gostei do método das aulas foi divertido e muito prático, me motivava a querer saber mais sobre os temas da eletiva” (estudante A.J.).</p> <p style="text-align: center;">“Das interações, também do conteúdo sobre os átomos, além das atividades que foram fundamentais para o meu aprendizado” (Estudante I.R.).</p> <p style="text-align: center;">“O <i>MasterClass</i> com certeza. Também gostei da forma como os conteúdos foram explicados” (estudante S.N.).</p>
<p style="text-align: center;">CONTEÚDOS ESTUDADOS</p>	<p style="text-align: center;">“Conceitos de física moderna” (Estudante L.E.).</p> <p style="text-align: center;">“Os slides e as histórias legais que a prof contava” (Estudante B.V.).</p>
<p style="text-align: center;">IDENTIFICAÇÃO POSITIVA COM A PROFESSORA</p>	<p style="text-align: center;">“Porque a professora Larissa é gente boa e ensina bem” (Estudante F.R.).</p> <p style="text-align: center;">“Da prof Larissa e sua paciência” (estudante L.V.).</p>

Fonte: elaborado pela autora.

Complementando, foi pedido que os alunos marcassem a atividade que mais gostaram de realizar entre “Fanzine”, “Quiz Modelos Atômicos”, “Tabela do Modelo Padrão” e “*MasterClass* – análise dos dados do ATLAS”, e que justificassem sua escolha. A ideia era que eles escolhessem apenas uma atividade, contudo, houve estudantes que marcaram mais de uma opção. Veja o Gráfico 2.

Gráfico 2 – Respostas para a pergunta “Que atividade você mais gostou de fazer?”.



Fonte: elaborado pela autora.

A partir do Gráfico 2 é possível ver que o Quiz e o *MasterClass* foram as atividades mais apreciadas pelos alunos, o que justifica o recorte de análise feito na seção “6.1 Avaliação das produções dos estudantes”.

Sobre o Quiz, algumas das justificativas para escolha foram:

Estudante U.Z. “Foi onde fiquei mais animado porque é muita adrenalina e porque eu fiz com uma pessoa que eu gosto muito e os presentes (chocolate)”;

Estudante L.V. “Quiz modelos atômicos, porque foi algo que estudei e me ajudou na minha aula de química”;

Estudante M.C.T. “Porque eu achei bem divertido responder às perguntas e interessante”.

Em relação à escolha do *MasterClass* como atividade preferida, os alunos relataram:

Estudante W.S. “Porque conversamos com a pesquisadora do ATLAS”;

Estudante S.N. “Me achei a maior física e aprendi sobre coisas que eu não tinha conhecimento”;

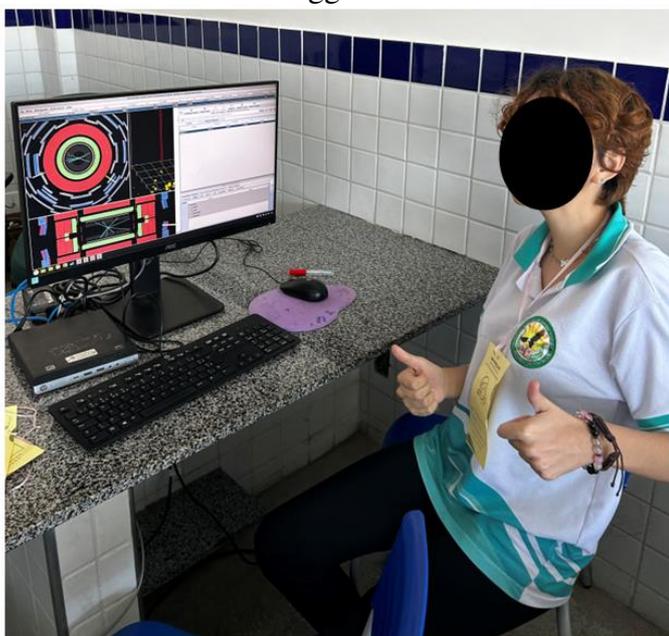
Estudante D.T. “Fizemos coisas que os profissionais fazem”;

Estudante M.C. “Eu gostei mais do *MasterClass*, foi onde a gente pode colocar em prática o que aprendemos”.

A partir do exposto, é possível perceber que essas duas atividades destacaram o protagonismo dos estudantes e tornaram o ato de aprender Física mais prazeroso. Além de terem conseguido fazer conexões entre o que estavam aprendendo na eletiva com o que estavam vendo em outras disciplinas, os alunos sentiram-se importantes na realização dessas tarefas.

Esse sentimento de importância evidenciou-se, por exemplo, quando uma das estudantes encontrou um evento candidato a bóson de Higgs decaindo em dois fótons e pediu para que isso fosse registrado em uma foto, mostrada na Figura 23. Os alunos haviam sido informados que esse era um evento muito raro, portanto, a aluna demonstrou bastante empolgação por ter conseguido detectá-lo.

Figura 23 – Estudante mostrando detecção de evento candidato a bóson de Higgs decaindo em dois fótons.



Fonte: arquivo pessoal.

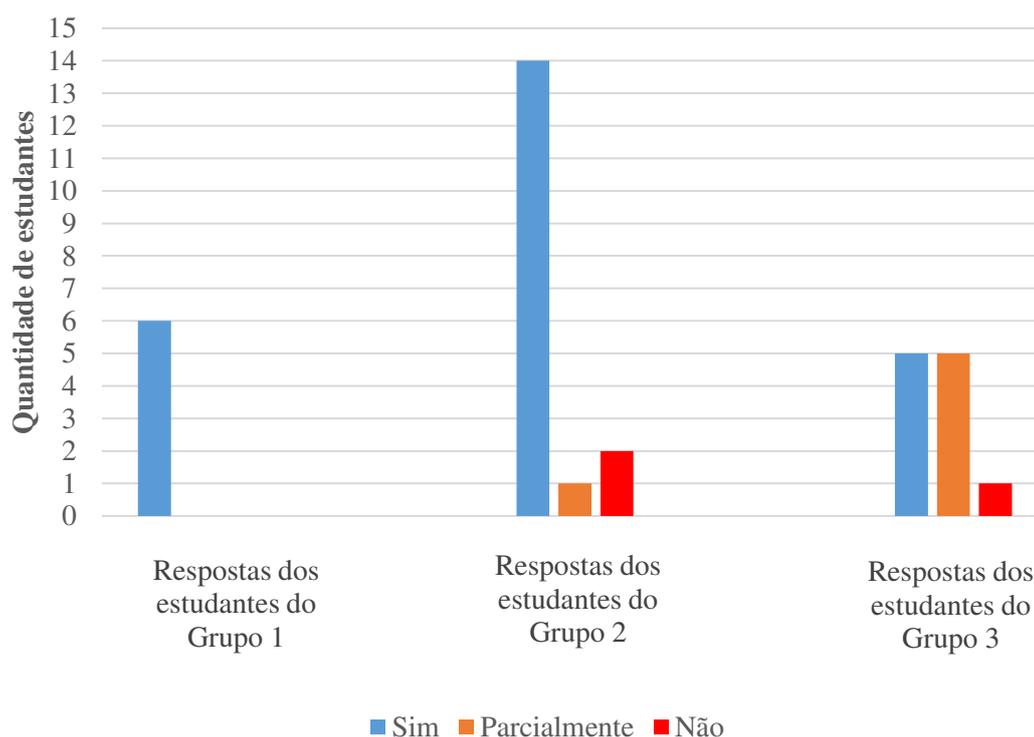
Quando questionados se havia algo que eles não gostaram na eletiva e que poderia ser diferente das próximas vezes, a maior parte dos alunos afirmou que gostou da eletiva do jeito que foi desenvolvida. Contudo, houve algumas sugestões de melhoria, por exemplo, diminuir a quantidade de atividades e conteúdos, além de promover mais aulas práticas e visitas a laboratórios de física, se possível.

Um dos objetivos da aplicação do Produto Educacional era contribuir para que os estudantes se sentissem mais motivados a estudar Física. As duas próximas perguntas do formulário estiveram associadas à verificação do alcance ou não desse objetivo. A primeira pergunta foi “Antes de participar da eletiva, você se interessava por Física?”, para a qual os alunos podiam responder “sim”, “parcialmente” e “não”, justificando sua escolha. As respostas

a essa pergunta possibilitaram a separação dos alunos em três grupos: **Grupo 1** – interessavam-se por Física antes da eletiva (seis estudantes); **Grupo 2** – interessavam-se parcialmente por Física antes da eletiva (dezessete estudantes); **Grupo 3** – não se interessavam por Física antes da eletiva (onze estudantes).

A segunda pergunta foi “Participar da eletiva fez você se interessar mais por Física?”, com opções de respostas “sim”, “parcialmente” e “não”. Mais uma vez, pediu-se que os estudantes justificassem suas escolhas. Optou-se por sintetizar as respostas para a segunda pergunta conforme apresentado no Gráfico 3, a fim de compreender melhor a influência que a experiência de participar da eletiva exerceu no interesse por estudar Física dos alunos de cada um dos três grupos apresentados no parágrafo anterior. Destaca-se que o total de respostas é 34, e não 35, porque um dos estudantes não respondeu às duas perguntas.

Gráfico 3 – Respostas para a pergunta “Participar da eletiva fez você se interessar mais por Física?”.



Fonte: elaborado pela autora.

Analisando o Gráfico 3, é possível afirmar que houve uma associação positiva entre a participação na eletiva e o aumento do interesse dos alunos em estudar Física para a maioria dos estudantes. Todos os alunos que já se interessavam por Física afirmaram que participar da eletiva os fez se interessarem mais por essa disciplina.

Entre as justificativas apresentadas, destaca-se a da estudante A.J., mostrada no Quadro 13.

Quadro 13 – Resposta e justificativa da aluna A.J.

PERGUNTA	RESPOSTA E JUSTIFICATIVA
Antes de participar da eletiva, você se interessava por Física?	Sim. “Sempre senti interesse em Física, principalmente quântica, apesar de não ter nenhum domínio sobre, eu adoraria estudar mais sobre”.
Participar da eletiva fez você se interessar mais por Física?	Sim. “A eletiva me ensinou mais sobre física e me motivou a querer aprender e entender mais sobre”.

Fonte: elaborado pela autora.

Entre os que se interessavam parcialmente, a maioria afirmou que participar da eletiva aumentou seu interesse em estudar Física, fato representado no Quadro 14.

Quadro 14 – Respostas e justificativas das estudantes G.S. e L.V.

PERGUNTA	RESPOSTA E JUSTIFICATIVA ESTUDANTE G.S.:	RESPOSTA E JUSTIFICATIVA ESTUDANTE L.V.:
Antes de participar da eletiva, você se interessava por Física?	Parcialmente. “Antes eu tinha um pouco de interesse e foi esse interesse que me fez escolher essa eletiva”.	Parcialmente. “Não muito, pois não estudava nada sobre física no meu ensino fundamental”
Participar da eletiva fez você se interessar mais por Física?	Sim. “Sim, eu já tinha um certo interesse em física e com a eletiva eu pude aprender mais além das aulas de física normais”.	Sim. “Sim! A eletiva de física moderna e contemporânea tem me interessado por abordar temas mais atuais, pude explorar os avanços científicos”.

Fonte: elaborado pela autora.

Contudo, para as estudantes B.F. e F.R., que também já se interessavam parcialmente, a participação na eletiva não foi relevante para que se interessassem mais por Física, conforme pode ser verificado nas justificativas apresentadas por elas no Quadro 15.

Quadro 15 – Justificativas das estudantes B.F. e F.R.

PERGUNTA	RESPOSTA E JUSTIFICATIVA ESTUDANTE B.F.:	RESPOSTA E JUSTIFICATIVA ESTUDANTE F.R.:
Antes de participar da eletiva, você se interessava por Física?	Parcialmente. “Mais ou menos, porque eu achava um pouco interessante”.	Parcialmente. “É uma matéria que eu não entendo muito”.
Participar da eletiva fez você se interessar mais por Física?	Não. “Por mais que seja legal é muito difícil algumas partes”.	Não. “Não, porque é tediante (sic) de aprender”.

Fonte: elaborado pela autora.

Por fim, havia os alunos que não se interessavam por Física antes de participar da eletiva. Entre esse público, apenas um estudante relatou que a eletiva não o fez se interessar por Física, nem parcialmente. Porém, esse aluno não apresentou justificativas.

Para os demais casos, onde houve aumento parcial ou integral no interesse. O Quadro 16 destaca algumas justificativas.

Quadro 16 – Justificativas de alunos que aumentaram seu interesse em estudar Física após a eletiva.

PERGUNTA	RESPOSTA E JUSTIFICATIVA ESTUDANTE I.R.:	RESPOSTA E JUSTIFICATIVA ESTUDANTE B.A.:
Antes de participar da eletiva, você se interessava por Física?	Não. “Não me importava muito com a matéria, não tinha interesse ou vontade de estudar sobre”.	Não. “Eu achava difícil”.
Participar da eletiva fez você se interessar mais por Física?	Sim. “Comecei a ver a física como algo que eu deveria dar valor e chance para conhecer e estudar. Gostei das histórias contadas, seja das partículas e dos cientistas”.	Parcialmente. “Eu acho interessante, mas os cálculos de física são muito complicados”.

Fonte: elaborado pela autora.

Diante das respostas expostas, foi possível concluir que o objetivo inicial de incentivar os estudantes a sentirem mais vontade de estudar Física foi alcançado. Além disso, houve um aumento no conhecimento dos estudantes sobre o tema estudado, além de um

interesse em saber um pouco mais sobre fenômenos de física envolvidos no cotidiano e sobre novas tecnologias.

A última pergunta do formulário questionava se a professora havia demonstrado domínio de conteúdo e clareza na abordagem dos conceitos. Todos os estudantes marcaram que sim. Nas justificativas para as respostas, destacaram a forma de explicar os conteúdos, inclusive com a utilização de analogias nos momentos de abordar assuntos mais complexos, e a orientação durante as atividades.

Por fim, foi deixado um espaço para que os alunos compartilhassem comentários acerca de sua participação na eletiva. De forma geral, os comentários foram positivos, como pode ser visto nas respostas de alguns estudantes:

Estudante U.Z.: “Eu achava que ia ser mais uma eletiva entediante, mas me surpreendeu e me fez usar minha cabeça e habilidades”.

Estudante A.J.: “Foi muito bom! Acho que foi a melhor eletiva que tive no ano inteiro”.

Estudante S.N.: “Muito massa! Me fez ter maior interesse em física! Aprendi várias coisas sobre mecânica quântica”.

Alguns discentes relataram que a experiência foi cansativa e difícil, pois muitas atividades foram realizadas. Contudo, mesmo esses alunos afirmaram que gostaram de participar da eletiva.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral deste trabalho era construir uma proposta pedagógica que proporcionasse a inserção de tópicos de Física Contemporânea no Ensino Médio. Esperava-se que a aplicação dessa proposta contribuísse para que os estudantes se sentissem mais motivados a estudar Física. Esse objetivo foi definido tendo em vista duas problemáticas centrais quanto ao Ensino de Física na educação contemporânea: sua desatualização em termos de conteúdo e tecnologia e sua centralização na figura do professor e na preparação para provas (Moreira, 2017). Essas problemáticas acabam contribuindo para que muitos estudantes enxerguem a Física como uma disciplina cansativa e difícil.

Para que o objetivo geral fosse alcançado, foram definidos cinco objetivos específicos. O primeiro deles foi selecionar o tema específico de Física Contemporânea a ser trabalhado. Tendo em vista a primeira problemática apresentada no parágrafo anterior, escolheu-se a Física de Partículas como tema gerador da proposta pedagógica. Tal escolha justifica-se, pois, por meio desse tema, é possível apresentar a Física como uma ciência viva e dinâmica ao trabalhar-se o desenvolvimento dos modelos atômicos, desde as concepções gregas até a proposição do Modelo Padrão de Partículas. Além disso, os estudos realizados na área da detecção de partículas subatômicas levaram ao desenvolvimento de várias tecnologias que podem ser abordadas com os estudantes, por exemplo, por meio da realização do *MasterClass* em Física de Partículas. Assim, considerou-se que o primeiro objetivo específico foi alcançado com sucesso.

O segundo objetivo específico foi definir o referencial teórico-pedagógico norteador da proposta pedagógica. Considerando-se a segunda problemática apresentada no primeiro parágrafo, o referencial teórico-pedagógico adotado para o desenvolvimento da proposta foi o da Aprendizagem Significativa Crítica. Portanto, elaborou-se uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) sobre o tema Física de Partículas, de acordo com o aspecto sequencial apresentado por Moreira (2011). Essa UEPS foi incorporada ao Produto Educacional, que também contém os materiais necessários para sua implementação em sala de aula. Desse modo, o segundo objetivo específico também foi alcançado.

Dando continuidade, o terceiro objetivo específico, desenvolver o produto educacional, incorporando a ele uma UEPS, também foi alcançado. O produto Educacional foi organizado no formato de uma cartilha, contendo tanto uma descrição detalhada da UEPS, quanto os materiais necessários para sua implementação em sala de aula. Na descrição da

UEPS, os professores que tenham interesse em utilizar o produto em suas aulas encontrarão o número de aulas necessárias, o objetivo e a descrição de cada etapa dos aspectos sequenciais da UEPS desenvolvida. Os materiais apresentados no produto consistem em orientações para os professores e atividades a serem realizadas pelos estudantes em cada aula.

O quarto objetivo específico definido foi implementar o Produto Educacional e apresentar os resultados obtidos a partir de sua aplicação. Conforme descrito ao longo deste trabalho, o Produto Educacional foi satisfatoriamente implementado na disciplina eletiva de Física Moderna e Contemporânea, que contou com a participação de estudantes da primeira série do Ensino Médio de uma escola da rede pública do Ceará. Uma vez que os estudantes produziram bastante durante a eletiva, que teve duração de um semestre, foi feito um recorte na apresentação dos resultados, tendo sido selecionadas as duas atividades nas quais os estudantes demonstraram maior engajamento: realização de um quiz sobre Modelos Atômicos e de um *MasterClass* em Física de Partículas. Essas atividades trouxeram resultados positivos tanto em relação ao conhecimento adquirido pelos alunos quanto em relação ao protagonismo desenvolvido por eles, facilitando sua aprendizagem significativa crítica.

O quinto e último objetivo específico foi avaliar se houve mudança na motivação para estudar Física entre os estudantes que participaram da aplicação do Produto Educacional. Na última aula, os alunos responderam a um questionário, o qual continha, entre outras perguntas, os seguintes questionamentos: “Antes de participar da eletiva, você se interessava por Física?” e “Participar da eletiva fez você se interessar mais por Física?”. A análise das respostas revelou que os estudantes que já se interessavam por Física antes continuaram a se interessar depois de sua participação na eletiva. Já entre os dezessete alunos que se interessavam parcialmente, catorze sentiram-se mais motivados a estudar Física após sua participação. Por fim, entre os onze alunos que relataram não se interessar por Física antes de participar da eletiva, dez sentiram-se mais motivados, ainda que parcialmente, a estudar Física após sua participação. Assim, é possível concluir que houve sim uma associação positiva entre a participação na eletiva e o aumento do interesse dos alunos em estudar Física para a maioria dos estudantes.

A partir do exposto, considera-se que o objetivo central do trabalho foi alcançado, pois a proposta pedagógica foi elaborada, resultando na construção do Produto Educacional, agora disponível para outros professores que desejem utilizar com seus estudantes. As atividades desenvolvidas por meio da implementação desse Produto possibilitaram o contato dos estudantes com um tema de Física Contemporânea, o favorecimento da aprendizagem significativa crítica sobre Física de Partículas, o desenvolvimento do protagonismo dos estudantes e o aumento do interesse em estudar Física para a maioria dos alunos. Sabe-se que

ainda há melhorias e ajustes a serem realizados no material, porém, os resultados positivos obtidos a partir da aplicação do Produto Educacional indicam que ele constitui um material potencialmente significativo para o ensino de Física de Partículas. Destaca-se também que, apesar de o Produto ter sido pensado para um semestre de aulas, ele está dividido em três Unidades, que podem ser trabalhadas separadamente, de acordo com a realidade de cada escola.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, M. C. B. **O discreto charme das Partículas Elementares**. São Paulo: Editora UNESP, 2006.

AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. Ernest Lawrence and the Cyclotron. Disponível em: <https://history.aip.org/exhibits/lawrence/larger-image-page/epa-20.htm>. Acesso em: 27 nov. 2024.

ANDERSON, C. D. The Positive Electron. **Phys. Rev.**, [s.l.], v. 43, n. 6, p. 491–494, 1933.

ATLAS EXPERIMENT. The Collaboration. Disponível em: <https://atlas.cern/Discover/Collaboration>. Acesso em: 13 out. 2023.

ATLAS EXPERIMENT. Detector & Technology. Disponível em: <https://atlas.cern/Discover/Detector>. Acesso em: 13 out. 2023.

ATLAS EXPERIMENT. The Inner Detector. Disponível em: <https://atlas.cern/Discover/Detector/Inner-Detector>. Acesso em: 13 out. 2023.

ATLAS EXPERIMENT. Calorimeter. Disponível em: <https://atlas.cern/Discover/Detector/Calorimeter>. Acesso em: 13 out. 2023.

ATLAS EXPERIMENT. Muon Spectrometer. Disponível em: <https://atlas.cern/Discover/Detector/Muon-Spectrometer>. Acesso em: 13 out. 2023.

AUSUBEL, D. P. **The Acquisition and Retention of Knowledge: a cognitive view**. 1. ed. [S.l.]: Springer Dordrecht, 2000.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**, 2008. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf. Acesso em: 13 set. 2023.

CALISPHERE - UNIVERSITY OF CALIFORNIA. Berkeley campus. The bevatron, pictured in 1965 shortly before major modifications. The bevatron, built with AEC funds, has been a world center for study in high-energy and nuclear physics — Calisphere. Disponível em: <https://calisphere.org/item/ark:/13030/kt509nc664/>. Acesso em: 19 dez. 2023.

CARUSO, F. O milho e a pérola: a desco-berta do pósitron e a moral da fábula. **Partículas Elementares: 100 Anos de Descobertas**. São Paulo: Livraria da Física, 2012. p.111–124, 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/344637677>. Acesso em: 19 dez. 2023.

CERN. **LHC - The guide**. Education, Communications and Outreach Group, 2021. Disponível em: <https://cds.cern.ch/record/2809109/files/CERN-Brochure-2021-004-Eng.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2023.

- CERN. What's so special about the Higgs boson? | CERN. Disponível em: <https://home.cern/science/physics/higgs-boson/what>. Acesso em: 10 dez. 2023.
- CNPEM. Introdução aos aceleradores de partículas - Fernando Sá - YouTube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=m619-e6Gu80&list=PLnPmowNFDTCBIAQ3f6D0Yp8AOs6UqVPwf&index=5>. Acesso em: 19 dez. 2023a.
- CNPEM. Radiação eletromagnética: O que é? Para que serve? Como usar? - Júlio Cezar - YouTube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=G5RKRLRBna8&list=PLnPmowNFDTCBIAQ3f6D0Yp8AOs6UqVPwf&index=5>. Acesso em: 19 dez. 2023b.
- DIVULGAÇÃO/CNPEM. Sirius, o acelerador de partículas brasileiro. Disponível em: https://i0.wp.com/s2.glbimg.com/TLE0-1-pt8deHb6t-krC-M2G938=/620x466/e.glbimg.com/og/ed/f/original/2020/11/19/aerea_sirius_fev20_creditos_divulgacao_cnpem.jpg?resize=620%2C466&ssl=1. Acesso em: 26 dez. 2023.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica**: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas. Rio de Janeiro: Editora CAMPUS, 1979.
- FERREIRA, É. G. B.; DAMASIO, F.; RODRIGUES, A. A. Física Moderna e Contemporânea no ensino fundamental articulada com conceitos de Física Clássica por meio de unidades de ensino potencialmente significativas (UEPS). **Aprendizagem Significativa em Revista**, [s.l.], v. 4, n. 1, p. 29–40, 2014.
- FERREIRA, I. S. **Um ensemble de redes neurais especialistas para classificar sinal no canal $WH \rightarrow l\nu b\bar{b}$** . 2019. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Física) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- FÍSICA PARA UNIVERSIDADE E CONCURSOS. Minicurso 7 (Parte 1): MasterClass - Física de Partículas - YouTube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Z6zwuEYSa-s>. Acesso em: 19 mai. 2023.
- GOMES, R. R. **O modelo padrão no ensino médio**: um tratamento elementar. 2017. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2017.
- GOWIN, D. B. **Educating**. [S.l.]: Cornell University Press, 1981.
- GRIFFITHS, D. J. **Introduction to electrodynamics**. 3. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1999.
- KANE, G. The dawn of physics beyond the standard model. **Scientific American**, p. 68–75, 2003.
- LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON. Como funciona o Sirius? Disponível em: <https://lnls.cnpem.br/sirius/como-funciona-o-sirius/>. Acesso em: 26 dez. 2023.
- LATTES, C. M. G.; MUIRHEAD, H.; OCCHIALINI, G. P. S.; POWELL, C. F. Processes involving charged mesons. **Nature**, [s.l.], v. 159, p. 694–697, 1947.

MONTEIRO, M. A.; NARDI, R.; BASTOS FILHO, J. B. A sistemática incompreensão da Teoria Quântica e as dificuldades dos professores na introdução da Física Moderna e Contemporânea no ensino médio. **Ciência & Educação**, [s.l.], v. 3, p. 557–580, 2009.

MOREIRA, M. A. **Linguagem e aprendizagem significativa**. Disponível em: www.if.ufrgs.br/~moreira. Acesso em: 15 set. 2023.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa subversiva. **Periódico do Mestrado em Educação da UCDB**, [s.l.], v. 21, p. 15–32, 2006.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem Significativa**: da visão clássica à visão crítica. Disponível em: www.if.ufrgs.br/~moreira. Acesso em: 15 set. 2023.

MOREIRA, M. A. O modelo padrão da física de partículas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s.l.], v. 31, n. 1, 2009.

MOREIRA, M. A. Unidades de enseñanza potencialmente significativas-UEPS. **Aprendizagem Significativa em Revista**, [s.l.], v. 1, n. 2, p. 43–63, 2011. Disponível em: <http://moreira.if.ufrgs.br>. Acesso em: 15 set. 2023.

MOREIRA, M. A. Grandes desafios para o ensino da Física na educação contemporânea. **Revista do Professor de Física**, Brasília, v. 1, p. 1–13, 2017.

NEWTON, I. **ÓPTICA**. 1. ed. São Paulo: EDUSP, 2002.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no ensino médio”. **Investigações Em Ensino De Ciências**, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 23–48, 2000.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Atualização do currículo de Física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. **Cat.Ens.Fís.**, [s.l.], v. 18, n. 2, p. 135–151, 2001.

PAULO NETO, J. G. P.; OLIVEIRA, A. N.; SIQUEIRA, M. C. A. Análise dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea presentes em quatro coleções de livros didáticos aprovadas no PNLEM 2009 e nos PNLDS 2012, 2015 e 2018. **Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFRS**, [s.l.], v. 6, p. 79–103, 2019.

PAULO, I. J. C. DE; MOREIRA, M. A. O problema da linguagem e o ensino da Mecânica Quântica no nível médio. **Ciência & Educação**, [s.l.], v. 17, n. 2, p. 421–434, 2011.

PEDUZZI, L. O. Q. **Do átomo grego ao átomo de Bohr**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

PEDUZZI, L. O. Q. **Do próton de Rutherford aos quarks de Gell-Mann, Nambu...** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

PEIXOTO, A. A experiência ATLAS. 14ª Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa. **Anais...**, 2022. Meyrin. Disponível em:

https://indico.cern.ch/event/1087844/contributions/5007569/attachments/2504870/4303693/IntroducaoATLAS_PTLTP_AnaPeixoto_08092022.pdf. Acesso em: 10 dez. 2023.

REIS, A. C. DOS. **Partículas para todos**. [S.l.: s.n.], 2021. E-book. Disponível em: <https://mesonpi.cbpf.br/arquivos/livros/ParticulasParaTodos.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2023.

ROSE, J. POPULAR INFORMATION - The 2013 Nobel Prize in Physics. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2013/press-release/>. Acesso em: 10 dez. 2023.

ROSENFELD, R. Os 10 anos da detecção do bóson de Higgs: passado, presente e futuro. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s.l.], v. 44, 2022.

SCHITTLER, D.; MOREIRA, M. A. Física Moderna e Contemporânea no primeiro ano do Ensino Médio: laser de rubi um exemplo de unidade de ensino potencialmente significativa. **Ens. Ci. Tecnol**, [s.l.], v. 9, n. 3, p. 1–24, 2016. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbect>. Acesso em: 15 set. 2023.

SEGRÈ, E. **Dos raios x aos quarks: físicos modernos e suas descobertas**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1987.

SILVA FILHO, O. L.; FERREIRA, M. Teorias da aprendizagem e da educação como referenciais em práticas de ensino: Ausubel e Lipman. **Revista do Professor de Física**, Brasília, v. 2, n. 2, 2018.

SILVA, J. R. N. DA; ARENGHI, L. E. B.; LINO, A. Porque inserir física moderna e contemporânea no ensino médio? Uma revisão das justificativas dos trabalhos acadêmicos. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 69–83, 2013.

SORIA, A. F. **Física nuclear y de partículas**. 3. ed. [S.l.]: Publicacions de la Universitat de València, 2015.

SOUZA, M. G. DE; ANDRADE NETO, A. S. DE. Uma investigação acerca das concepções sobre a natureza da ciência de alunos do Ensino Médio após ensino combinado da epistemologia de Laudan e de problemas em aberto de Física Contemporânea dentro de UEPS. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática**, [s.l.], v. 3, n. 2, p. 441–446, 2020.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. **Cat.Ens.Fís**, [s.l.], v. 9, n. 3, p. 209–214, 1992.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física III: eletromagnetismo**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

ZANETTE, T. P. **O ensino de Física de Partículas por meio da vida e obra do físico brasileiro César Lattes**, 2021. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2021.

ZHANG, C. Synchrotron. **Handbook of Accelerator Physics and Engineering**. 3ª ed., 2023. World Scientific .

APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 43

Larissa de Sousa Oliveira

PRODUTO EDUCACIONAL

INVESTIGANDO O GRANDE MUNDO DAS PESQUENAS PARTÍCULAS

Fortaleza
2024



INVESTIGANDO O GRANDE MUNDO DAS PEQUENAS PARTÍCULAS

Autora: Larissa de Sousa Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Fernando W. A. Sobreira

Seção 1	A Unidade de Ensino Potencialmente Significativa	1
Seção 2	Unidade 1: Modelos Atômicos	7
	Orientações gerais para o professor	8
	Capítulo 1: Materiais modelos atômicos de Dalton e Thomson	14
	1.1. Material estação modelo de Dalton	14
	1.2. Material estação modelo de Thomson	17
	Capítulo 2: Materiais modelo atômico de Rutherford	19
	2.1. Atividade para integrante 1 da dupla	19
	2.2. Atividade para integrante 2 da dupla	21
	2.3 Atividade de meta coletiva	23
	Capítulo 3: Materiais modelo atômico de Bohr	24
	3.1. Atividade para integrante 1 do trio	24
	3.2. Atividade para integrante 2 do trio	27
	3.3. Atividade para integrante 3 do trio	29
	3.4. Atividade de meta coletiva	32
	Referências bibliográficas – Unidade 1	33
	Unidade 2: O Modelo Padrão	34
	Orientações gerais para o professor	35
	Referências bibliográficas – Unidade 2	39
	Unidade 3: Manual do <i>MasterClass</i>	40
	Orientações gerais para o professor	41
	Orientações gerais para os estudantes	46
	Capítulo 4: O modelo padrão das partículas elementares	47

Capítulo 5: Conhecendo o bóson Z	48
Capítulo 6: Conhecendo o bóson de Higgs	49
Capítulo 7: O detector ATLAS	50
Capítulo 8: Visualizando acontecimentos	53
8.1. HYPATIA: <i>canvas window</i>	54
Capítulo 9: As “pegadas” das partículas nos detectores	55
9.1. Elétron e pósitron	55
9.2. Fótons	58
9.3. Múons	60
Referências bibliográficas – Unidade 3	62

SEÇÃO 1

A UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA



Fonte: arquivo pessoal.

INVESTIGANDO O GRANDE MUNDO DAS PEQUENAS PARTÍCULAS

Tópico específico a ser abordado: Física de Partículas – Modelos Atômicos e Modelo Padrão das Partículas Elementares.

Objetivo: ensinar Física de Partículas, abordando desde como os constituintes da matéria elementar estão organizados até técnicas para realizar a detecção desses constituintes, visando a contribuir para que tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) estejam mais presentes no Ensino Médio.

Aspectos Sequenciais da UEPS:

1. Situação inicial:

Número de aulas para aplicação: 1 aula, 50 minutos.

Objetivo desta etapa: apresentar aos estudantes o tópico específico que será trabalhado na UEPS.

Descrição: Nessa etapa, o professor pode utilizar a série *The Big Bang Theory* e o personagem fictício Sheldon Cooper como ponto de partida para uma discussão sobre o que é a Física de Partículas e o que ela estuda. Pedem-se aos estudantes que pensem em respostas para duas perguntas “1) Do que o Universo é feito?” e “2) O que é elementar?”. Em seguida, mostra-se aos alunos uma foto da tabela periódica dos elementos químicos e é perguntado se eles reconhecem e sabem o que é essa imagem; faz-se o mesmo com a Tabela do Modelo Padrão, repetindo-se a pergunta. A situação inicial deve ser conduzida de forma dialogada com os estudantes, sem necessariamente chegar a respostas corretas para os questionamentos.

2. Situações-problema:

Número de aulas para aplicação: 1 aula, 50 minutos.

Objetivo desta etapa: propor situações que levem o aluno a compartilhar os conhecimentos prévios relevantes para o aprendizado do tópico definido.

Descrição: entregar aos estudantes um material contendo sete perguntas, a saber:

- 1) Você já parou para pensar na seguinte pergunta: “do que o Universo é feito”?
- 2) Caso nunca tenha pensado na pergunta acima, pense um pouco agora e responda: Do que você acha que o Universo é feito? Caso já tenha pensado no assunto, coloque abaixo sua resposta para essa pergunta.
- 3) Você sabe o que é um átomo? Explique com suas palavras.
- 4) Como você representaria um átomo?

5) Você já ouviu falar de modelos atômicos? Quais modelos atômicos você conhece? Fale um pouco sobre cada um.

6) Você sabe o que é uma partícula elementar? Explique com suas palavras e dê um exemplo.

7) Existem partículas tão pequenas que o nosso olho não consegue enxergar. Pensando nisso, você sabe como os cientistas descobrem uma nova partícula? Fale um pouco sobre isso.

Cada estudante deve responder a atividade sem realizar pesquisa em materiais impressos ou digitais e entregá-la ao professor ao final da aula. É permitido que os estudantes discutam em pequenos grupos acerca dos questionamentos, desde que cada um entregue sua atividade de forma individual para o professor.

3. Apresentando o conhecimento:

Número de aulas para aplicação: 16 aulas, 800 minutos.

Objetivo desta etapa: iniciar o estudo das partículas subatômicas, por meio da evolução das teorias acerca da estrutura da matéria, passando pelos Modelos Atômicos até chegar ao Modelo Padrão das Partículas Elementares.

Descrição: Essa etapa pode ser dividida em dois blocos principais. No primeiro, o professor trabalha com os estudantes a evolução dos Modelos Atômicos, iniciando pelas ideias gregas até o Modelo Atômico atual, baseado na Mecânica Quântica. As partículas subatômicas apresentadas nesse bloco são o elétron, o próton e o fóton. Ao final, os estudantes serão avaliados por meio da produção de Fanzines com o tema “Modelos atômicos” e da participação em um quiz sobre o mesmo tema. A sequência de aulas sugeridas, os materiais utilizados, bem como as instruções sobre a produção de fanzines e as perguntas feitas no quiz encontram-se na **Unidade 1** desse produto. No segundo bloco, serão trabalhadas a existência e a importância de outras partículas subatômicas, além do elétron, do próton e do fóton. Trabalha-se também o significado de “elementar” no contexto da Física de Partículas, e como as partículas elementares estão organizadas no Modelo Padrão. Para consolidação desse bloco, os estudantes devem construir e apresentar uma Tabela do Modelo Padrão, a ser fixada na parede da sala de aula. Os materiais utilizados, bem como as instruções sobre a produção da Tabela encontram-se na **Unidade 2** deste produto.

4. Nova situação-problema, em nível mais alto de complexidade:

Número de aulas para aplicação: 5 aulas, 250 minutos.

Objetivo desta etapa: realização de um *MasterClass* de Física de Partículas.

Descrição: nessa etapa, os estudantes irão conhecer formas de detectar partículas subatômicas e terão a oportunidade de procurar os bósons Z^0 e de Higgs a partir de dados de colisões reais obtidos pelo experimento ATLAS, detector de partículas localizado no LHC, no CERN. A sequência de aulas sugeridas, os materiais utilizados e as instruções sobre a realização do *MasterClass* encontram-se na **Unidade 3** desse produto.

5. Aula expositiva dialogada integradora final:

Número de aulas para a aplicação: 1 aula, 50 minutos.

Objetivo desta etapa: dar seguimento ao processo de diferenciação progressiva e retomar as características mais relevantes sob uma perspectiva integradora.

Descrição: nessa etapa, o professor deve retomar o conteúdo da UEPS e apresentar aos estudantes os resultados obtidos por eles a partir das análises do *MasterClass*. No Produto, as orientações para realização desse momento foram incluídas na **Unidade 3**.

6. Avaliação somativa individual:

Número de aulas para aplicação: 1 aula, 50 minutos.

Objetivo desta etapa: propor questões que evidenciem a captação de significados acerca do tópico pelos estudantes.

Descrição: os estudantes responderão, de forma individual, oito questões abertas acerca dos conteúdos estudados na UEPS. São elas:

- 1) Quais modelos atômicos você estudou? Explique cada um deles.
- 2) Qual o modelo atômico que explica a estrutura do átomo atualmente? Explique esse modelo.
- 3) O que é uma partícula elementar? Cite exemplos.
- 4) Todas as partículas subatômicas são elementares? Justifique.
- 5) As partículas elementares podem ser organizadas em léptons, quarks e bósons de acordo com um Modelo Padrão de Partículas. Escreva um pouco sobre os léptons, os quarks e os bósons e cite pelo menos um exemplo de cada grupo.
“Na atividade *MasterClass* você aprendeu de onde vêm as partículas subatômicas e como detectá-las. Também aprendeu a analisar os dados do detector ATLAS, localizado no CERN, para procurar os bósons Z^0 e Higgs. Portanto, responda:”
- 6) De onde podem vir as partículas subatômicas estudadas nos centros de pesquisas?
- 7) Como as partículas subatômicas podem ser detectadas?
- 8) Como você fez a identificação das partículas na atividade *MasterClass*? Explique cada passo.

7. Avaliação da própria UEPS:

Número de aulas para aplicação: 1 aula, 50 minutos.

Objetivo desta etapa: refletir sobre os resultados obtidos com a aplicação da UEPS, visando a fazer os ajustes necessários para que futuras aplicações sejam mais efetivas.

Descrição: a avaliação da própria UEPS deve ser feita em função dos resultados de aprendizagem dos estudantes ao longo de sua aplicação. Além disso, deve-se considerar também a avaliação dos próprios estudantes sobre a experiência de participar da UEPS. Para tal, podem ser utilizadas as perguntas abaixo:

1) De forma geral, você gostou de participar da UEPS?

- Sim Não Parcialmente

Justifique sua resposta.

2) O que você mais gostou na UEPS?

3) Destaque abaixo o(s) ponto(s) que você não gostou da UEPS e que poderia(m) ser diferente(s) nas próximas vezes.

4) Que atividade você mais gostou de fazer na UEPS?

- Fanzine Quiz Modelos Tabela do Modelo *MasterClass*
 Atômicos Padrão

Justifique sua resposta.

5) Antes de participar da UEPS, você se interessava por Física?

- Sim Não Parcialmente

Justifique sua resposta.

6) Participar da UEPS fez você se interessar mais por Física?

- Sim Não Parcialmente

Justifique sua resposta.

7) Em sua opinião, o(a) professor(a) demonstrou domínio de conteúdo e conseguiu ser claro(a) na sua abordagem dos conceitos?

- Sim Não Parcialmente

Justifique sua resposta.

8) Você já havia tido contato com assuntos de Física Moderna e Contemporânea antes da UEPS?

9) Use o espaço abaixo para deixar comentários sobre a UEPS!

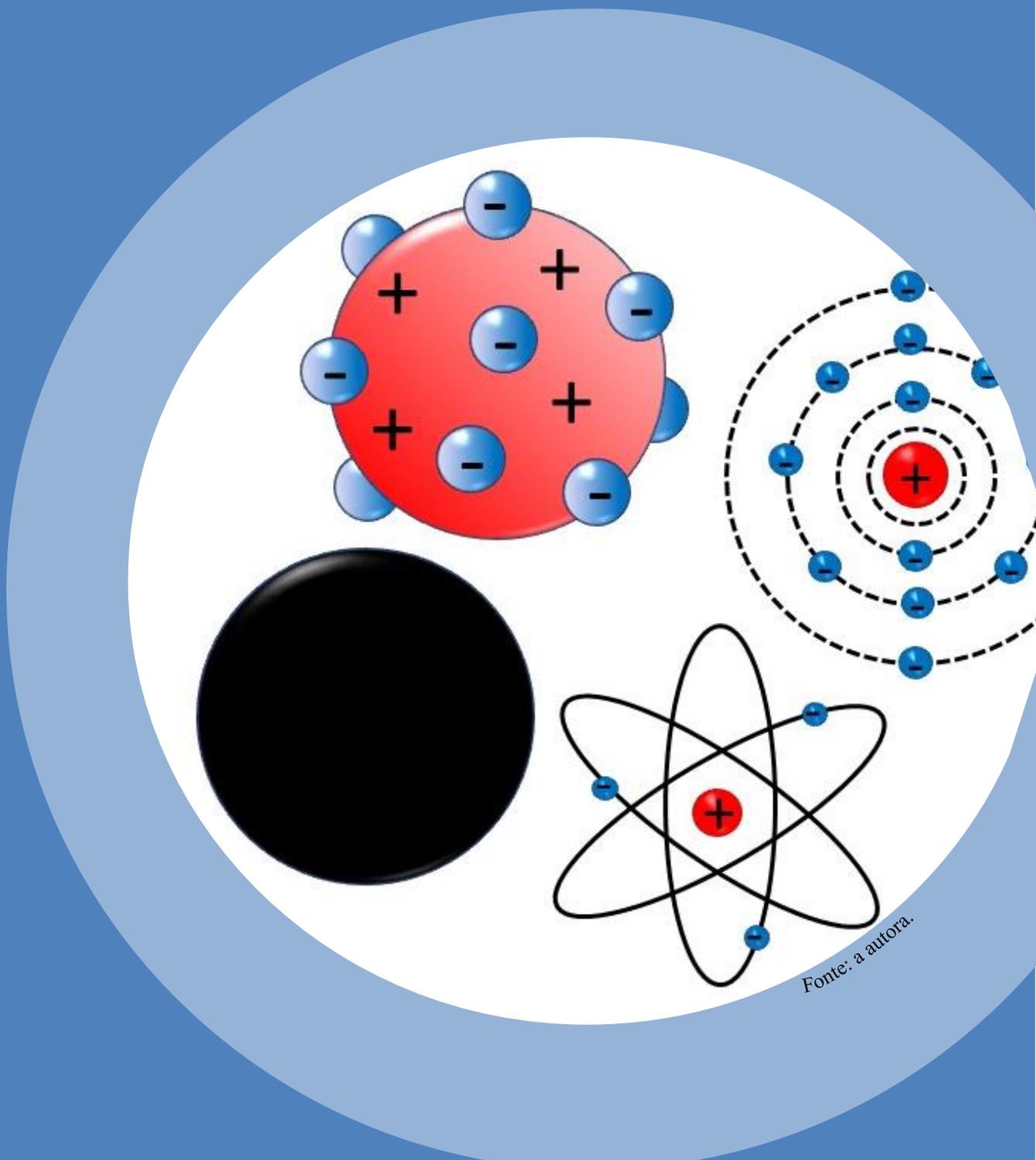
8. Avaliação da aprendizagem na UEPS:

Objetivo desta etapa: avaliar o aprendizado dos estudantes acerca do tópico específico.

Descrição: a avaliação do aprendizado dos estudantes será baseada no seu engajamento em cada atividade, bem como nos trabalhos por eles realizados ao longo da UEPS. A avaliação somativa individual também deve ser considerada, contudo, uma sugestão é que seu peso não deve ser superior a 50% da nota final de cada aluno.

SEÇÃO 2

UNIDADE 1: MODELOS ATÔMICOS



Fonte: a autora.

Apresentação

Esta Unidade contém as atividades a serem realizadas no Bloco 1 da etapa “apresentando o conhecimento” da UEPS. Sugere-se realizar essa etapa segundo o cronograma apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Cronograma de aulas.

Aulas	Conteúdo
3	As primeiras concepções acerca da constituição da matéria.
4 e 5	Modelos atômicos de Dalton e Thomson.
6 e 7	Modelo atômico de Rutherford.
8 e 9	Modelo atômico de Bohr.
10 e 11	– Modelo atômico atual (Mecânica Quântica); – Explicação da atividade de Fanzines.
12 e 13	– Entrega dos Fanzines; – Quiz Modelos Atômicos.

Fonte: a autora.

Aula 3: As Primeiras Concepções Acerca da Constituição da Matéria

A aula 3 inicia-se retomando as respostas dos estudantes para as perguntas 1) e 2) das situações-problema. Em seguida, com o objetivo de fornecer aos alunos um contexto histórico, faz-se uma aula expositiva acerca das concepções gregas sobre a constituição da matéria fundamental, abordando o pensamento de filósofos, por exemplo, Anaxímenes, Tales de Mileto, Heráclito de Êfeso, Parmênides de Eléia e Empédocles. Posteriormente, apresenta-se a teoria atomista grega, defendida por Leucipo e Demócrito. Retoma-se, então, as respostas dos estudantes para as perguntas 3), 4) e 5) das situações-problemas. A aula é finalizada exibindo-se uma imagem contendo uma representação do átomo de acordo com os modelos atômicos sugeridos por Dalton, Thomson, Rutherford, Bohr e o da Mecânica Quântica. A imagem não deve informar a qual modelo cada exemplo se refere. Isso deve ser perguntado aos estudantes, que poderão responder coletivamente.

Aulas 4 e 5: Modelos Atômicos de Dalton e Thomson

Indica-se iniciar a aula 4 com a exibição do vídeo "Tudo se transforma, História da Química, História dos Modelos

Atômicos"(CCEAD PUC-RIO, 2012), disponível no link:

<https://www.youtube.com/watch?v=58xkET9F7MY>. Posteriormente, divide-se a sala em dois espaços, que serão as estações de estudo: um dedicado ao modelo de Dalton, e outro ao modelo de Thomson. Na aula 5, os estudantes são distribuídos em grupos de até cinco integrantes, e todos os grupos devem passar pelas duas estações de estudo.

Se o professor considerar que seus estudantes têm conhecimentos matemáticos suficientes para compreender como a carga e a massa do elétron foram obtidas, pode trabalhar com seus estudantes o material disponível em: [Experimento da gota de óleo de Millikan](#).

Os textos utilizados em cada estação de estudo estão disponíveis no **Capítulo 1** desta Unidade.

Aulas 6 e 7: Modelo Atômico de Rutherford

A aula 6 deve ser iniciada com uma exposição teórica sobre o modelo atômico de Rutherford. A exposição pode ser feita com o uso de slides, indicando-se a abordagem dos seguintes pontos pelo(a) professor(a):

- Características do modelo atômico de Rutherford;
- Radioatividade: o que são partículas alfa?;
- O experimento de Rutherford.

Na aula 7, divide-se os estudantes em duplas. Cada integrante da dupla ficará

responsável por ler um material diferente. Deverá, também, elaborar uma pergunta sobre o material pelo qual ficou responsável. Em seguida, os membros da dupla terão vinte minutos para compartilhar com seu par os principais pontos do material que leram. Ao final do compartilhamento, cada integrante deve fazer ao par a pergunta que elaborou. Quando os membros da dupla compartilharem seus materiais, devem responder, em conjunto, uma atividade de meta coletiva.

Caso não exista um número de par de estudantes na sala, podem ser formados trios. Nesse caso, dois estudantes ficam com o material para o Integrante 2 da dupla. Os materiais a serem entregues para os alunos estão disponíveis no **Capítulo 2** desta Unidade.

Aulas 8 e 9: Modelo Atômico de Bohr

A aula 8 deve ser iniciada com uma exposição teórica sobre o modelo atômico de Bohr. A exposição pode ser feita com o uso de slides, indicando-se a abordagem dos seguintes pontos pelo(a) professor(a):

- Problemas no modelo atômico de Rutherford: perda de energia por radiação e colapso do átomo;
- Uso da radiação causada por partículas aceleradas: o acelerador SIRIUS;
- Quantizações: o problema do corpo negro e o efeito fotoelétrico;

- Einstein e o efeito fotoelétrico: surge uma nova partícula subatômica – o fóton;
- Características do modelo atômico de Bohr.

Na aula 9, os estudantes devem ser divididos em trios. Cada integrante do trio receberá um material diferente contendo um texto informativo e perguntas relacionadas ao assunto. Os estudantes deverão ler os textos pelos quais ficaram responsáveis, responder as perguntas e compartilhar as respostas com os demais integrantes do trio. Posteriormente, os integrantes da equipe farão uma atividade de meta coletiva sobre o assunto. Os materiais a serem entregues para os estudantes estão disponíveis no **Capítulo 3** desta Unidade.

Aulas 10 e 11: Modelo Atômico Atual e Orientações para Construção de Fanzines

Na aula 10, busca-se trabalhar o modelo atômico atual, baseado na Mecânica Quântica. Por se tratar de um material voltado para o Ensino Médio, a ideia aqui é apresentar os conteúdos no formato de divulgação científica, sem haver um tratamento matemático. Para tal, pode-se realizar uma exposição dialogada com os estudantes, abordando os seguintes pontos:

- Dialogando com a química: distribuição eletrônica - o que são os níveis e subníveis?;
- Luz: onda ou partícula?;

- Ondas de matéria;
- Ondas de probabilidade;
- O experimento da dupla fenda com elétron;
- Aplicações da Mecânica Quântica;
- Spin;
- Orbitais atômicos.

Na aula 11, informa-se aos estudantes que, para finalizar o estudo dos modelos atômicos, serão realizadas duas atividades: a elaboração de fanzines com o tema Modelos Atômicos e a participação em um quiz com o mesmo tema. O professor deve, então, orientar os estudantes acerca da realização dessas atividades.

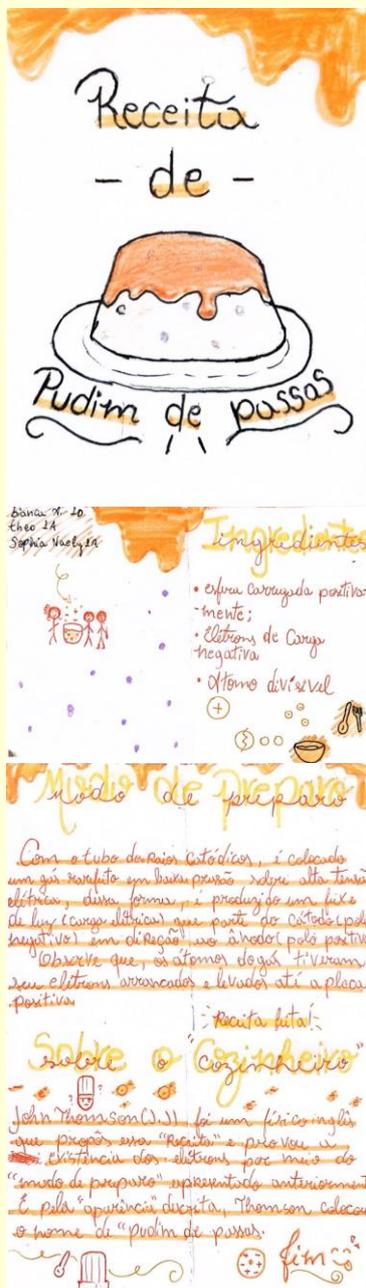
Fanzines

Essa atividade pode ser feita em grupo ou individualmente. Nela, os estudantes devem escolher um entre os modelos atômicos estudados e elaborar um fanzine sobre ele.

De acordo Silva (2023), os fanzines são produções independentes das editoras, com o objetivo principal de divulgar produções amadoras em uma rede de comunicação criada entre fãs interessados em determinado tema.

Assim, um fanzine pode ser uma revista em quadrinhos, uma colagem, um mural, um cordel ou um desenho, entre outras possibilidades criativas. A Figura 1 apresenta um exemplo de fanzine sobre o tema “Modelo atômico de Thomson.”.

Figura 1 – exemplo de Fanzine.



Fonte: acervo pessoal.

Após a entrega dos fanzines, é necessário que o(a) professor(a) leia os materiais e corrija possíveis erros junto aos estudantes. Em seguida, pode-se fazer uma exposição física ou virtual com os trabalhos produzidos.

Quiz Modelos Atômicos

Essa atividade pode ser realizada em duas aulas, podendo acontecer em plataformas online de quiz, como o site Kahoot, ou na própria sala de aula sem a utilização de mídias digitais. O professor pode atribuir premiações para os estudantes ou equipes que alcançarem melhores resultados. Compartilha-se abaixo perguntas que podem ser utilizadas no quiz. Caso deseje utilizar o Kahoot, é possível acessar um quiz com as perguntas sugeridas pelo link: [quiz Kahoot](#).

1) Nesse modelo, os átomos são partículas sólidas, maciças, duras e indivisíveis. Quem o propôs foi:

- A) Dalton.
- B) Rutherford.
- C) Thomson.
- D) Bohr.

Resposta correta: A)

2) Que descoberta levou Thomson a propor um novo modelo para o átomo?

- A) A descoberta do núcleo.
- B) A descoberta do próton.
- C) A descoberta do spin.
- D) A descoberta do elétron.

Resposta correta: D)

3) Dalton baseou seu modelo para o átomo em duas leis: a lei de conservação de massa e a lei da composição constante.

- A) Verdadeiro.
- B) Falso.

Resposta correta: A)

4) É considerada como uma contribuição de Thomson ao modelo atômico:

- A) O átomo ser indivisível.
- B) Os elétrons girarem em órbitas circulares ao redor do núcleo.
- C) A existência de partículas subatômicas.
- D) O átomo possuir um núcleo com carga positiva.

Resposta correta: C)

5) Na famosa experiência de Rutherford, realizada no início do século XX, com a lâmina de ouro, um fato que indicava que o átomo possuía um núcleo pequeno e positivo foi:

- A) Um grande número de partículas alfa não atravessou a lâmina.
- B) Ao atravessar a lâmina, a maioria de partículas alfa sofria desvio.
- C) As partículas alfa teriam cargas negativas.
- D) Um pequeno número de partículas alfa, positivas, sofria grandes desvios.

Resposta correta: D)

6) As partículas alfa, utilizadas por Rutherford em seu experimento para investigar o átomo, são núcleos do elemento hélio

- A) Verdadeiro.
- B) Falso.

Resposta correta: A)

7) Qual das alternativas a seguir indica corretamente o modelo atômico de Niels Bohr?

- A) Semelhante a um “sistema solar”: o átomo possui núcleo e uma eletrosfera.
- B) Os elétrons giram em torno do núcleo em determinadas órbitas.

C) Átomos esféricos, maciços e indivisíveis.

D) “Pudim de ameixas”: cargas negativas inseridas em uma massa positiva.

Resposta correta: B)

8) O modelo atômico atual é regido pela mecânica quântica, com elétrons comportando-se probabilisticamente.

A) Verdadeiro.

B) Falso.

Resposta correta: A)

9) De acordo com o modelo de Rutherford, uma carga positiva (núcleo) ocupa a maior parte do átomo

A) Verdadeiro.

B) Falso.

Resposta correta: B)

10) O modelo atômico de Rutherford também é conhecido como o modelo:

A) Pudim de passas.

B) Planetário / Sistema Solar.

C) Probabilístico.

D) Bola de bilhar.

Resposta correta: B)

11) O modelo de Rutherford explicou adequadamente os resultados obtidos no experimento com as partículas alfa. O que o modelo de Rutherford NÃO explicava era:

A) O desvio de algumas partículas alfa ao atravessar a folha de ouro.

B) A existência de uma pequena região chamada núcleo.

C) A estabilidade do átomo, pois cargas aceleradas emitem radiação.

D) A maior parte das partículas alfa atravessarem a folha de ouro sem desviar.

Resposta correta: C)

12) O modelo atômico de Dalton propõe a existência de uma eletrosfera ao redor de um núcleo atômico de carga positiva.

A) Verdadeiro.

B) Falso.

Resposta correta: B)

13) Para explicar a estabilidade do átomo, Bohr postulou que os elétrons ocupam apenas níveis com certa quantidade de energia

A) Verdadeiro.

B) Falso.

Resposta correta: A)

14) Não é uma limitação do modelo de Bohr:

A) A determinação dos níveis de energia conhecidos: K, L, M, N, O, P e Q.

B) Funcionamento apenas para átomos que só possuem um elétron.

C) Não explicação da estrutura fina das linhas espectrais.

D) Não explicação sobre como ocorre a ligação para formar moléculas.

Resposta correta: A)

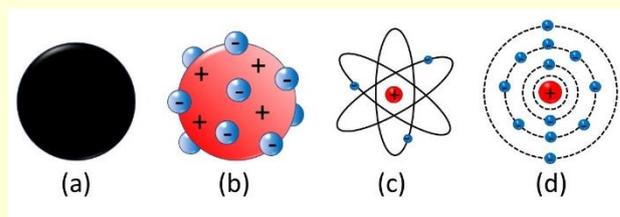
15) Outro grande desenvolvimento na mecânica quântica foi realizado pelo físico francês Louis de Broglie. Baseado nos trabalhos de Planck e Einstein, que mostraram como as ondas de luz podem exibir propriedades de partículas, de Broglie teorizou que partículas, como o elétron, podem também ter propriedades de ondas. Essa afirmação é:

A) Verdadeira.

B) Falsa.

Resposta correta: A)

16) A opção que associa corretamente o modelo atômico e sua respectiva representação é:



A) (a) Thomson; (b) Dalton; (c) Rutherford; (d) Bohr.

B) (a) Dalton; (b) Thomson; (c) Rutherford; (d) Bohr.

C) (a) Bohr; (b) Thomson; (c) Rutherford; (d) Dalton.

D) (a) Rutherford; (b) Thomson; (c) Dalton; (d) Bohr.

Resposta correta: B)

17) Julgue a afirmação abaixo, acerca da mecânica quântica, em verdadeira ou falsa:

“Seus efeitos podem ser observados apenas em sistemas físicos cujas dimensões são próximas ou abaixo da escala atômica, tais como moléculas, átomos, elétrons, prótons e de outras partículas subatômicas”.

A) Verdadeiro.

B) Falso.

Resposta correta: A)

1.1. Material Estação Modelo de Dalton

O MODELO ATÔMICO DE DALTON^{1,2}

Integrantes do grupo: _____

O Modelo atômico proposto pelo cientista inglês John Dalton, em 1808, afirmava que toda a matéria é composta por pequenas partículas indivisíveis chamadas **átomos**. Dalton imaginou os átomos como representado na Figura 1: partículas sólidas, maciças e indestrutíveis.

VOCÊ SABIA?

A palavra *átomo* vem do grego e significa “indivisível”.

Figura 1 - representação do átomo no modelo atômico de Dalton.



Fonte: a autora.

Nesse modelo, os átomos de um mesmo **elemento químico** são todos iguais, tendo a mesma massa e o mesmo tamanho. Porém, átomos de elementos diferentes são diferentes. Por exemplo, um átomo de ouro é igual a todos os outros átomos desse mesmo elemento. Por outro lado, um átomo de ouro é diferente de um átomo de sódio.

As **substâncias químicas** são formadas pela combinação específica de átomos de um ou mais elementos. Essas substâncias podem ser **simples** (quando formadas por átomos de um mesmo elemento químico) ou **compostas** (quando formadas por átomos de dois ou mais elementos químicos diferentes). Um exemplo de substância composta é a amônia (NH₃), amplamente utilizada na fabricação de fertilizantes agrícolas, plásticos e produtos de limpeza. A amônia é composta porque é formada pela combinação de dois elementos diferentes: o nitrogênio e o hidrogênio.

No modelo de Dalton, os compostos são formados por **reações químicas**. Essas reações não são capazes de destruir ou criar átomos, elas apenas os reorganizam. Por exemplo, a amônia pode ser produzida a partir do gás nitrogênio (N₂) e do gás hidrogênio (H₂) por meio da seguinte reação química: $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$.

Quando o nitrogênio se combina com o hidrogênio para formar a amônia, os átomos de nitrogênio e hidrogênio ainda existem. Eles simplesmente se reorganizaram para formar um novo composto.

Dalton baseou seu modelo atômico em duas leis: a lei da conservação de massa e a lei da composição constante.

A lei da conservação de massa diz que a matéria não é criada ou destruída em um sistema fechado. Ou seja, em uma reação química, a massa dos reagentes consumidos é igual à massa dos produtos formados. Por exemplo, para a formação da amônia, se temos 28g de gás nitrogênio reagindo com 6g de gás hidrogênio, serão produzidos 34g de amônia, conforme mostra a Figura 2.

A teoria de Dalton explica essa lei da seguinte forma: a matéria é formada por átomos que não podem ser criados nem destruídos. Isso leva à seguinte conclusão: se o número de átomos permanece constante durante uma reação, então a massa do sistema também se manterá constante.

A lei das proporções definidas diz que as massas dos reagentes e dos produtos de uma reação devem respeitar proporções determinadas. Na Figura 3, vimos que 28 g de gás nitrogênio (N₂) unem-se a 6 g de gás hidrogênio (H₂) produzindo 34 g de amônia (NH₃), portanto, essa proporção deve ser sempre respeitada. Por exemplo, se fossem usados 10 g de gás nitrogênio, quantos gramas de gás hidrogênio precisaríamos e quantos gramas de amônia seria formada? Para descobriremos, basta seguir a mesma proporção já conhecida:

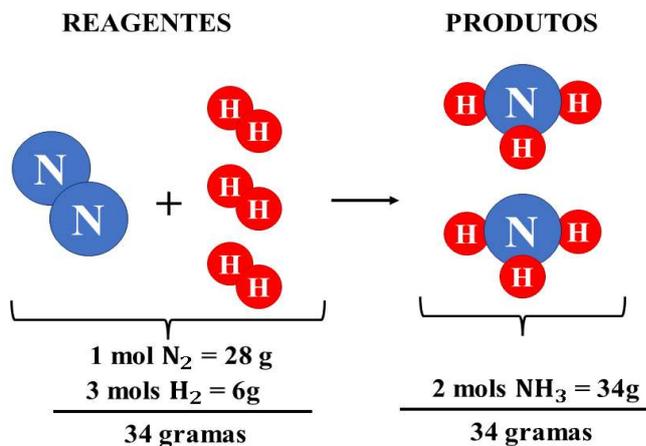
$\begin{array}{l} 28 \text{ g de N}_2 \text{ ----- } 6 \text{ g de H}_2 \\ 10 \text{ g de N}_2 \text{ ----- } x \text{ g de H}_2 \end{array}$ $28 \cdot x = 10 \cdot 6$ $x = \frac{60}{28} \cong 2,14 \text{ g de H}_2 \text{ necessários}$

$\begin{array}{l} 28 \text{ g de N}_2 \text{ ----- } 34 \text{ g de NH}_3 \\ 10 \text{ g de N}_2 \text{ ----- } y \text{ g de NH}_3 \end{array}$ $28 \cdot y = 10 \cdot 34$ $y = \frac{340}{28} \cong 12,14 \text{ g de NH}_3 \text{ produzidos}$

As ideias de Dalton foram muito importantes para a teoria atômica moderna. Porém, o modelo de Dalton não incluía fenômenos já conhecidos, por exemplo, os elétricos. Além disso, experimentos posteriores de espectrometria de massa demonstraram que átomos do mesmo elemento podem ter massas diferentes (hoje sabemos que isso acontece porque o número de nêutrons, uma partícula subatômica não conhecida por Dalton, pode variar em diferentes *isótopos* do mesmo elemento).

Assim, foi necessário o surgimento de outros modelos sobre a estrutura da matéria, que incluíssem os fenômenos já conhecidos.

Figura 2 - Lei de conservação da massa na reação de produção da amônia.



Fonte: a autora.

HORA DO EXERCÍCIO!

Após a leitura do texto acima, respondam em conjunto:

- 1) Dalton baseou sua teoria em duas leis: a lei de conservação de massas e a lei das proporções definidas. Escreva um pouco sobre cada uma dessas leis.
- 2) Como é o átomo de acordo com o modelo de Dalton?
- 3) Por que o modelo de Dalton precisou ser substituído?

1.2. Material Estação Modelo de Thomson

O MODELO ATÔMICO DE THOMSON^{1,2,3}

Integrantes do grupo: _____

O primeiro modelo atômico moderno é atribuído ao inglês John Dalton. Nesse modelo, ele postulou que toda a matéria seria feita de partículas indivisíveis, chamadas átomos, que não podiam ser criadas nem destruídas.

Quando Dalton propôs esse modelo, ele não possuía os instrumentos necessários para realizar experimentos com átomos individuais. Portanto, ele não tinha como verificar se os átomos podiam ou não ser divididos em estruturas menores. Contudo, experimentos realizados anos após Dalton propor seu modelo possibilitaram a descoberta da primeira partícula subatômica: o elétron! Vamos entender melhor essa história?

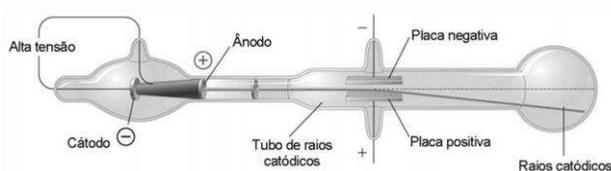
J.J. THOMSON E A DESCOBERTA DO ELÉTRON

No final do século XIX, o físico britânico Joseph J. Thomson realizou uma série de experimentos utilizando **tubos de raios catódicos**.

VOCÊ SABIA?

Os tubos de raios catódicos são tubos de vidro fechados, no qual grande parte do ar no interior foi retirada. Em seu interior há duas placas de metal (os eletrodos): uma chamada **cátodo** e outra chamada **ânodo**. Quando se aplica uma diferença de potencial entre os eletrodos, raios são emitidos do cátodo. Devido a sua origem, esses raios foram chamados de **raios catódicos**. Esse raio pode ser detectado pintando a extremidade do tubo com fósforo, um material que emite luz quando atingido pelo raio catódico. Veja a representação de um tubo de raios catódicos na Figura 4.

Figura 1 – O tubo de raios catódicos.



Fonte: ENEM DIGITAL (2020).

Em um dos experimentos realizados, Thomson colocou dois ímãs, um em cada lado do tubo, e observou que o raio catódico sofria um desvio. Esse desvio era exatamente o esperado se o feixe fosse composto por partículas de carga **negativa**. Thomson também colocou duas placas elétricas ao redor do tubo, gerando um campo elétrico, e observou que o raio catódico se desviou da placa elétrica de carga negativa e foi em direção à placa elétrica de carga positiva.

A partir desses resultados, Thomson conseguiu calcular a razão entre a carga elétrica (q) e a massa (m) das partículas que constituíam

os raios catódicos, ou seja, conseguiu calcular o valor de q/m para essas partículas. Posteriormente, usando técnicas e ideias desenvolvidas por seu ex-aluno C. T. R. Wilson, Thomson conseguiu calcular o valor da carga e da massa dessas partículas separadamente, levando-o a uma descoberta fascinante: **a massa dessas partículas era cerca de 1800 vezes menor do que a massa do átomo de hidrogênio** (o átomo com menor

massa conhecida até então). O átomo havia sido quebrado! Estava descoberto o **elétron**, a primeira partícula subatômica encontrada!

Thomson repetiu suas experiências utilizando eletrodos feitos de vários metais e diferentes gases residuais no interior do tubo, mas os valores encontrados por ele não mudavam. Assim, ele concluiu que os elétrons constituíam **toda a matéria** conhecida.

Assim, o modelo atômico de Dalton, no qual o átomo era indivisível, precisava de correções. Para explicar existência dos elétrons, um modelo atômico completamente novo seria necessário, e Thomson o propôs em 1898.

O MODELO DO PUDIM DE PASSAS (OU PUDIM DE AMEIXAS)

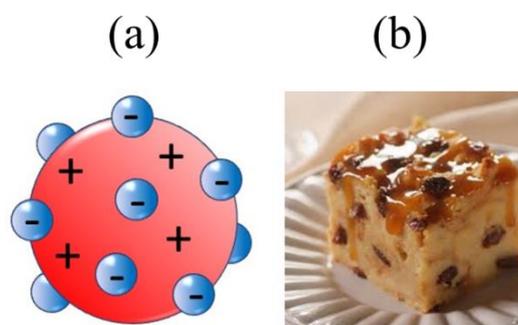
O modelo atômico proposto por Thomson possuía as seguintes características:

- O átomo é uma esfera carregada positivamente, e os elétrons encontram-se imersos dentro dele como ameixas dentro de um pudim, conforme mostra a Figura ;
- Uma vez que a matéria é eletricamente neutra, a carga positiva da esfera deve ser igual e contrária à carga dos elétrons.

Esse modelo é frequentemente chamado de modelo do **pudim de passas** do átomo, pois sua descrição é muito parecida com a de um pudim de passas, uma tradicional sobremesa inglesa.

Apesar do sucesso em explicar o comportamento dos raios catódicos, ainda havia perguntas que o modelo de Thomson não conseguia responder. Por exemplo, de acordo com o eletromagnetismo, partículas carregadas com mesmo sinal sofrem uma força de repulsão, assim, como o átomo se mantinha estável se possui várias partículas de mesma carga (elétrons) próximas? O modelo proposto por Thomson, portanto, precisava de ajustes.

Figura 2 - (a) representação do modelo atômico proposto por Thomson. Os elétrons estão imersos dentro de um átomo de carga positiva, como as ameixas dentro da massa do pudim mostrado em (b).



Fonte: (a) a autora. (b) SOBREMESAS FÁCEIS (©2013).

HORA DO EXERCÍCIO

Após a leitura do texto acima, respondam em conjunto:

- 1) Que descoberta levou Thomson a afirmar que o átomo poderia ser dividido?
- 2) Que fato levou Thomson a concluir que os elétrons poderiam ser encontrados em átomos de todos os elementos?
- 3) Descreva o átomo de acordo com o modelo de Thomson.

2.1. Atividade para Integrante 1 da Dupla

O MODELO ATÔMICO DE RUTHERFORD^{1,2}

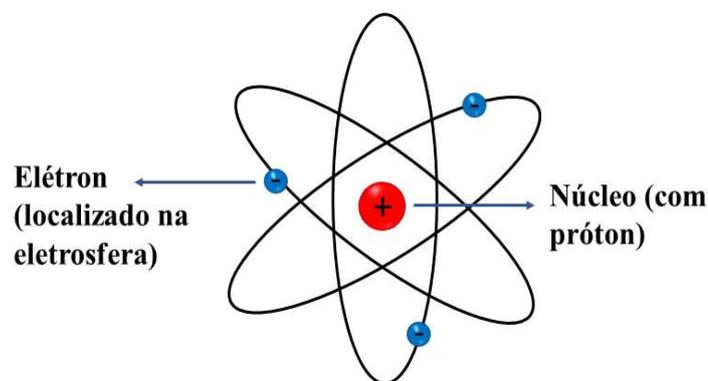
Nome: _____

Com o objetivo de compreender melhor a estrutura do átomo, o físico neozelandês Ernest Rutherford realizou uma experiência na qual bombardeava uma fina folha de ouro com partículas α emitidas pelo elemento químico rádio.

As descobertas feitas por Rutherford e sua equipe após a realização do experimento o levaram a propor, em 1911, um novo modelo atômico. Nesse modelo, o átomo teria as seguintes características:

- O átomo é composto, em sua maior parte, por espaços vazios;
- A maior parte da massa do átomo encontra-se em uma pequena região central, chamada núcleo;
- A carga positiva do átomo também se concentra no núcleo;
- Os elétrons ocupam uma região ao redor do núcleo, chamada eletrosfera;
- O raio da eletrosfera é de dez a cem mil vezes maior que o raio do núcleo.

Figura 1 - representação do modelo de Rutherford.



Fonte: a autora.

Assim, o átomo de Rutherford, representado na Figura 1, consistia em um núcleo, muito pequeno e carregado positivamente, cercado por elétrons, de carga negativa. Esse modelo ficou conhecido como “modelo planetário”, pois os elétrons circulariam o núcleo como planetas circulam uma estrela.

Para uma caracterização mais detalhada do núcleo atômico, outros experimentos foram realizados. Em 1919, Rutherford observou que quando fazia colidir partículas alfa com átomos de nitrogênio, eram emitidas partículas idênticas ao núcleo do hidrogênio. A partir desses resultados, ele e outros cientistas chegaram à conclusão de que os núcleos de hidrogênio eram um tipo de partícula presente em todos os núcleos atômicos. Essa partícula foi chamada de **próton**.

Experimentos posteriores com fenômenos radioativos levaram a mais uma descoberta. Por exemplo, observou-se que um núcleo atômico com carga elétrica correspondente a uma quantidade “x” de prótons

possuía massa correspondente a uma quantidade de aproximadamente “2x” de prótons. De onde vinha essa massa excedente?

Esse problema só foi solucionado com a descoberta, creditada a James Chadwick, de uma nova partícula subatômica: o **nêutron**. Essa partícula não possui carga elétrica, tem massa muito próxima da massa do próton e ocupa o núcleo atômico junto ao próton.

O modelo nuclear estava bem estabelecido em relação a alguns fenômenos, porém, não conseguia explicar outros. Por exemplo, de acordo com o eletromagnetismo, partículas carregadas emitem radiação quando são aceleradas. Uma vez que os elétrons circulam ao redor do núcleo, o que os impede de perder energia por radiação até caírem no núcleo? Se esse fosse o caso, os átomos não poderiam ser estáveis, e a matéria não existiria! Era algo que o modelo planetário não explicava.

HORA DO EXERCÍCIO!

Agora que você já leu o texto, prepare-se para explicar seus principais pontos para seu parceiro de dupla! Além disso, elabore uma pergunta sobre o assunto do texto. Você deverá fazer essa pergunta ao seu colega após compartilhar a explicação sobre o texto!

2.2. Atividade para Integrante 2 da Dupla

O EXPERIMENTO DE RUTHERFORD^{3,4}

Nome: _____

Em 1896, Henri Becquerel descobriu a radioatividade. Anos depois, a radioatividade passou a ser um tema muito empolgante da Física, e diversos físicos dedicaram-se a estudá-lo. Os esforços de Pierre e Marie Curie levaram-nos à descoberta de dois novos elementos radioativos: o polônio e o rádio (relacionado ao termo radioatividade).

Frederick Soddy e Ernest Rutherford, físico neozelandês, estudaram a atividade radioativa do urânio, e descobriram que esse elemento emitia dois tipos de radiação, que podiam ser diferenciadas pelo seu poder de penetração na matéria. Chamaram esses tipos de “raios” **alfa** (α), e **beta** (β), sendo a radiação alfa menos penetrante que a beta.

VOCÊ SABIA?

A ionização é um processo em que átomos perdem um ou mais elétrons, tornando-se eletricamente carregados (íons).

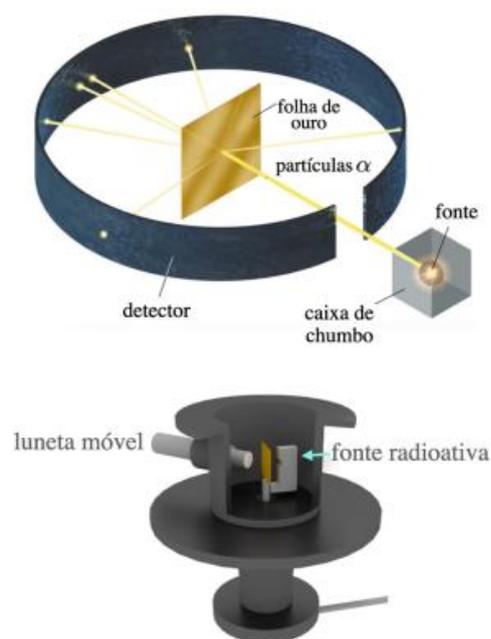
Posteriormente, Becquerel descobriu que os **raios beta eram elétrons**. Vários experimentos realizados por diversos cientistas acumularam evidências sobre o que eram as **partículas α : átomos ionizados do elemento químico hélio**. Em 1900, o físico francês Paul Villard descobriu um terceiro tipo de radiação, os raios gama (γ).

Após muitos estudos, Rutherford chegou à conclusão de que a radioatividade tinha origem na desintegração de alguns tipos de átomos. Ele observou que partículas α e β eram expelidas de átomos mais pesados, e interpretou esse resultado como sendo um indicativo de que os átomos possuíam uma estrutura interna mais complexa do que se acreditava até então.

Portanto, buscando entender mais sobre a estrutura interna do átomo, Rutherford dedicou-se ao estudo das propriedades das partículas alfa. Para tal, realizou, junto a Hans Geiger e Ernest Marsden, dois estudantes sob sua orientação, o famoso experimento da folha de ouro. Veja um esquema do experimento na Figura 1.

Nesse experimento, um fino feixe de partículas α emitidas de uma amostra de rádio era disparado em uma folha bem fina de ouro puro. A folha de ouro tinha uma placa detectora ao seu redor, que piscava quando atingida por uma partícula α .

Figura 1 - o experimento realizado por Rutherford, Marsden e Geiger.



Fonte: REIS (2021).

A espessura da folha deveria ser fina o suficiente para que, quando a atravessassem, as partículas α colidissem com apenas um átomo de ouro, sofrendo um espalhamento. Geiger e Marsden contavam o número de partículas α desviadas em função do ângulo de desvio, com o auxílio de uma luneta em uma sala escura.

O modelo atômico vigente até então, o de Thomson, afirmava que os átomos eram compostos por uma massa positiva na qual estavam imersos os elétrons, partículas de carga negativa. Uma vez que as partículas α são cerca de 8000 vezes mais pesadas que o elétron e são emitidas da fonte radioativa com uma velocidade de aproximadamente 16000 km/s, se o modelo de Thomson estivesse correto, as partículas α deveriam atravessar a folha de ouro sem sofrer desvios ao colidirem com os elétrons.

Contudo, os resultados do experimento foram surpreendentes. Enquanto a maioria das partículas α passou direto pela folha de ouro (conforme previsto), algumas partículas α sofreram um desvio de mais de 90° de sua rota! Ainda que esses eventos fossem muito raros, era impossível explicá-los do ponto de vista da teoria atômica de Thomson. Seria como se um super avião, movendo-se a 16000 km/s, fosse arremessado para trás ao se chocar com uma bicicleta estacionada!

O experimento foi repetido muitas vezes usando outros materiais como alvo, porém o resultado era sempre o mesmo. O modelo de Thomson estava definitivamente descartado!

HORA DO EXERCÍCIO!

Agora que você já leu o texto, prepare-se para explicar seus principais pontos para seu parceiro de dupla! Além disso, elabore uma pergunta sobre o assunto do texto. Você deverá fazer essa pergunta ao seu colega após compartilhar a explicação sobre o texto!

2.3. Atividade de Meta Coletiva



META COLETIVA – MODELO DE RUTHERFORD

Integrantes da dupla: _____

- 1) Descrevam, com suas palavras, o experimento realizado por Rutherford. Com que objetivo ele realizou esse experimento?
- 2) Que resultados Rutherford obteve a partir de seu experimento? Por que esses resultados entravam em conflito com a teoria de Thomson para o átomo?
- 3) Quais as características do átomo de acordo com o modelo atômico de Rutherford? Relacionem os resultados obtidos por Rutherford em seu experimento com essas características.
- 4) Que problemas a teoria de Rutherford para a estrutura do átomo enfrentava?

3.1. Atividade para Integrante 1 do Trio

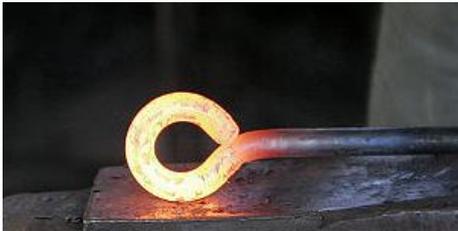
O MUNDO QUANTIZADO

Nome: _____

PLANCK E A RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO^{4,5}

Todo objeto que esteja acima do zero absoluto é capaz de emitir **radiação térmica**, também chamada de calor. Por exemplo, você já deve ter visto um ferro em brasa. Por que ele fica com a cor avermelhada (veja Figura 1)?

Figura 1 – ferro aquecido ao rubro.



Fonte: WIKIMEDIA (2005).

Quando aquecemos uma barra de ferro, ela começa a emitir radiação térmica (inicialmente com frequência muito baixa, o que nosso olho não consegue captar). À medida que a temperatura aumenta, a radiação torna-se visível, e vai adquirindo coloração avermelhada. Se continuarmos aumentando a temperatura, a luz emitida vai se tornando branca.

VOCÊ SABIA?

O **zero absoluto** é a menor temperatura que um corpo poderia alcançar. Ela é igual a $-273,15\text{ °C}$!

Por outro lado, quando a luz incide sobre um corpo, parte da energia recebida é absorvida e a outra parte é refletida. Por exemplo, a Terra reflete parte da luz que recebe do Sol e absorve outra parte. Posteriormente, a energia absorvida é reemitida, possibilitando a manutenção da vida na Terra.

Agora, imagine um objeto que absorve completamente todas as radiações que chegam até ele. Posteriormente, esse objeto reemitiria toda a energia que absorveu. Esse objeto idealizado é chamado de **corpo negro**. Por ter características interessantes, o corpo negro foi amplamente estudado no século XIX.

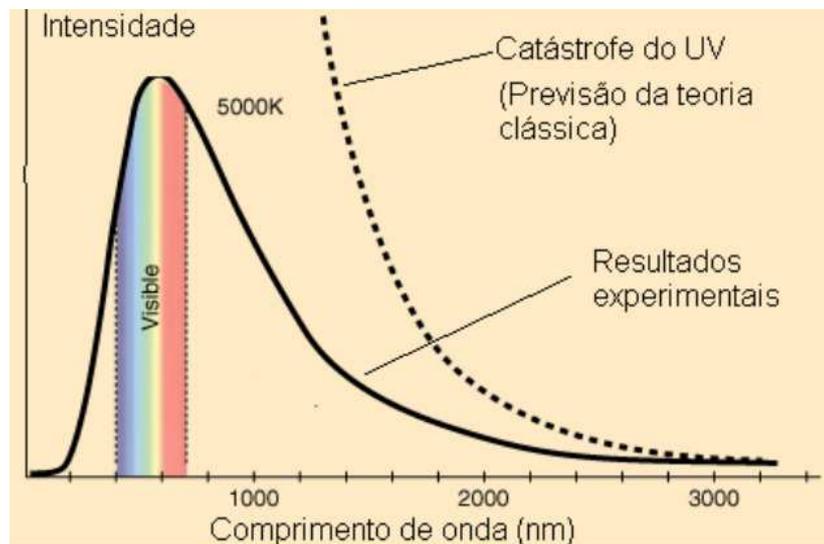
VOCÊ SABIA?

Para uma determinada temperatura, o espectro de radiação de um corpo negro é a relação entre a intensidade da radiação emitida por ele e o comprimento de onda dessa radiação.

A primeira característica interessante do corpo negro é que o espectro da radiação emitida por ele depende apenas de sua temperatura, ou seja, o espectro de emissão **não depende do material do qual o corpo negro seja feito**. A segunda característica é que, utilizando Física Clássica, ninguém era capaz de explicar a curva experimental da radiação emitida por um corpo negro. Para entender melhor, veja a Figura 2

abaixo.

Figura 2 - a curva de emissão experimental de um corpo negro (linha preenchida) versus curva de emissão teórica de um corpo negro segundo a Física Clássica (linha pontilhada).



Fonte: EDITORA MODERNA (© 2011).

Quando se tentava explicar os resultados experimentais obtidos para a radiação do corpo negro usando o modelo matemático baseado na Física Clássica, observava-se que, para grandes comprimentos de onda, havia certa concordância. Porém, para pequenos comprimentos de onda, havia uma grande discordância entre os resultados experimentais e os teóricos. Essa discordância ficou conhecida como **catástrofe do ultravioleta**.

Esse problema só foi resolvido pelo físico alemão Max Planck, em 1900.

A solução apresentada por ele foi tão inovadora, genial e revolucionária que lhe rendeu o prêmio Nobel de Física em 1918. Mas que solução foi essa?

Para conseguir uma equação que se adequasse perfeitamente aos resultados experimentais, Planck teve que considerar que as moléculas na **superfície de um corpo negro não podiam absorver qualquer quantidade de energia, nem vibrar com qualquer frequência**. Ou seja, a energia emitida pelo corpo negro não era **contínua**, como previa a Física Clássica, e sim **discreta**. Mas qual a diferença entre contínua e discreta?

Figura 3 – a rampa é contínua, a escada é discreta.



Fonte: adaptada de FREEPIK (© 2010-2024).

Imagine que, na figura 3, você quer sair do ponto A e chegar no ponto B. Você pode fazer isso de duas formas: usando a rampa ou a escada.

Se você usar a rampa, poderá subir percorrendo qualquer altura, dando passos menores

ou passos maiores, ou seja, de maneira **contínua**. Contudo, se for pela escada, poderá subir apenas as quantidades determinadas pela altura dos degraus: um degrau, dois degraus, três degraus... Ou seja, de maneira **discreta**.

Com sua teoria de que a energia de um corpo negro seria **discreta**, Planck identificou o primeiro fenômeno quântico, revelando um mundo inteiramente novo para a Física.

A ideia de Planck era bastante inovadora. Assim, quando ele a apresentou para a comunidade científica de sua época, ela não foi bem aceita inicialmente, mesmo Planck sendo um físico já muito respeitado.

O cenário mudou quando, em 1905, um jovem e desconhecido (até então) físico publicou uma teoria explicando o efeito fotoelétrico. Essa teoria usava as ideias de quantização de Planck, e o jovem físico era Albert Einstein.

HORA DO EXERCÍCIO

O espectro da radiação térmica de corpo negro foi bastante estudado no século XIX. A teoria clássica, que considerava a energia como uma grandeza contínua, não conseguia explicar os resultados experimentais obtidos para essa radiação. Sobre esse tema, responda:

- 1) Para a física, o que seria um corpo negro?
- 2) Planck conseguiu fornecer uma explicação teórica adequada para os resultados obtidos na radiação do corpo negro. Como ele fez isso?

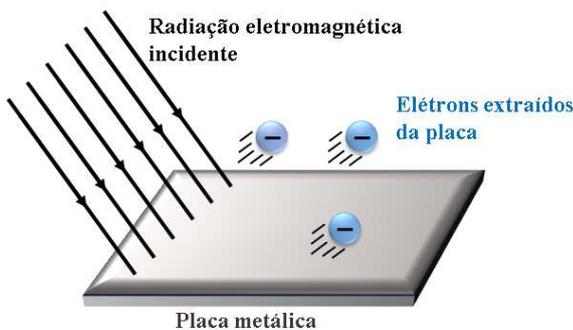
3.2. Atividade para Integrante 2 do Trio

EINSTEIN E O EFEITO FOTOELÉTRICO⁶

Nome: _____

Quando uma radiação eletromagnética de frequência adequada incide em uma placa metálica, os elétrons presentes no metal podem absorver energia suficiente para escaparem da placa. Esse fenômeno recebeu o nome de **efeito fotoelétrico**. Uma representação do efeito fotoelétrico pode ser vista na Figura 1 abaixo (os elétrons estão representados em tamanho grande para melhor entendimento do fenômeno). Atualmente, o efeito fotoelétrico tem diversas aplicações, por exemplo, na contagem do número de pessoas que passam por um determinado local e na abertura e no fechamento automático de portas.

Figura 1 - representação esquemática do efeito fotoelétrico.



Fonte: adaptada de BISCUOLA, BÔAS E DOCA (2016).

Ou seja, se os elétrons foram ejetados após uma luz violeta incidir na placa de metal, a energia cinética desses elétrons não depende do fato de a luz ser mais forte ou mais fraca. Contudo, se uma luz mais forte for utilizada, mais elétrons são ejetados (todos com a mesma energia cinética média dos elétrons ejetados pela luz violeta mais fraca).

- Independente da intensidade da radiação que causa o efeito fotoelétrico, o fenômeno é praticamente instantâneo: a radiação incide na placa e os elétrons imediatamente são ejetados.

O efeito fotoelétrico foi observado pela primeira vez em 1872, pelo físico russo Alexander Stoletov. Posteriormente, outros físicos também o observaram, por exemplo Hertz e Philipp von Lenard, tendo contribuído para a descoberta das **leis de que regem o fenômeno**. São elas:

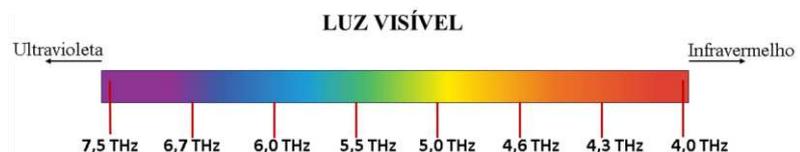
- A energia cinética média dos elétrons que saem da placa não depende da intensidade da radiação incidente.

VOCÊ SABIA?

As **radiações eletromagnéticas** são ondas que não precisam de um meio material para se propagar e, portanto, podem propagar-se no vácuo. São exemplos de ondas eletromagnéticas: os **raios gama**, os **raios x**, a **radiação ultravioleta**, a **luz visível**, a **radiação infravermelha**, as **micro-ondas** e as **ondas de rádio**.

Essas radiações podem ser organizadas de acordo com suas frequências. No caso da luz visível, que é a que nosso olho consegue captar, a luz violeta é a de maior frequência, enquanto a luz vermelha é a de menor frequência. No vácuo, as frequências da luz visível são mostradas na Figura 12.

Figura 2 - As frequências da radiação visível.



Fonte: a autora.

- As energias cinéticas médias dos elétrons ejetados **dependem da frequência** da radiação incidente: quanto maior for a frequência, mais elétrons são ejetados. Por exemplo, os elétrons ejetados via efeito fotoelétrico utilizando luz violeta tem mais energia cinética do que os ejetados usando luz azul, pois a luz violeta tem frequência maior.
- Para que o efeito fotoelétrico ocorra, **a frequência da radiação incidente precisa estar acima de certo valor mínimo**, que depende do metal utilizado. Se esse valor mínimo não for utilizado, não importa quão intensa seja a radiação, o efeito não ocorre.

A teoria ondulatória da luz, baseada na Física Clássica, não era capaz de explicar nenhuma dessas leis. A explicação para o efeito fotoelétrico veio apenas em 1905, com o físico **Albert Einstein**. Ele estendeu para as radiações eletromagnéticas a teoria de quantização que Planck havia desenvolvido para os corpos negros.

Einstein imaginou a radiação eletromagnética como sendo um feixe de partículas, chamadas **fótons**, propagando-se. Cada fóton possui uma quantidade de energia, que depende de uma constante (chamada constante de Planck) e da frequência da radiação.

Quando uma radiação eletromagnética incide na placa metálica, acontecem colisões entre os fótons da radiação e os elétrons do metal. Em cada colisão, cada fóton pode fornecer sua energia para um único elétron. Assim, o elétron é ejetado do metal quando a energia que recebe do fóton é suficiente. Como a energia do fóton depende apenas da **frequência** da radiação, não importa quão forte a luz seja, todos os elétrons ejetados saem com a mesma energia cinética média.

Pela sua explicação para o efeito fotoelétrico e suas contribuições para a física teórica, Einstein foi laureado com o Prêmio Nobel de Física em 1921.

HORA DO EXERCÍCIO!

O efeito fotoelétrico é conhecido desde 1872. Porém, apenas em 1905 o famoso físico Albert Einstein propôs uma explicação adequada para esse efeito. Hoje, tecnologias como portas automáticas de elevadores fazem uso do efeito fotoelétrico para funcionar. Sobre esse tema, responda:

- 1) O que é o efeito fotoelétrico?
- 2) Que características desse efeito a teoria clássica não conseguia explicar?

Como já foi estudado, Rutherford havia desenvolvido um modelo atômico para explicar os grandes desvios sofridos por partículas alfa ao atravessarem a matéria. Esse modelo ficou conhecido como modelo planetário. Também já estudamos que esse modelo enfrentava sérios problemas em relação à estabilidade do átomo.

Porém, as dificuldades encontradas no modelo de Rutherford não abalaram o físico dinamarquês Niels Bohr. Tendo sido aluno de Rutherford, Bohr levou o modelo planetário muito a sério, e pensou bastante sobre os problemas e ideias acerca dele, buscando encontrar algo que explicasse sua estabilidade. Isso acabou levando Bohr a apresentar um novo modelo atômico, em 1913.

O ponto de partida para a elaboração do modelo de Bohr foi a tentativa de explicar os **espectros atômicos**. Para tal, ele incorporou as ideias de quantização de Max Planck, e elaborou os seguintes **postulados**:

1. No átomo, os elétrons movimentam-se ao redor do núcleo em órbitas circulares bem definidas chamadas **camadas** ou **níveis**. Um elétron nunca será encontrado entre dois níveis;
2. Cada nível possui um valor determinado de energia, e o movimento do elétron em um nível de energia ocorre sem emissão de radiação, portanto, não há perda de energia;
3. O elétron pode saltar de um nível menor de energia para um nível maior se absorver uma quantidade adequada de energia. Nesse caso, o elétron fica excitado, e diz-se que houve uma **transição eletrônica**;
4. Quando perde a energia absorvida no processo de excitação, o elétron retorna ao nível original. Nesse caso, há liberação de energia na forma de radiação. Ou seja, há emissão de um quantum de energia equivalente à diferença energética entre os dois níveis.

Veja ao lado uma representação para o átomo de hidrogênio segundo o modelo de Bohr. A camada mais interna do átomo, ou seja, a mais próxima do núcleo, é chamada de K, e as demais seguem a ordem alfabética (L, M, N, e assim por diante). Quanto mais interna for a camada, menor sua energia, conforme pode ser visto na Figura 15.

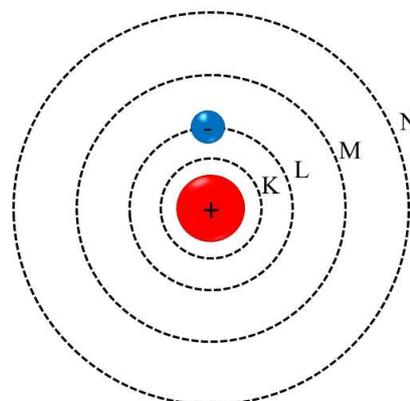
Se o elétron do átomo de hidrogênio que

está na camada K absorver um fóton com energia igual a 10,2 eV (ou seja, a diferença de energia entre os

VOCÊ SABIA?

Postulados são afirmações consideradas verdadeiras sem demonstração, usadas como ponto de partida para um raciocínio.

Figura 3 - O átomo de hidrogênio de acordo com o modelo de Bohr.



Fonte: a autora.

PARA O ÁTOMO DE H	
CAMADA	ENERGIA
K	-13,6 eV
L	-3,4 eV
M	-1,5 eV
N	-0,85 eV
O	-0,54 eV
P	-0,37 eV
Q	-0,28 eV

níveis K e L), ele ficará excitado e sofrerá uma transição eletrônica da camada K para a camada L. Posteriormente, ao voltar para sua camada original, o elétron libera a mesma quantidade de energia que recebeu no formato de radiação eletromagnética.

A novidade no modelo de Bohr está no fato da energia dos elétrons deixar de ser contínua para ser quantizada, ou seja, os elétrons passaram a apresentar apenas determinados valores de energia. Esse fato possibilitou não apenas uma explicação para a estabilidade do átomo, mas também uma explicação para o formato dos espectros atômicos.

Na lâmpada de gás, os elétrons dos átomos são excitados e posteriormente retornam aos níveis de menor energia, liberando energia na forma de luz. Porém, a cor da luz liberada dependerá da diferença de energia entre os níveis envolvidos na transição, e essa diferença varia de acordo com o elemento químico em questão. Portanto, cada elemento apresenta uma cor característica, bem como um espectro característico.

Apesar do sucesso em explicar esses fenômenos, o modelo de Bohr apresenta uma limitação: funciona adequadamente apenas para átomos que possuem só um elétron, os chamados hidrogenóides.

HORA DO EXERCÍCIO!

Em 1913, o físico dinamarquês Niels Bohr propôs um modelo para a estrutura interna do átomo. Com esse modelo, Bohr buscava acabar com algumas inconsistências encontradas no modelo anterior, o de Rutherford. Sobre esse tema, responda:

- 1) Como Bohr resolveu os problemas do modelo de Rutherford?
- 2) Como é o átomo de acordo com o modelo de Bohr?
- 3) Que fenômenos o modelo de Bohr para o átomo conseguia explicar? Fale um pouco sobre eles.
- 5) Que problemas o modelo de Bohr apresentava?

3.4. Atividade de Meta Coletiva



META COLETIVA – MODELO DE BOHR

Integrantes do trio: _____

Após o estudo do modelo de Bohr, elaborem um texto acerca desse modelo. Ao longo do texto, você deve responder as seguintes perguntas:

- Por que foi necessária a proposição de um novo modelo atômico após o modelo de Rutherford?
- Como os trabalhos de Planck e Einstein influenciaram o modelo de Bohr?
- No que consistia o modelo proposto por Bohr?
- Que fenômenos o novo modelo proposto por Bohr explicava?
- Que problemas o novo modelo enfrentava?

Em seu texto, pode haver imagens, tabelas, esquemas, entre outros elementos gráficos que o trio julgar necessário.

ABDALLA, M. C. B. **O discreto charme das partículas elementares**. São Paulo: Editora UNESP, 2006.²

AMABIS, J. M.; FERRARO, N. G.; PENTEADO, P. C. M.; TORRES, C. M. A.; SOARES, J.; CANTO, E. L.; LEITE, L. C. C. **Moderna plus ciências da natureza e suas tecnologias: o conhecimento científico**. São Paulo: MODERNA, 2020.¹

BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. **Física 3: eletricidade e física moderna**. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2016.⁶

CCEAD PUC-RIO. *Tudo se Transforma, História da Química, História dos Modelos Atômicos*. 2012. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=58xkET9F7MY>. Acesso em: 17 ago. 2023.

FREEPIK. Escada de madeira de prancha ao ar livre com rampa de cadeira de rodas de madeira. ©2010-2024. Disponível em: https://br.freepik.com/fotos-premium/escada-de-madeira-de-prancha-ao-ar-livre-com-rampa-de-cadeira-de-rodas-de-madeira_28574024.htm. Acesso em: 20 de ago. de 2023.

INEP – Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. ENEM DIGITAL 2020 – Exame Nacional do Ensino Médio. Disponível em: https://download.inep.gov.br/enem/provas_e_gabaritos/2020_PV_digital_D2_CD6.pdf. Acesso em: 17 ago. 2023.

MODERNA. OS FUNDAMENTOS DA FÍSICA, ©2011. Disponível em: https://www.moderna.com.br/fundamentos/temas_especiais.html. Acesso em: 20 ago. 2023.⁵

REIS, A. C. DOS. **Partículas para todos**. [S.l.: s.n.], 2021. E-book. Disponível em: <https://mesonpi.cbpf.br/arquivos/livros/ParticulasParaTodos.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2023⁴.

SEGRÈ, E. **Dos raios x aos quarks: físicos modernos e suas descobertas**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1987³.

SILVA, G. V. P. **O uso de fanzines para o ensino de Física**. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

SOBREMESAS FÁCEIS. Pudim de Pão. ©2013. Disponível em: <https://sobremesasfaceis.com/sobremesas-de-natal/pudim-de-pao>. Acesso em: 17 ago. 2023.

WIKIMIDEA. Blacksmith at work. 2005. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blacksmith_at_work02.jpg. Acesso em: 20 ago. 2023.

SEÇÃO 2

UNIDADE 2: O MODELO PADRÃO

Modelo Padrão das Partículas Elementares

três gerações da matéria (férmions)						partículas mediadoras (bósons)	
		I	II	III			
QUARKS	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ t top	0 0 1 g glúon	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H higgs		
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 γ fóton	BÓSONS ESCALARES		
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e elétron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ múon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z bóson Z			
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e neutrino do elétron	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ neutrino do múon	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ neutrino do tau	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W bóson W			

BÓSONS VETORIAIS

Fonte: a autora.

Apresentação

Esta Unidade contém as atividades a serem realizadas no Bloco 2 da etapa “apresentando o conhecimento” da UEPS. Sugere-se realizar essa etapa segundo o cronograma apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Cronograma de aulas.

Aulas	Conteúdo
14	Introdução ao Modelo Padrão.
15	As partículas do Modelo Padrão.
16	Tabela do Modelo Padrão – organizando a Construção.
17 e 18	Tabela do Modelo Padrão – montagem e apresentação.

Fonte: a autora.

Aula 14: Introdução ao Modelo Padrão

Na aula 14, o professor deve retomar as partículas subatômicas que foram trabalhadas no Bloco 1 da etapa “apresentando o conhecimento”: o próton, o elétron e o fóton. Em seguida, pergunta-se aos estudantes se eles conhecem outra partícula subatômica. Em geral, os alunos conhecem também o nêutron, pois ele costuma ser apresentado como integrante do átomo junto ao próton e aos elétrons.

Continuando a aula, o professor pergunta aos estudantes se elétron, próton, fóton e nêutron constituem todas as partículas subatômicas que existem. Por fim, apresenta mais três partículas subatômicas: o neutrino do elétron (devido a sua importância nos processos de decaimento radioativo), o pósitron (por ter sido a primeira antipartícula descoberta), o múon (por ter sido a primeira partícula subatômica instável descoberta) e o píon (por ser uma partícula chave para demonstrar que o modelo de Yukawa para existência da força forte estava correto, além de ter contado com a participação do físico brasileiro Cesar Lattes em sua detecção).

Essa aula pode ser apresentada no formato “linha do tempo”, retomando os assuntos já estudados e apresentando os novos. Uma sugestão de linha do tempo pode ser acessada no link: <https://prezi.com/view/IgMJAnwYRqtGyKNpHns3/>.

Aula 15: As Partículas do Modelo Padrão

Na aula 15 deve ser feita uma exposição teórica abordando os seguintes pontos:

- A grande quantidade de partículas subatômicas descobertas a partir da década de 50 e a necessidade de organizá-las, de forma semelhante ao que foi feito na Tabela Periódica com os elementos químicos;
- O significado de “elementar” quando se fala em partículas subatômicas (retomando as

respostas dos alunos para a pergunta 6) das situações-problema);

- O que é o Modelo Padrão e como ele está organizado;
- Léptons, quarks e bósons;
- As interações fundamentais da natureza: gravitacional, eletromagnética, força fraca e força forte.

Na exposição, podem ser utilizados dois vídeos para trabalhar o bóson de Higgs:

- **'Partícula de Deus': como Bóson de Higgs explica o Universo**, produzido pela BBC News Brasil e disponível no link: <https://www.youtube.com/watch?v=FYTOIOxi6nk>;
- **Anúncio da detecção do Bóson de Higgs no Jornal Nacional**, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=P7ZCI5fX52M>.

Aula 16: Tabela do Modelo Padrão – Organizando a Construção

Nessa aula, o professor deve organizar a construção, pelos alunos, de uma Tabela do Modelo Padrão para ser fixada na parede da sala de aula. Inicia-se a aula dividindo os estudantes em doze equipes, e cada uma ficará responsável por uma ou duas partículas do Modelo Padrão, de acordo com a distribuição mostrada no Quadro 2.

Quadro 2 – Distribuição de partículas por equipes.

Equipe 1	Elétron e neutrino do elétron
Equipe 2	Múon e neutrino do múon
Equipe 3	Tau e neutrino do tau
Equipe 4	Quarks up e down
Equipe 5	Quarks charm e strange
Equipe 6	Quarks top e bottom
Equipe 7	Fótons
Equipe 8	Bósons W e Z
Equipe 9	Glúon
Equipe 10	Bóson de Higgs
Equipe 11	Bárions próton e nêutron
Equipe 12	Méson π

Fonte: a autora.

A quantidade de estudantes em cada equipe pode variar dependendo do número de alunos da turma. Apesar dos bárions e dos mésons não serem partículas elementares, escolheu-se distribuir para os estudantes pelo menos um representante de cada, para que os alunos também pudessem estudá-los.

Com o auxílio do professor, cada grupo deve, então, pesquisar as principais características das partículas pelas quais ficou responsável, incluindo sua massa, carga elétrica e spin. Para

essa pesquisa, o docente pode distribuir para os estudantes cópias do artigo “Sobre o Discreto Charme das Partículas Elementares”, de autoria da professora Maria Cristina Batoni Abdalla, publicado na revista Física na Escola, volume 6, número 1, 2005. O artigo pode ser acessado no link:

<https://www.sbfisica.org.br/fne/Vol6/Num1/charme.pdf>.

Aulas 17 e 18: Tabela do Modelo Padrão – Montagem e Apresentação

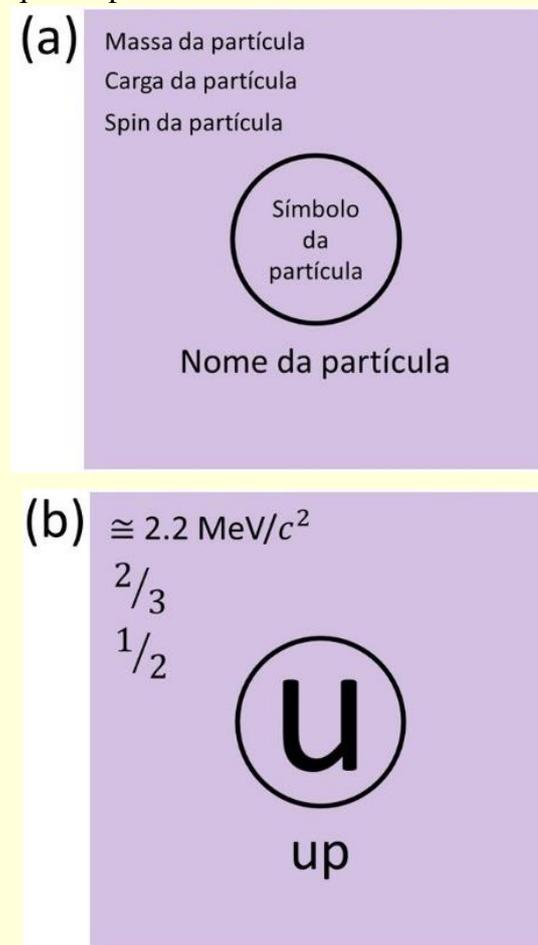
Na aula 17, os estudantes irão construir a Tabela do Modelo Padrão. Para essa construção, são utilizados os seguintes materiais:

- 17 cartões 20cmx20cm, sendo seis na cor verde, seis na cor lilás, quatro na cor rosa e um na cor amarela;
- Canetinha preta;
- Fita para fixação da tabela na parede.

Caso não seja possível obter cartões coloridos, pode-se utilizar cartões em branco e pintá-los de diferentes cores com tinta guache ou lápis de cor.

Após distribuir os materiais necessários, o professor pede que as equipes façam um cartão para cada partícula pela qual ficou responsável, seguindo o modelo mostrado na Figura 1.

Figura 1 – (a) Modelo para produção dos cartões. (b) Exemplo de cartão para o quark up.



Fonte: a autora.

Os alunos que ficaram com quarks devem utilizar os cartões lilases, os que ficaram com os léptons devem usar os cartões verdes e os que ficaram com os bósons devem usar os cartões em rosa, exceto os que ficaram com o bóson de Higgs, que devem utilizar o cartão amarelo. Por fim, os grupos que ficaram com os hádrons devem fazer uso dos cartões em azul. Podem ser utilizadas outras cores, desde obedeçam ao mesmo padrão de distribuição.

Na aula 17, finalizadas as produções dos cartões, o professor reúne os alunos no espaço

escolhido para afixação da tabela. Os estudantes deverão revezar-se para posicionar suas partículas até que seja obtida uma tabela do Modelo Padrão semelhante à mostrada na Figura 2.

Nesse momento, o professor deve incentivar os alunos a cooperarem para garantir a organização adequada da tabela.

Terminada a construção da tabela, os grupos apresentam sua partícula para o restante da turma, explicando suas propriedades e o papel desempenhado por ela no Modelo Padrão. As equipes que ficarem com os bárions e os mésons devem também explicar que essas partículas não são elementares.

Figura 2 – Tabela do Modelo Padrão.

Modelo Padrão das Partículas Elementares					
três gerações da matéria (férmions)					partículas mediadoras (bósons)
	I	II	III		
Massa	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
Carga	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u up	c charm	t top	g glúon	H higgs
QUARKS	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 γ fóton	BÓSONS ESCALARES
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e elétron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ múon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z bóson Z	BÓSONS VETORIAIS
LÉPTONS	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino do elétron	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino do múon	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino do tau	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W bóson W	
	HÁDRONS				
	BÁRIONS			MÉSONS	
	$\approx 0.940 \text{ GeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ n nêutron			$\approx 134.98 \text{ MeV}/c^2$ 0 0 π^0 pión neutro	
	$\approx 0.938 \text{ GeV}/c^2$ 1 $\frac{1}{2}$ p próton			$\approx 139.57 \text{ MeV}/c^2$ ± 1 0 π^\pm piões carregados	

Fonte: a autora.

ABDALLA, M. C. B. **O discreto charme das partículas elementares**. São Paulo: Editora UNESP, 2006a.

ABDALLA, M. C. B. Sobre o discreto charme das partículas elementares. **Física na Escola**, v. 6, n. 1, 2005b.

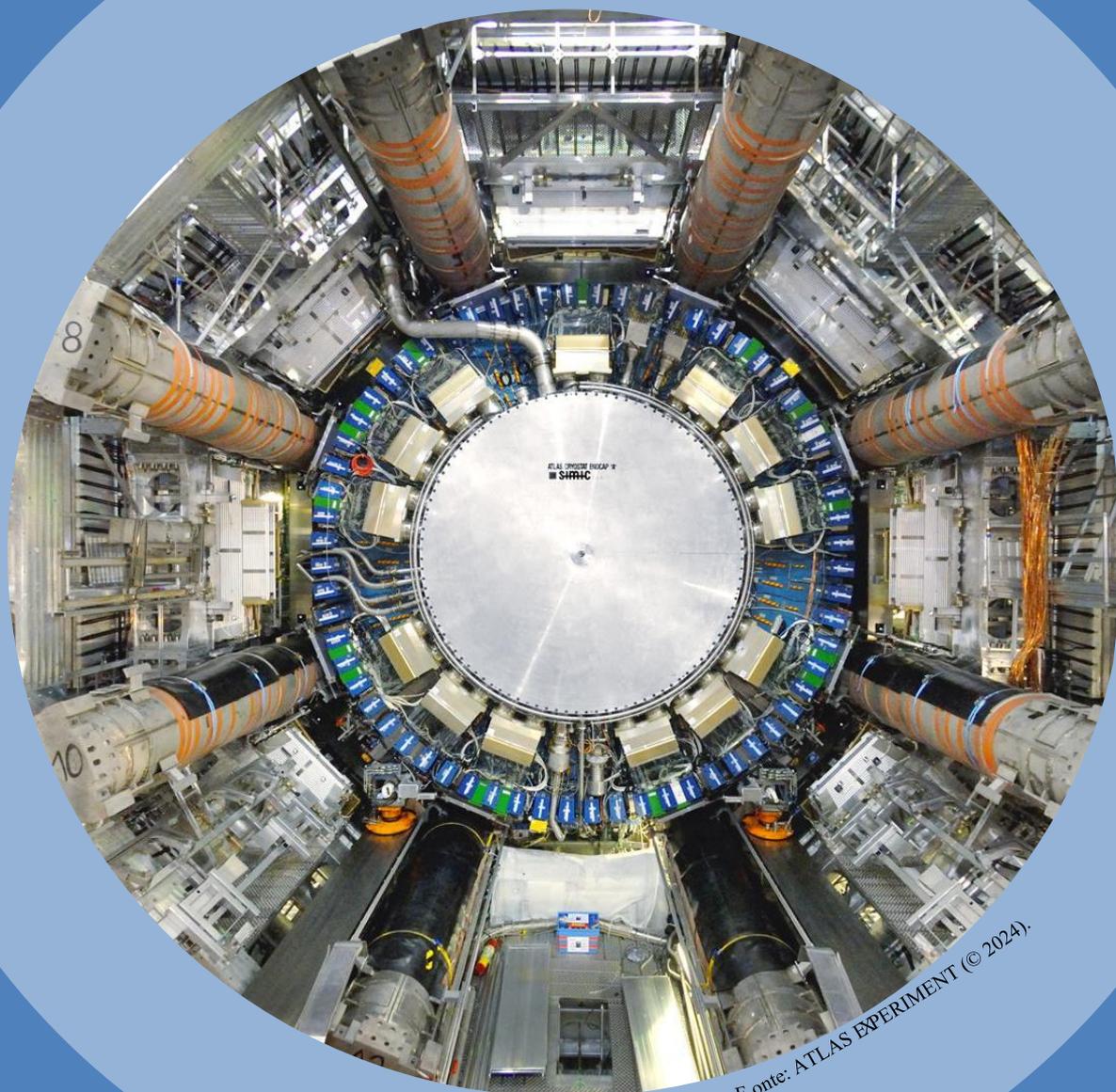
BBC News Brasil. ‘Partícula de Deus’: como Bóson de Higgs explica o Universo. YouTube, 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=FYTOIOxi6nk>. Acesso em: 19 mai. 2023.

FisicaNET. Anúncio da detecção do Bóson de Higgs no Jornal Nacional (2021/07/04). YouTube, 2012. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=P7ZCI5fX52M>. Acesso em: 19 mai. 2023.

MOREIRA, M. A. O modelo padrão da física de partículas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 1, 2009.

SEÇÃO 2

UNIDADE 3: MANUAL DO *MASTERCLASS*



Fonte: ATLAS EXPERIMENT (© 2024).

Apresentação

O material dessa Unidade foi desenvolvido com o objetivo de servir como guia para a realização do **Masterclass de física de partículas do experimento ATLAS**. O *Masterclass*¹ é um evento Internacional no qual os participantes têm a oportunidade de conhecer, de forma introdutória, a Física de Altas Energias e de analisar eventos reais registrados pelos experimentos do LHC, no CERN.

Foi criado pelo CERN e é atualmente promovido pelo *International Particle Physics Outreach* (IPPOG). No Brasil, é realizado desde 2008, e já contou com a participação de estudantes e professores de São Paulo, Minas Gerais, Ceará, Amazonas, Rio Grande do Norte, Paraná, Rio Grande do Sul, Tocantins, Mato Grosso do Sul e Pará.

Aqui, serão dadas as orientações para que você possa realizar o *MasterClass* com seus estudantes utilizando os eventos registrados pelo experimento ATLAS para procurar os bósons Z^0 e de Higgs! Estão disponíveis o passo a passo a ser seguido, os materiais necessários e um cronograma de divisão de aulas para o evento.

A próxima seção, intitulada “Orientações gerais para os estudantes”, contém o material de apoio que deve ser entregue aos alunos para que eles possam participar do *MasterClass*.

Mãos à obra!

Primeiro Passo para a Realização do *MasterClass*

O primeiro procedimento a ser adotado pelo professor que deseja realizar uma edição do *MasterClass* com seus estudantes é entrar em contato com a professora Dr^a. Marcia Begalli, por meio do email marcia.begalli@gmail.com.

Figura 1 - professora Marcia Begalli



Fonte: FERREIRA, [s.d].

A Dr^a. Begalli² é atualmente professora associada da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Trabalha com Física de Altas Energias, participando atualmente de dois experimentos: Dzero, no Fermilab, e ATLAS, no LHC, CERN. Organiza, desde 2008, o *MasterClass-Hands on Particle Physics* no Brasil, em parceria com o *International Particle Physics Outreach* (IPPOG) e o CERN.

A professora Begalli gentilmente autorizou a publicação de seu contato nesse manual e colocou-se à disposição para orientar o professor que deseja realizar o *MasterClass* acerca dos materiais que precisará e dos programas utilizados, bem como para tirar qualquer dúvida acerca desse evento.

Materiais Necessários

Para realizar o *MasterClass* com seus estudantes, você precisará providenciar computadores nos quais tenha sido instalado previamente o programa **HYPATIA** (*Hybrid Pupil's Analysis Tool for Interactions³ in ATLAS*). Cada computador pode ser utilizado por grupos de dois a quatro estudantes para a análise dos eventos.

Também será necessário realizar o download dos dados de colisões próton-próton que serão analisados.

Tutoriais (em inglês) para realizar o download e a instalação do HYPATIA nos sistemas LINUX e WINDOWS podem ser visualizados nos links abaixo:

- [Tutorial LINUX.](#)
- [Tutorial WINDOWS.](#)

Também é necessário realizar o download dos dados de colisões que serão utilizados no evento. A amostra de dados de acontecimentos está dividida em 20 pacotes, chamados diretórios. Cada diretório está subdividido em grupos de “A” a “T”, cada um contendo 50 eventos. O professor deve escolher um diretório e fazer seu download para posterior utilização.

O download dos dados de colisão a serem utilizados pode ser realizado pelo link: <https://cernmasterclass.uio.no/datasets/>.

Mãos à Obra: Realizando O *MasterClass*

Uma vez que os materiais necessários tenham sido providenciados, pode-se dar início à realização do *MasterClass*. Para tal, aconselha-se a utilização de, no mínimo, 6 aulas com duração de 50 minutos cada, de acordo com o cronograma abaixo:

- **Aula 19: preparação com os estudantes**

Na primeira aula, o professor deve informar aos estudantes que eles irão realizar O *MasterClass-Hands on Particle Physics*, e que utilizarão dados reais do experimento ATLAS para procurar os bósons Z^0 e de Higgs a partir dos traços deixados por seus decaimentos nesse detector.

Porém, antes de analisarem os eventos, os estudantes precisam passar por uma preparação. Assim, após explicar o que é o *MasterClass*, o docente deve retomar as respostas dos estudantes para a pergunta 7) das situações-problema: “Existem partículas tão pequenas que o nosso olho não consegue enxergar. Pensando nisso, você sabe como os cientistas descobrem uma nova partícula? Fale um pouco sobre isso”.

Após discutir as respostas com os alunos, pode-se utilizar uma apresentação de slides para trabalhar duas formas de se obter partículas subatômicas para estudo: raios cósmicos e aceleradores de partículas. Nessa última, é dado um enfoque no *Large Hadron Collider* (LHC),

no CERN, o maior acelerador em operação no mundo atualmente.

Em seguida, apresenta-se formas de identificar as partículas subatômicas por meio do “rastros” que deixam em detectores de partículas. Na parte de detectores, dá-se enfoque ao detector ATLAS, de acordo com o conteúdo apresentado no **Capítulo 4** desta Unidade. Esse enfoque deve ser dado porque os eventos que serão utilizados foram registrados pelo experimento ATLAS.

Por fim, o professor deve mostrar aos estudantes de que formas os bósons Z^0 e de Higgs podem decair, e como esses decaimentos são identificados nas camadas no detector ATLAS.

Uma sugestão de slides para serem utilizados nessa etapa encontra-se no link: https://docs.google.com/presentation/d/1YEUF_GNj4hAQxYPToaV8cxK6a9rTkxjh/edit?usp=sharing&ouid=110851559384606504269&rtfpof=true&sd=true.

- **Aula 20: conhecendo o HYPATIA**

Na segunda aula, os estudantes irão se familiarizar com o programa utilizado para a análise dos eventos do *MasterClass*, o HYPATIA. Para isso, os alunos precisam ser divididos em grupos de, no máximo, quatro integrantes. Cada grupo precisa ter acesso a um computador com o programa HYPATIA previamente instalado. O professor também precisa ter acesso a um computador com o HYPATIA e a um projetor.

O docente deve pedir aos estudantes que abram o HYPATIA nos computadores e apresentar cada parte do programa, de acordo com o conteúdo apresentado no **Capítulo 5** desta Unidade.

Por fim, o professor deve mostrar aos estudantes como identificar no programa os rastros deixados pelas partículas envolvidas no decaimento dos bósons Z^0 e de Higgs (elétron, pósitron, fótons e múons), de acordo com o conteúdo mostrado no tópico “Identificando Partículas” desse manual.

Para esse momento, podem ser usados os slides disponíveis no link: <https://docs.google.com/presentation/d/1ebos5mshCGEzz9lxEw5wRVk9evhKtNcA/edit?usp=sharing&ouid=110851559384606504269&rtfpof=true&sd=true>.

- **Aula 21: preparando-se para a análise dos eventos**

Uma vez que os estudantes já estejam familiarizados com o programa HYPATIA, está na hora de analisar os eventos e procurar pelos bósons Z^0 e de Higgs!

A análise dos eventos também acontecerá em grupos, que devem ser os mesmos da “aula 20”. Para essa atividade, primeiramente o professor deve entregar uma cópia da seção “Orientações gerais para os estudantes” desta Unidade para cada grupo de alunos. Essa cópia pode ser digital ou impressa, o importante é que seja colorida.

Cada equipe de estudantes ficará responsável pela análise de um dos grupos do diretório previamente escolhido e baixado pelo professor. Dependendo do número de estudantes, diferentes equipes podem ficar com o mesmo grupo de dados. Um exemplo de distribuição dos estudantes pode ser visto no Quadro 1.

Quadro 1 – exemplo de distribuição dos grupos de dados entre as equipes de estudantes.

Diretório escolhido: 02	
Equipe de estudantes	Grupo do diretório a ser analisado
1	Grupo “A”
2	Grupo “B”
3	Grupo “C”

Fonte: a autora.

Antes que os estudantes analisem os eventos dos grupos pelos quais ficaram responsáveis, é indicado que o professor realize duas ações:

AÇÃO 1: relembrar os decaimentos que serão procurados para o bóson Z_0 :

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

e para o bóson de Higgs:

- $H \rightarrow e^-e^+ + e^-e^+$
- $H \rightarrow \mu^-\mu^+ + \mu^-\mu^+$
- $H \rightarrow e^-e^+ + \mu^-\mu^+$
- $H \rightarrow \gamma + \gamma$

AÇÃO 2: pedir que todas as equipes de estudantes abram no HYPATIA o grupo “A” do diretório escolhido e analisar com eles os dez

primeiros eventos. Essa ação é importante para que os alunos possam tirar dúvidas que ainda tenham restado sobre a classificação dos eventos.

- **Aulas 22 e 23: analisando os eventos**

Essas duas aulas serão dedicadas à análise dos dados e à busca dos bósons Z^0 e de Higgs. A equipe responsável pelo grupo “A” do diretório continua as análises que já estavam sendo feitas. As demais equipes devem carregar no HYPATIA os dados dos grupos pelos quais ficaram responsáveis e realizar as análises.

Nesse momento, o professor atua como orientador, circulando entre as equipes e tirando as dúvidas que surgirem. Caso as aulas 22 e 23 não possam ser realizadas em conjunto, os estudantes podem salvar seu progresso para continuar as análises na aula seguinte.

Finalizada a vigésima terceira aula, os estudantes devem salvar seus resultados para posterior carregamento no OPLOT⁴. Esse site sintetiza os resultados no formato de um gráfico, que pode ser apresentado e explicado aos alunos. Só é possível carregar os dados para o OPLOT se houver um evento *MasterClass* previamente cadastrado nele. Assim, para conseguir acesso, é essencial que o professor esteja em contato com a prof^a. Dr^a. Marcia Begalli, pois ela poderá solicitar esse cadastro e ensiná-lo a utilizar o site.

- **Aula 24: fechamento e apresentação dos resultados**

No produto educacional, essa aula está inclusa na etapa “Aula expositiva dialogada integradora final”. Nela, além de retomar o conteúdo trabalhado na UEPS, o professor deve realizar o fechamento da atividade *MasterClass*. Nela, é interessante que o professor peça aos estudantes que compartilhem o que acharam de participar da experiência, o que mais gostaram e o que poderia ter sido diferente.

Por fim, deve-se apresentar aos estudantes o resultado das análises feitas por eles. Para tal, o professor deve carregar previamente os arquivos de análises salvos pelos estudantes no site OPloT.

Caro estudante!

Esse material foi desenvolvido com o objetivo de servir como guia para sua participação no *Masterclass* de Física de Partículas. No *Masterclass*, serão utilizados dados reais do experimento ATLAS, no LHC, no CERN, para procurar os bósons Z^0 e de Higgs!

Aqui, você aprenderá um pouco mais sobre o bóson Z^0 e o bóson de Higgs e verá como essas partículas podem ser produzidas em colisões próton-próton no *Large Hadron Collider*, em português, Grande Colisor de Hádrons (LHC), o maior acelerador em operação no mundo atualmente! Além disso, aprenderá a identificar partículas subatômicas, como o elétron, o pósitron, os múons e os fótons, analisando os traços deixados por elas nas camadas do detector ATLAS.

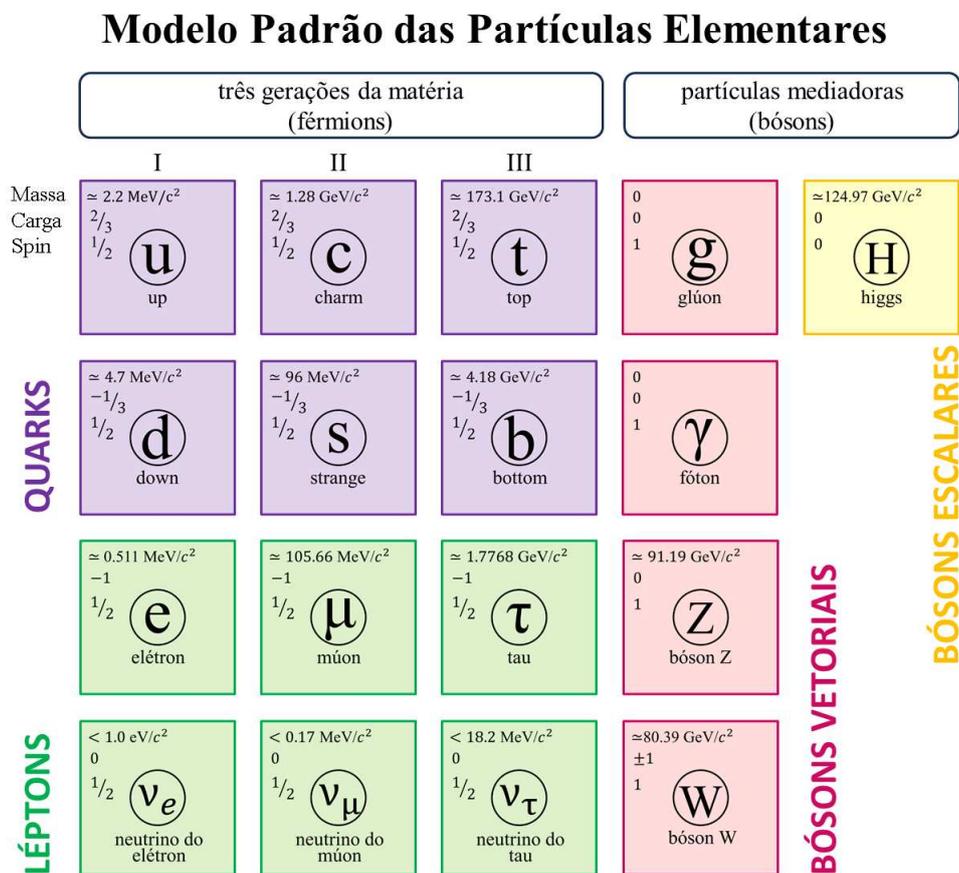
Por fim, aprenderá a utilizar o programa HYPATIA para analisar dados de colisões reais coletados pela experiência ATLAS. Utilizará esses dados para procurar decaimentos do bóson Z^0 (e terão também a oportunidade de procurar o bóson de Higgs, de forma semelhante aos físicos do ATLAS!).

Mãos à obra!

“Do que o Universo é feito?”. Essa é uma pergunta que desperta a curiosidade da humanidade há muitos anos. A busca pela resposta a essa pergunta levou ao desenvolvimento de vários modelos matemáticos que procuravam compreender a estrutura mais íntima da matéria.

O modelo melhor aceito atualmente chama-se Modelo Padrão das Partículas Elementares. De acordo com ele, tudo que existe no Universo é composto por partículas de matéria que interagem por meio de interações fundamentais mediadas por partículas de força. Esse modelo está sintetizado na Figura 1.

Figura 1 - O Modelo Padrão das Partículas Elementares.



Fonte: a autora.

As partículas de matéria dividem-se em léptons e quarks, enquanto as partículas mediadoras das interações fundamentais são os bósons de gauge. Existem quatro interações fundamentais: gravitacional, eletromagnética, nuclear fraca e nuclear forte. Todas, exceto a gravitacional, são mediadas por uma partícula presente no Modelo Padrão: a força eletromagnética é mediada pelo fóton, a nuclear fraca pelos bósons W e Z e a nuclear forte pelos glúons.

O bóson de Higgs completa o modelo sendo a partícula associada ao mecanismo por meio do qual todas as partículas massivas (incluindo o próprio bóson de Higgs) adquirem massa.

No *MasterClass*, os dados obtidos a partir do experimento ATLAS serão utilizados para detecção do bóson Z^0 . Entre os eventos selecionados, também existem candidatos a bósons de Higgs, que poderão ser identificados. Assim, vamos relembrar algumas características dessas partículas?

No Modelo Padrão das Partículas Elementares, o bóson Z^0 , junto aos bósons W^+ e W^- , é a partícula mediadora da força fraca. Ele tem massa aproximadamente igual a $91,19 \text{ GeV}/c^2$ e carga elétrica nula.

Seu tempo de vida média é muito pequeno. Assim, não é possível perceber a existência de bósons Z^0 no nosso cotidiano. Contudo, essas partículas existiram nas condições extremas do início do Universo e em explosões de supernovas.

O bóson Z pode ser produzido nas colisões altamente energéticas entre prótons que acontecem no interior do LHC. No detector ATLAS, esse bóson pode ser identificado por meio dos seus **decaimentos**.

O bóson Z possui um total de 21 possibilidades de decaimento, contudo, iremos nos concentrar apenas nos dois modos de decaimento mais fáceis:

- Decaimento em um par elétron-pósitron: $Z^0 \rightarrow e^- + e^+$
- Decaimento em um par múon-antimúon: $Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

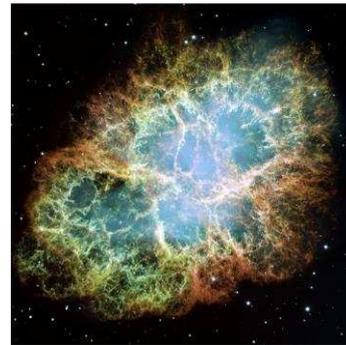
Serão esses decaimentos que iremos utilizar para identificar o bóson Z^0 no *MasterClass*.

VOCÊ SABIA?7

Uma supernova é uma explosão extremamente brilhante e poderosa. Ela acontece quando uma estrela que tenha massa de pelo menos cinco vezes a massa do nosso Sol queima todo o combustível de seu núcleo e se “apaga”. A explosão de uma supernova pode ser tão brilhante que ofusca suas galáxias por alguns dias ou até meses.

Apesar de não ser um evento muito comum, em 1504 DC foi possível observar da Terra a explosão de uma supernova. Ela ocorreu devido à morte de uma estrela massiva da nossa via Láctea, e deixou resquícios que formaram a Nebulosa do Caranguejo (Figura 2).

Figura 2 - A Nebulosa do Caranguejo.



Fonte: NASA (2010).

No Modelo Padrão das Partículas Elementares, o bóson de Higgs é a partícula associada ao mecanismo pelo qual todas as partículas massivas adquirem massa. Ela foi proposta pelos físicos François Englert, Robert Brout e Peter W. Higgs para explicar a aparente quebra de simetria associada à existência da força eletrofraca.

As forças eletromagnética e fraca foram unificadas em uma única força, a eletrofraca, pelos físicos Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam e Steven Weinberg (fato que lhes rendeu o prêmio Nobel de Física em 1979). Isso, porém, trazia um problema para o Modelo Padrão, pois as partículas mediadoras das forças eletromagnética e fraca são muito diferentes.

O fóton, mediador da força eletromagnética, não possui massa. Já os bósons W e Z, mediadores da força fraca, são massivos. Portanto, aparentemente a existência da força eletrofraca quebraria uma simetria do Modelo Padrão.

Englert, Brout e Higgs propuseram, então, um mecanismo segundo o qual o Universo nasceu simétrico, ou seja, à época do Big Bang, todas as partículas eram desprovidas de massa. Contudo, em fração de segundos após o Big Bang, um novo campo entra em ação: o campo de Higgs, associado a uma partícula denominada **bóson de Higgs**. Apenas as partículas que interagem com esse campo são capazes de adquirir massa.

O bóson de Higgs foi a última partícula do Modelo Padrão a ser confirmada experimentalmente. Tal fato

Figura 3 - O anúncio da detecção do bóson de Higgs.



Fonte: RAO (2022).

aconteceu em julho de 2012, quando as experiências ATLAS e CMS do LHC/CERN anunciaram a descoberta de um novo bóson, com carga nula, spin zero e massa de $125 \text{ GeV}/c^2$.

Não é possível identificar o bóson de Higgs diretamente no detector ATLAS. Faremos isso por meio de seus decaimentos:

- Decaimento em dois bósons Z, que decaem em dois pares de léptons:

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

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

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

- Decaimento em dois fótons: $H \rightarrow \gamma + \gamma$.

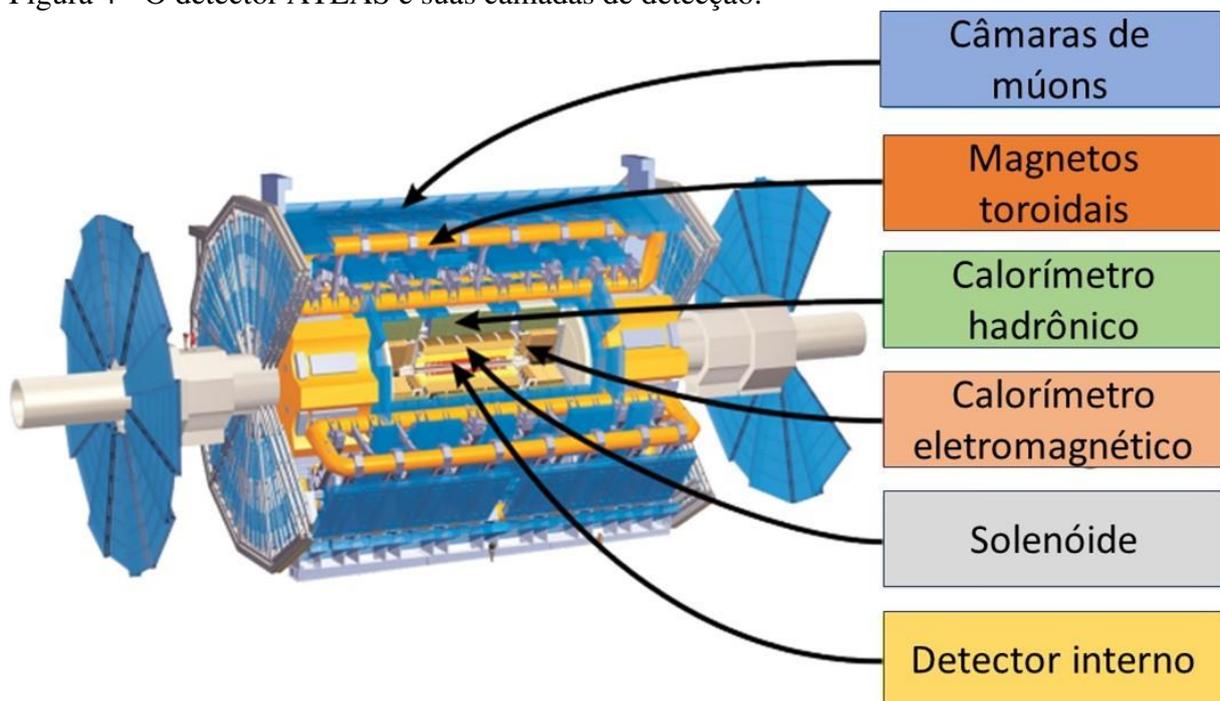
Serão esses decaimentos que iremos utilizar para identificar o bóson de Higgs no *MasterClass*.

ATLAS significa “A Toroidal LHC Apparatus”, em português: um aparato toroidal para o LHC. Ele é um detector de partículas instalado na caverna do LHC (Grande Colisor de Hádrons), o maior acelerador de partículas em operação no mundo atualmente.

O detector ATLAS foi construído com o objetivo de investigar uma ampla gama de física, desde o bóson de Higgs (cuja descoberta em 2012 contou com a colaboração de dados obtidos pelos detectores do ATLAS) até dimensões extras e possíveis partículas constituintes de matéria escura. Ele possui 46 m de comprimento, 25 m de largura e 25 m de altura, com uma massa de 7000 toneladas. Está localizado 100 m abaixo do solo, perto da vila de Meyrin, na Suíça.

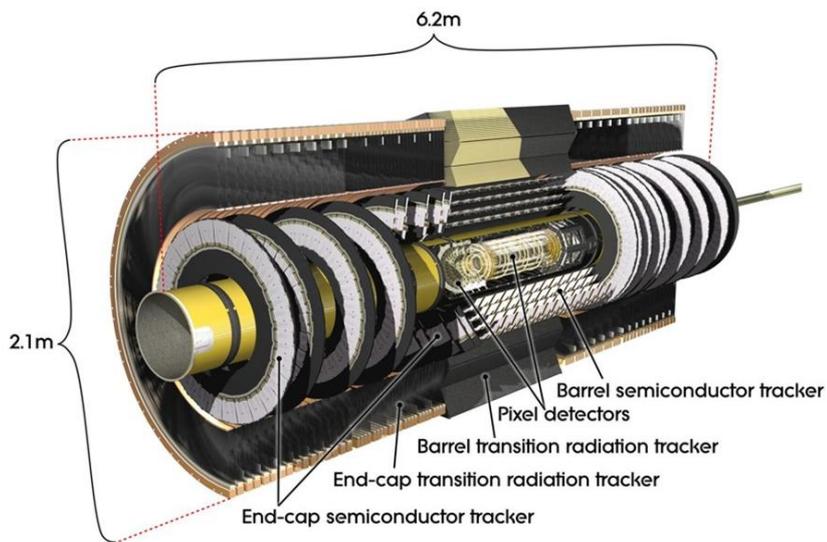
No interior do detector ATLAS, feixes de partículas vindos do LHC colidem, formando novas partículas que voam em todas as direções. Ao passar pelo detector, as partículas produzidas nessa colisão deixam sinais eletrônicos (semelhante a uma pessoa que deixa pegadas ao caminhar na areia da praia; é como se cada partícula tivesse a própria “pegada”). O detector ATLAS possui várias camadas, cada uma com a função de detectar partículas com características próprias. A Figura 4 - O detector ATLAS e suas camadas de detecção. mostra uma visão geral do detector ATLAS e de suas camadas. As figuras Figura 5, Figura 6 e Figura 7 trazem informações mais detalhadas sobre as camadas do detector.

Figura 4 - O detector ATLAS e suas camadas de detecção.



Fonte: adaptada de PEIXOTO (2022).

Figura 5 - O detector interno do ATLAS.

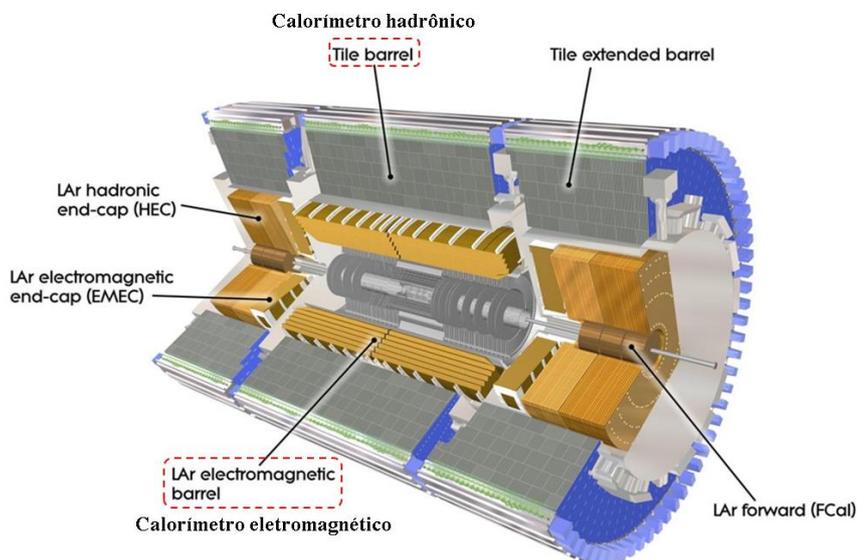


Fonte: adaptada de INTERNATIONAL MASTERCLASS [s.d].

DETECTOR INTERNO

Detecta partículas com carga elétrica e mede suas posições em função do tempo. A interação entre as partículas e o material do detector interno é muito pequena, portanto há apenas um pequeno depósito de energia nessa parte do detector.

Figura 6 - Os calorímetros do detector ATLAS.



Fonte: adaptada de INTERNATIONAL MASTERCLASS [s.d].

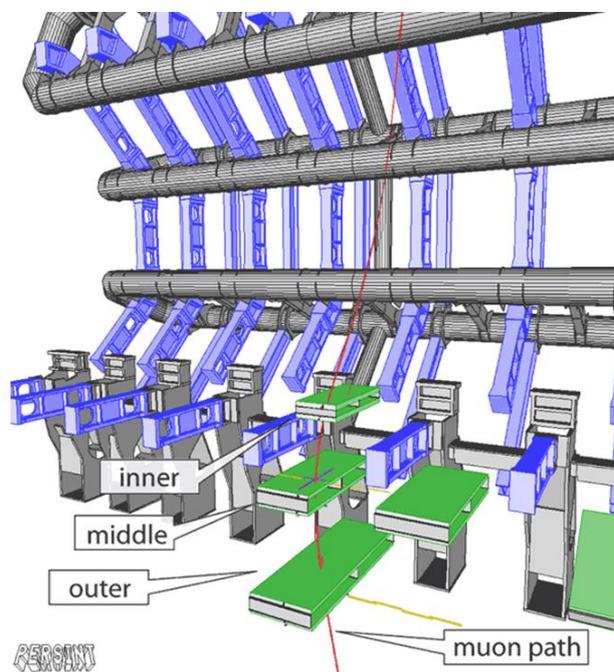
CALORÍMETRO ELETROMAGNÉTICO

Detecta partículas que interagem com a matéria majoritariamente através da interação eletromagnética (principalmente fótons, elétrons e pósitrons). Quase toda a energia dessas partículas é absorvida no calorímetro e transformada em sinal elétrico.

CALORÍMETRO HADRÔNICO

Detecta partículas que interagem com a matéria majoritariamente através da interação forte, como as constituídas por quarks e antiquarks (por exemplo, prótons e nêutrons).

Figura 7 - A câmara dos múons.



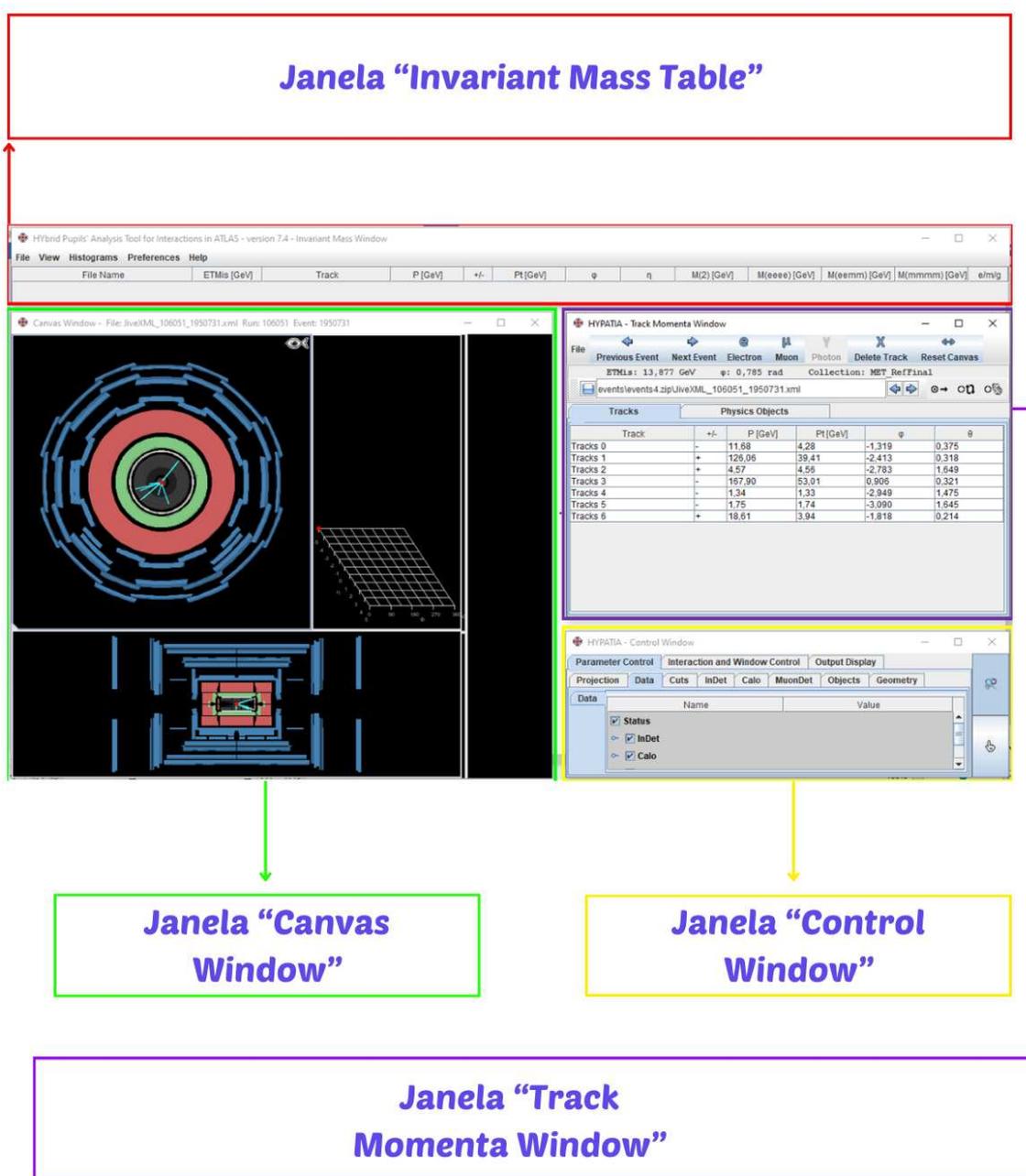
CÂMARA DOS MÚONS

Os múons, junto aos neutrinos, são as únicas partículas que atravessam todas as camadas do detector ATLAS. Assim, para detectar os múons, coloca-se detectores, chamados Câmara dos múons, na camada exterior ao ATLAS. Sua função é detectar múons provenientes da colisão no interior do detector.

Fonte: adaptada de INTERNATIONAL MASTERCLASS [s.d].

Os sinais elétricos registrados pelos detectores durante uma colisão são transformados em imagens, que podem ser analisadas para identificar as partículas resultantes da colisão. Para realizar essa análise, utilizaremos o programa HYPATIA. Ele é constituído por quatro janelas, cada uma com uma função específica. Veja, na Figura 8, as janelas do programa HYPATIA.

Figura 8 – As janelas do programa HYPATIA.



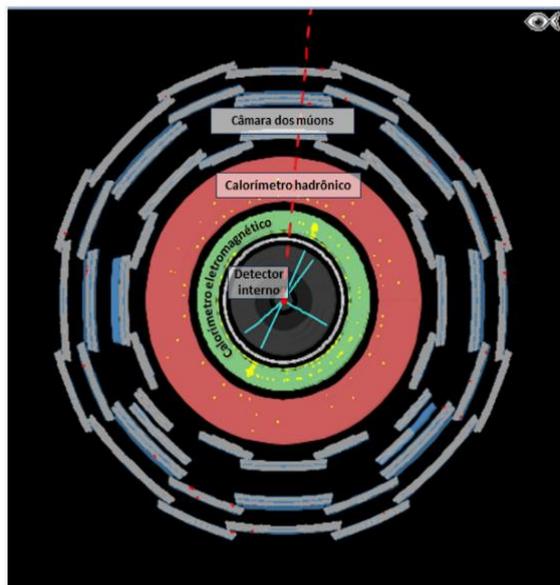
Fonte: adaptada de HYPATIA [...], (2014).

8.1. HYPATIA: CANVAS WINDOW

Nessa janela são mostrados o detector e o evento, conforme apresentado na Figura 9. Do detector, são vistas duas projeções bidimensionais. Na parte de cima, tem-se a vista do detector segundo a linha do feixe - chamada **vista transversal**. Na parte de baixo, tem-se a **vista lateral** do detector. Cada evento tem um título, que pode ser visto no topo da janela (veja a seta vermelha na Figura 9).

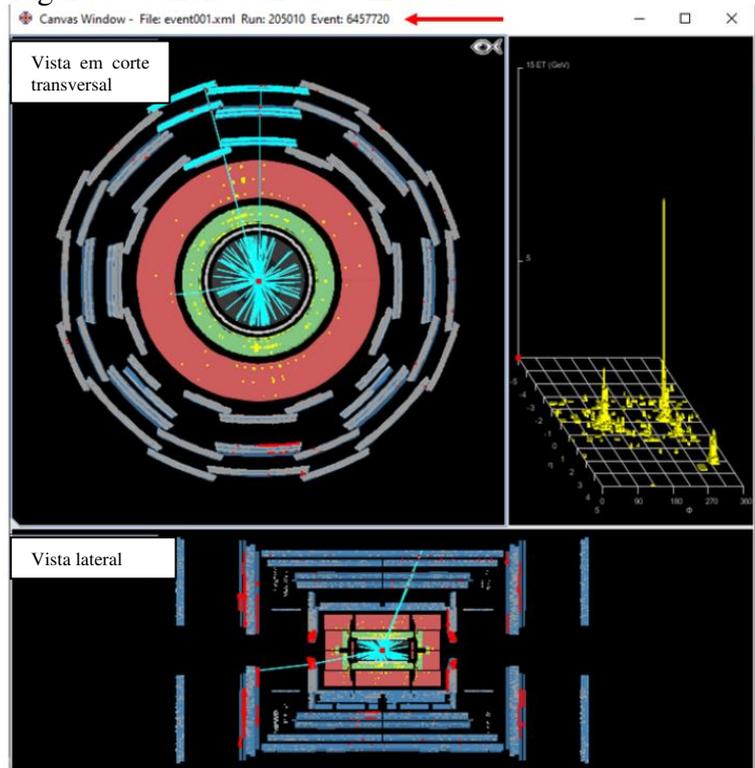
Tanto na visão transversal quanto na visão lateral, as diferentes camadas do Detector são ilustradas em cores diferentes. Veja na Figura 10.

Figura 10 – Detalhe da vista em corte transversal, mostrando como as camadas do detector são representadas.



Fonte: adaptada de HYPATIA [...], (2014).

Figura 9 - Janela Canvas Window.



Fonte: adaptada de HYPATIA [...], (2014).

- Detector interno: **cinza**.
- Calorímetro eletromagnético: **verde**;
- Calorímetro hadrônico: **vermelho**;
- Câmara dos múons: **azul**.

FIQUE ATENTO!

Observe que os caminhos percorridos pelas partículas eletricamente carregadas são mostrados como traços coloridos (em azul) no detector interno. Os depósitos de energia deixados por essas partículas, tanto no calorímetro eletromagnético quanto no hadrônico, são vistos como quadradinhos amarelos.

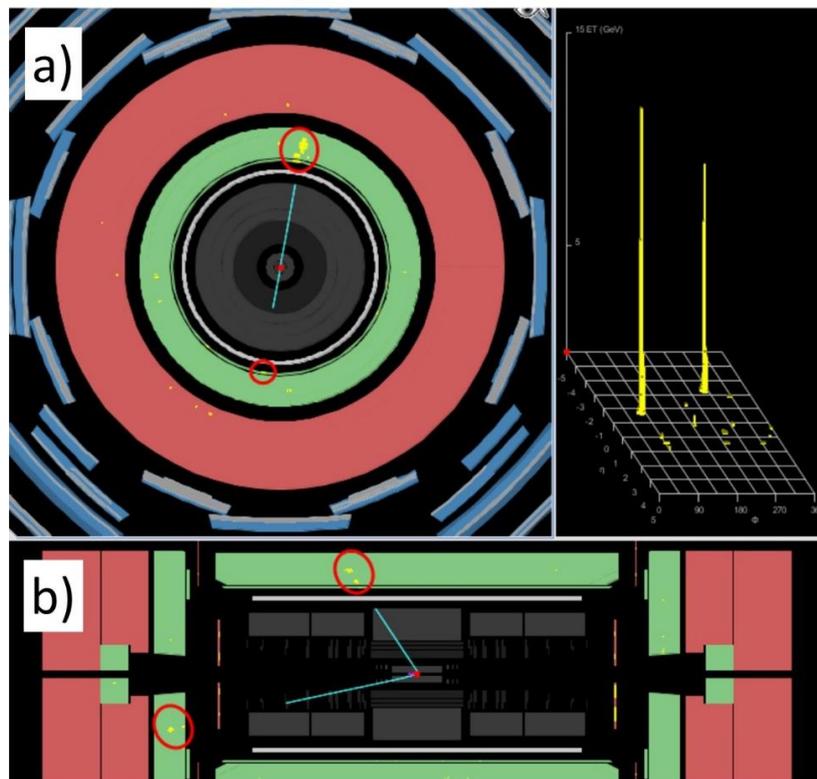
Neste capítulo, você aprenderá a identificar, no HYPATIA, as partículas envolvidas nos decaimentos dos bósons Z^0 e de Higgs a partir dos sinais deixados por elas nas camadas do detector ATLAS.

9.1. Elétron e Pósitron

Os elétrons e os pósitrons deixam traço no detector interno e depositam toda a sua energia no calorímetro eletromagnético. Vamos entender como essas características são vistas no HYPATIA?

Na Figura 11, vemos a “*Canvas Window*” de um evento. A Figura mostra as assinaturas e os depósitos na visão transversal- Figura 11(a) - e lateral - Figura 11(b). Nela, é possível ver duas assinaturas (traços azuis) vindo do ponto de colisão (pontinho vermelho ao centro) no detector interno. A cada traço, pode ser associado um depósito de energia no calorímetro eletromagnético: são os quadradinhos amarelos (que estão circulados em vermelho para destaque). Os depósitos de energia precisam ser observados tanto na vista em corte transversal quanto na vista lateral.

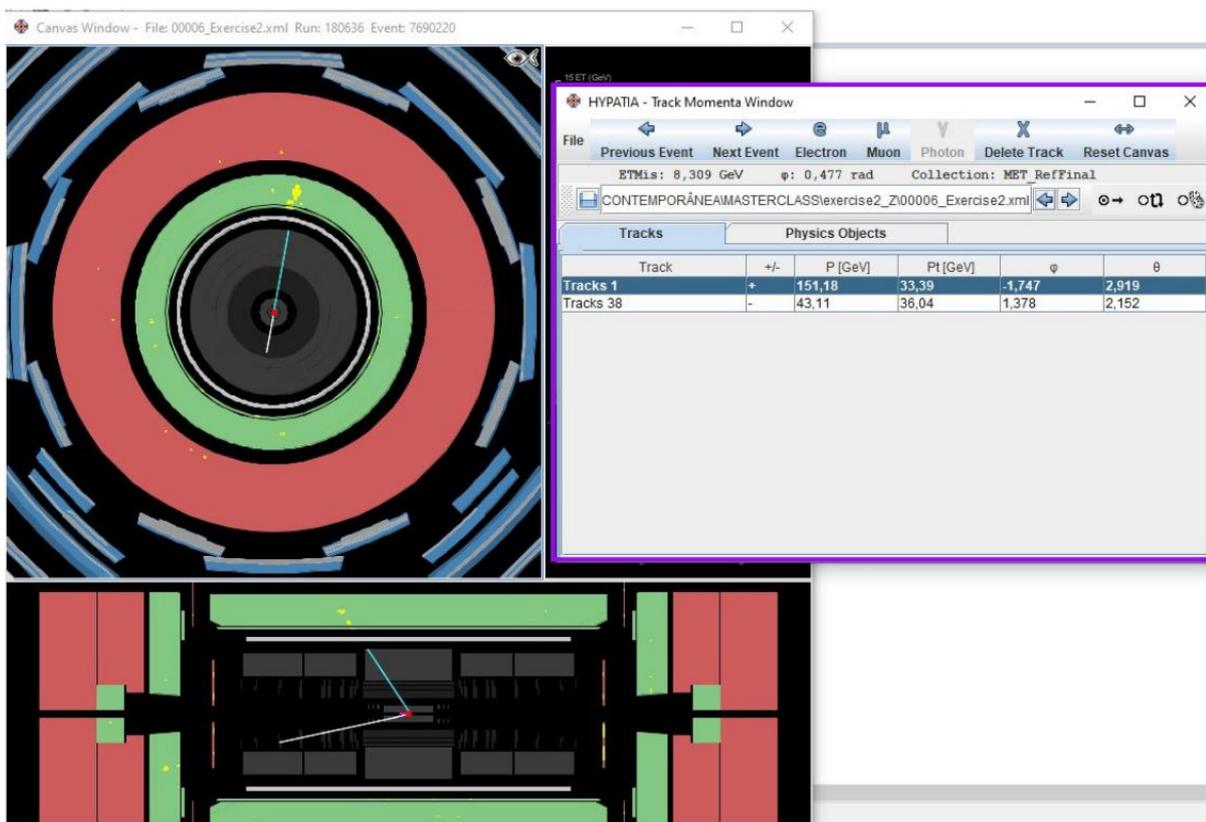
Figura 11 - Assinaturas no detector interno e depósitos de energia no calorímetro eletromagnético a) vista transversal; b) vista lateral.



Fonte: adaptada de HYPATIA [...], (2014).

Como os traços depositam toda a sua energia no calorímetro eletromagnético e deixam traço no detector interno, só podem representar **elétrons** ou **pósitrons**. Como diferenciá-los? Olhamos para a “*Track Momenta Window*”.

Figura 12 – *Track Momenta Window* colocada ao lado da *Canvas Window* para o mesmo evento mostrado na Figura 11.



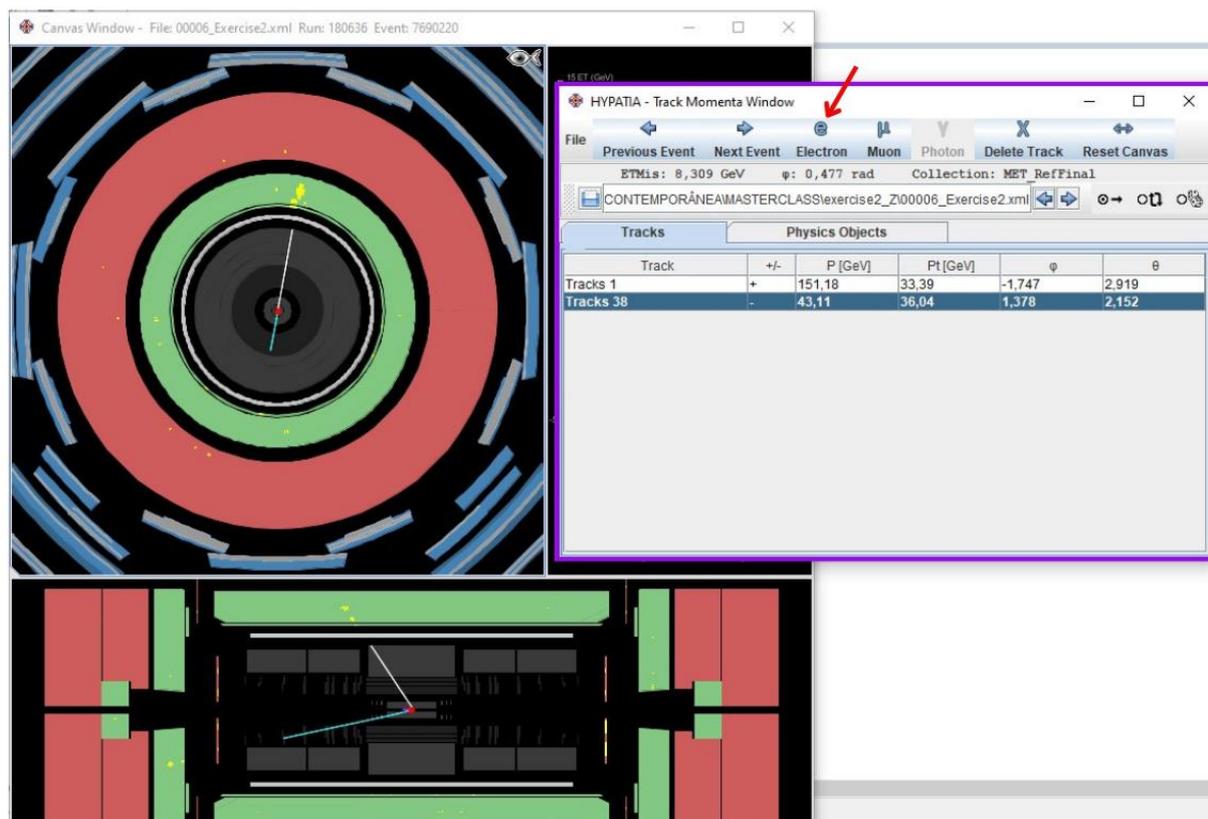
Fonte: adaptada de HYPATIA [...], (2014).

Observe que na janela “*Track Momenta Window*” (destacada em roxo na Figura 12) existem dois registros: “*Tracks 1*” e “*Tracks 38*”. Na imagem acima, “*Tracks 1*” está selecionado. Observe que o traço inferior no detector interno na “*Canvas Window*” ficou branco. Isso significa que esse traço corresponde ao “*Tracks 1*”.

Também na “*Track Momenta Window*” é possível ver que o “*Tracks 1*” tem sinal positivo, portanto ele só pode ser um **pósitron**.

Veja agora, na Figura 13, o que acontece quando selecionamos “*Tracks 38*” na “*Track Momenta Window*”. Para fazer essa seleção, basta clicar com o botão esquerdo do mouse em cima do nome “*Tracks 38*” na “*Track Momenta Window*”. Veja que o traço superior do detector interno na “*Canvas Window*” ficou branco. Isso significa que esse traço corresponde ao “*Tracks 38*”.

Figura 13 – Analisando o *Tracks* 38.



Fonte: adaptada de HYPATIA [...], (2014).

Também na “*Track Momenta Window*” da Figura 13 é possível ver que o “*Tracks 38*” tem sinal negativo, portanto ele só pode ser um **elétron**.

Parabéns, você acabou de identificar um par elétron-pósitron como produto de uma colisão! E agora, como registrar essa descoberta? Você deve selecionar cada traço por vez em “*Track Momenta Window*” e marcar a opção “*Electron*” (descatada pela seta vermelha na Figura 13). Suas escolhas ficarão registradas na janela “*Invariant Mass Window*”, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 – Classificação dos traços registrados na *Invariant Mass Window* para o evento contendo elétrons e pósitrons.

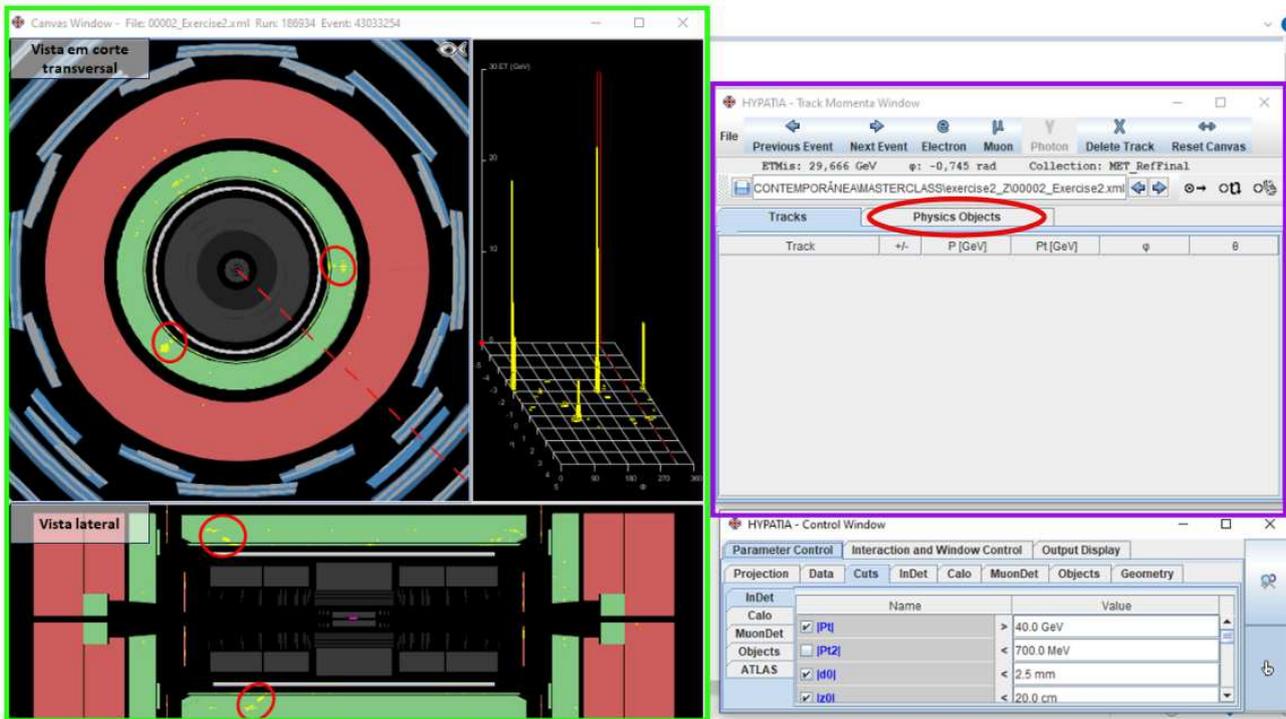
File Name	ETMis [GeV]	Track	P [GeV]	+/-	Pt [GeV]	ϕ	η	M(Z) [GeV]	M(eeee) [GeV]	M(eemm) [GeV]	M(mmmm) [GeV]	e/m/g
00006_Exercise2.xml	8,309	Tracks 38	43,1	-	36,0	1,378	-0,617	92,003				e
		Tracks 1	151,2	+	33,4	-1,747	-2,191					e

Fonte: adaptada de HYPATIA [...], (2014).

9.2. Fótons

Os fótons não possuem carga elétrica, portanto não deixam sinal no detector interno do ATLAS. Porém, você deve se lembrar que os fótons são as partículas que carregam a interação eletromagnética, portanto, eles depositarão toda a sua energia no calorímetro eletromagnético. Vamos analisar um novo evento, mostrado na Figura 15, usando o HYPATIA:

Figura 15 – Evento contendo fótons no HYPATIA.

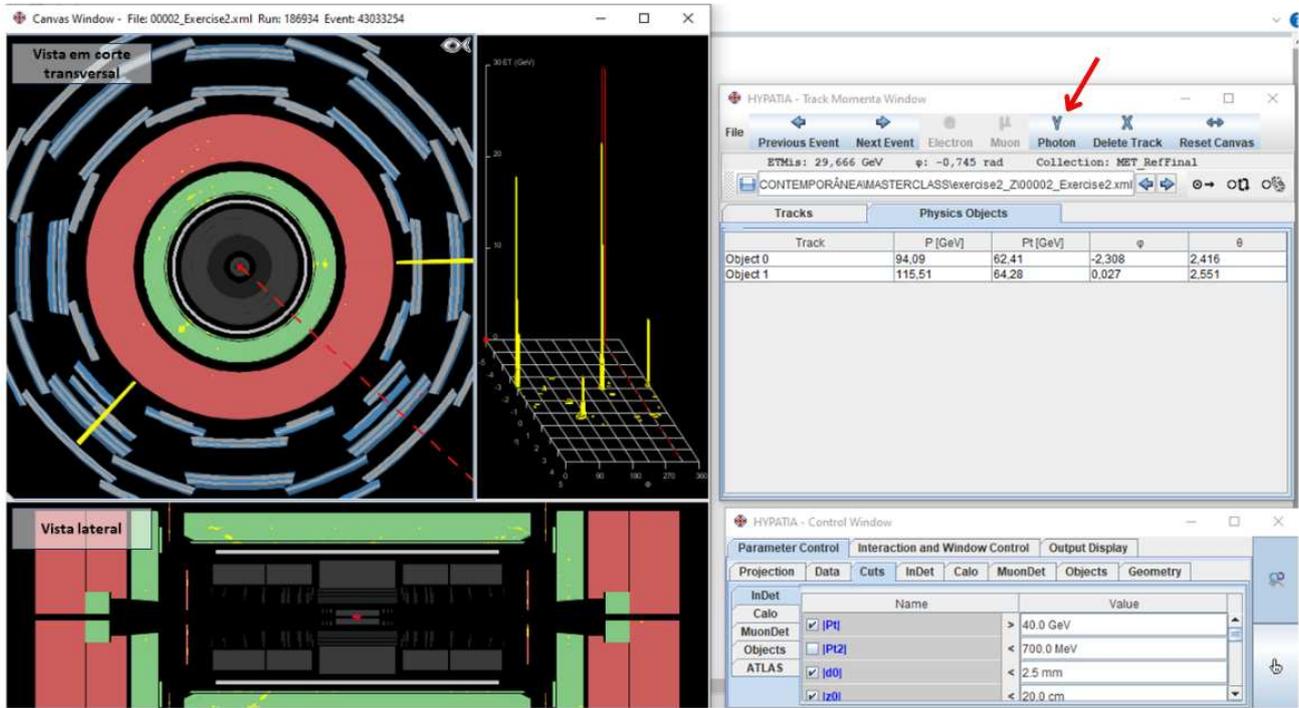


Fonte: adaptada de HYPATIA [...], (2014).

Observe a “*Canvas Window*” (destacada em verde) da Figura 15. Nela, é possível ver claramente dois depósitos de energia no calorímetro eletromagnético: são os quadradinhos amarelos (que estão circulos em vermelho para destaque). Porém, no detector interno, não há traços associados a esses depósitos de energia. Isso significa que as partículas que deixaram energia no calorímetro eletromagnético não possuem carga elétrica, e são boas candidatas a serem **fótons**.

Para confirmarmos, observamos a “*Track Momenta Window*” (destacada em lilás), na Figura 15. Veja que não há *track* algum na janela. Os fótons ficam registrados apenas em “*Physics Objects*”. Assim, para confirmarmos se existem mesmo fótons no evento, devemos clicar com botão direito do mouse em “*Physics Objects*”, circulado em vermelho na Figura 15. Veja, na Figura 16, o que acontece quando clicamos em “*Physics Objects*” na “*Track Momenta Window*”.

Figura 16 – *Physics object* para o evento da Figura 33.



Fonte: adaptada de HYPATIA [...], (2014).

Dois objetos físicos apareceram na “*Track Momenta Window*”, denominados “*Object 0*” e “*Object 1*”, e estão representados pelos retângulos sólidos amarelos na “*Canvas Window*”. Esses retângulos não são reais, eles aparecem no programa para indicar que as deposições de energia que estão sendo observadas têm probabilidade de ser um fóton. O tamanho dos retângulos é proporcional à probabilidade da deposição de energia para a qual eles apontam ser um fóton. É possível existirem eventos onde haja três retângulos indicando fótons, dois com retângulos maiores (maior probabilidade) e um com retângulo menor (menor probabilidade); nesse caso, escolhe-se os fótons com alta probabilidade.

Assim, no evento mostrado na Figura 16, é altamente provável que exista um par de **fótons** resultantes de uma colisão!

Para registrar sua descoberta, você deve selecionar cada *object* por vez em “*Track Momenta Window*” e marcar a opção “*Photon*” (descatada pela seta vermelha na Figura 16). Suas escolhas ficarão registradas na “*Invariant Mass Window*”, como mostra a Figura 17.

Figura 17 - Classificação dos traços registrados na *Invariant Mass Window* para o evento contendo fótons.

The screenshot shows the 'Invariant Mass Window' with a table of track classification data:

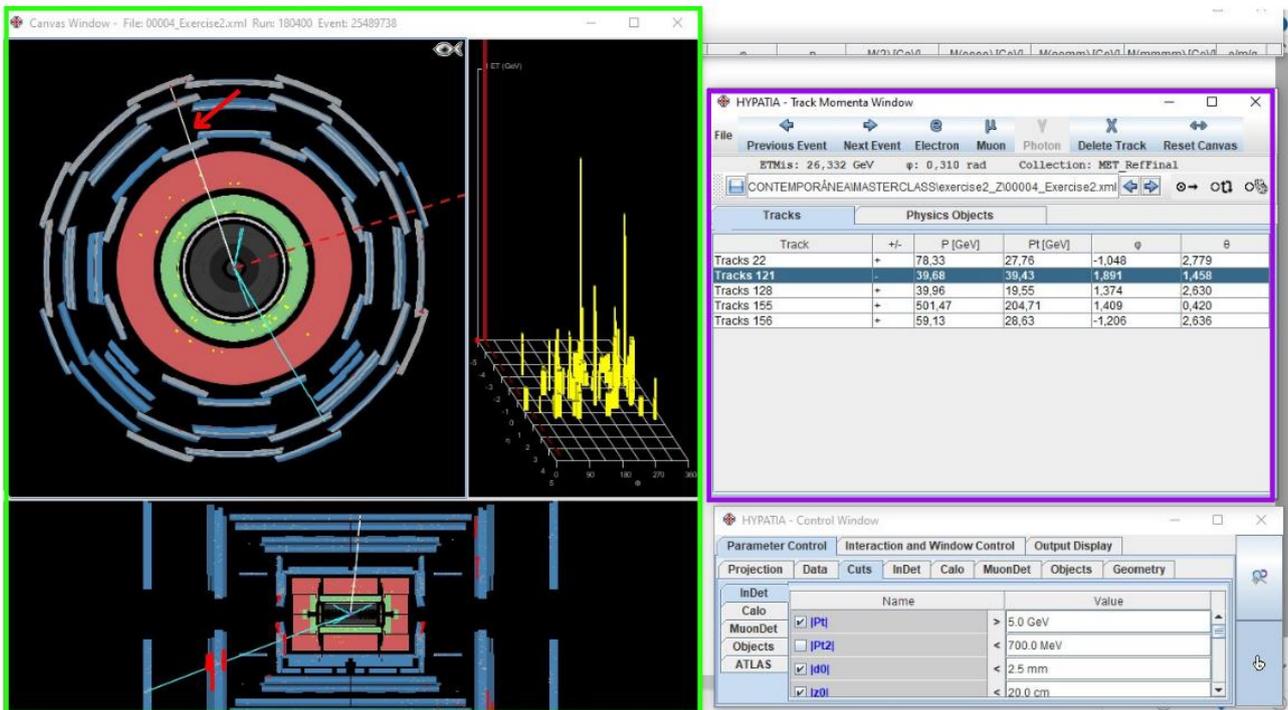
File Name	ETMis [GeV]	Track	P [GeV]	+/-	Pt [GeV]	η	ϕ	M(2) [GeV]	M(eeee) [GeV]	M(eemm) [GeV]	M(mmmm) [GeV]	etm/g
00002_Exercise2.xml	29.666	Object 0	94.1		62.4	-2.308	-0.989	117.352				0
		Object 1	115.5		64.3	0.027	-1.191					0

Fonte: adaptada de HYPATIA [...], (2014).

9.3. Múons

É simples identificarmos múons no HYPATIA, pois eles são as únicas partículas que deixam traço em todas as camadas do detector. Também são as únicas que chegam na câmara dos múons. A Figura 18 mostra um evento no HYPATIA que contém dois múons.

Figura 18 - Evento contendo múons no HYPATIA.



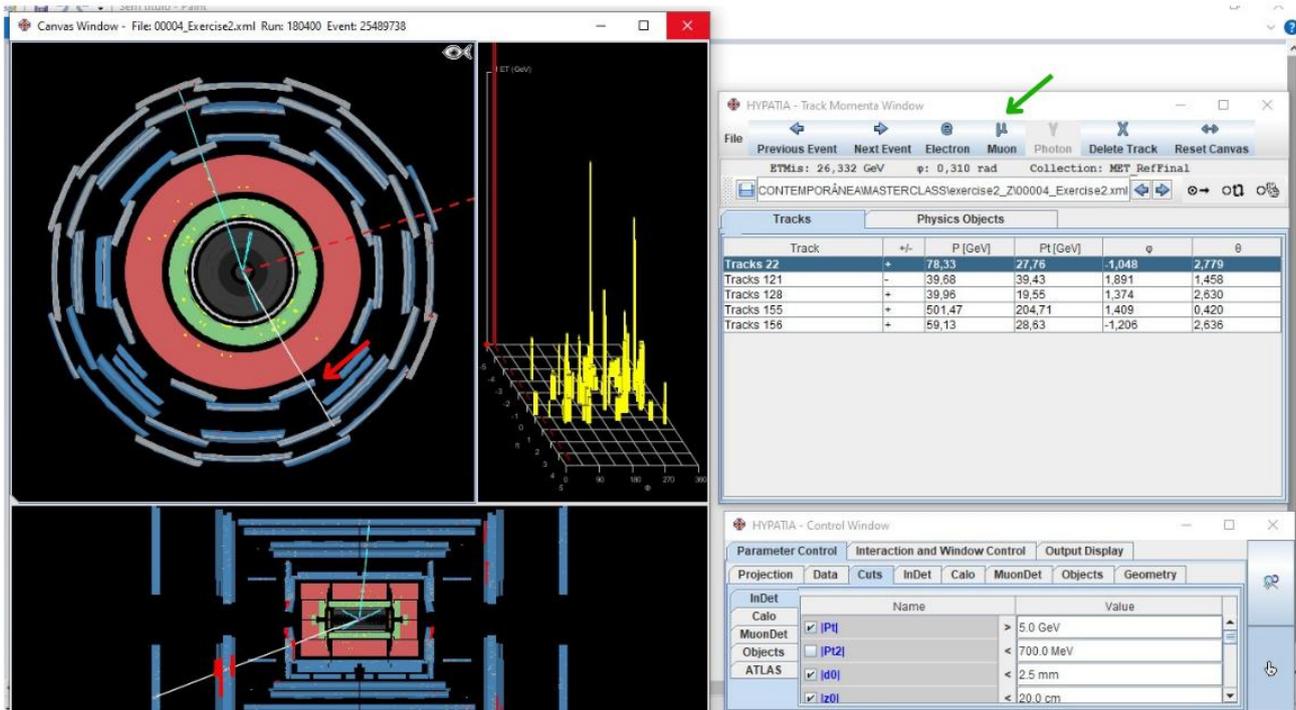
Fonte: adaptada de HYPATIA [...], (2014).

Fique atento à “Track Momenta Window” (destacada em lilás na Figura 18), pois existem vários tracks registrados, mas nem todos são referentes aos múons. Para descobrir, quais são os tracks de nosso interesse, clique nos traços referentes aos múons na “Canvas Window” (destacada em verde na Figura 18).

Na “Canvas Window” da Figura 18, clicou-se no traço do múon apontado pela seta vermelha. Observe que o “Tracks 121” na “Track Momenta Window” ficou destacado, portanto, esse é o track associado ao múon em questão.

Veja agora, na Figura 19, que, ao clicarmos no segundo múon (indicado pela seta vermelha da Figura 19), o “Tracks 22” na “Track Momenta Window” ficou destacado, portanto, esse é o track associado ao múon em questão.

Figura 19 – *Track Momenta Window* para o evento com múons.



Fonte: adaptada de HYPATIA [...], (2014).

Parabéns, você acabou de detectar um par **múon-antimúon** vindo da colisão! Para registrar sua descoberta, na “*Track Momenta Window*”, você deve selecionar “*Track 22*” e marcar a opção “*Muon*” (indicada pela seta verde na Figura 19), e em seguida selecionar “*Track 121*” e marcar novamente a opção “*Muon*”. Suas escolhas ficarão registradas na “*Invariant Mass Window*”, conforme mostra a Figura 20.

Figura 20 - classificação dos traços registrados na *Invariant Mass Window* para o evento contendo múons.

File Name	ETMis [GeV]	Track	P [GeV]	+/-	Pt [GeV]	η	θ	M(2) [GeV]	M(eeee) [GeV]	M(eemm) [GeV]	M(mmmm) [GeV]	e/m/g
00004_Exercise2.xml	26.332	Tracks 22	78.3	+	27.8	-1.048	-1.096	94.954				m
		Tracks 121	39.7	-	39.4	1.891	0.113					m

Fonte: adaptada de HYPATIA [...], (2014).



FIQUE ATENTO!

Existem outras partículas que podem ser identificadas analisando-se os traços que elas deixam nas camadas do detector, contudo, fótons, múons, elétrons e pósitrons serão as partículas de interesse para estudarmos o decaimento do bóson Z^0 (e, quem sabe, detectar um Higgs!).

CERN. ATLAS. Disponível em: <https://www.home.cern/science/experiments/atlas>. Acesso em: 27 set. 2023.¹¹

CNPQ. Currículo do sistema de Currículos Lattes. Informações sobre a Dr. Marcia Begalli. Disponível em: <http://lattes.cnpq.br/5447016634798000>. Acesso em: 20 set. 2023.²

FERREIRA, L. Marcia Begalli. **Open Box da Ciência**, [s.d]. Disponível em: <https://www.openciencia.com.br/portfolio/destaque-exatas/>. Acesso em: 20 set. 2023.

FÍSICA PARA UNIVERSIDADES E CONCURSO. Minicurso 7 (Parte 1): MasterClass – Física de Partículas. YouTube, 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Z6zwuEYSa-s>. Acesso em: 20 set. 2023.¹

HYPATIA - Hybrid Pupil's Analysis Tool for Interactions in ATLAS. Versão 7.4. [S.l]: ATLAS Experiment, 2014.

INTERNATIONAL MASTERCLASS – HANDS ON PARTICLE PHYSICS. O Bosão de Higgs. Disponível em: https://atlas.physicsmasterclasses.org/pt/zpath_hboson.htm. Acesso em: 25 set. 2023.⁸

INTERNATIONAL MASTERCLASS – HANDS ON PARTICLE PHYSICS. O Bosão Z. Disponível em: https://atlas.physicsmasterclasses.org/pt/zpath_zboson.htm. Acesso em: 25 set. 2023.⁶

INTERNATIONAL MASTERCLASS – HANDS ON PARTICLE PHYSICS. O detector ATLAS. Disponível em: https://atlas.physicsmasterclasses.org/pt/zpath_atlas.htm. Acesso em: 27 set. 2023.¹²

INTERNATIONAL MASTERCLASS – HANDS ON PARTICLE PHYSICS. O Modelo Padrão. Disponível em: https://atlas.physicsmasterclasses.org/pt/zpath_sm.htm. Acesso em: 25 set. 2023.⁵

INTERNATIONAL MASTERCLASS – HANDS ON PARTICLE PHYSICS. Visualização de Acontecimentos com o HYPATIA. Disponível em: https://atlas.physicsmasterclasses.org/pt/zpath_teilchenid2.htm. Acesso em: 27 set. 2023.¹³

NASA SCIENCE. Space Place – Explore Earth and Space!, [s.d]. Disponível em: <https://spaceplace.nasa.gov/supernova/en/>. Acesso em: 26 set. 2023.⁷

NASA. The Crab Nebula, 2010. Disponível em: <https://science.nasa.gov/missions/hubble/the-crab-nebula/>. Acesso em: 26 set. 2023.

OPlOT – MasterClass with CERN – Start Page, [s.d]. Disponível em: <https://zpathweb.hepp.uiocloud.no/OPlOT/index.php>. Acesso em: 27 set. 2023.

PEIXOTO, A. A experiência ATLAS. 14^a Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa. **Anais...**, 2022. Meyrin. Disponível em: https://indico.cern.ch/event/1087844/contributions/5007569/attachments/2504870/4303693/IntroducaoATLAS_PTLTP_AnaPeixoto_08092022.pdf. Acesso em: 10 dez. 2023.

Rao, A. The Higgs announcement as open science. **Nat Rev Phys**, v. 4, 2022.

The Higgs boson, back to the basics. [S. l.]: **CERN**, 2021. 1 vídeo (4min). Disponível em: <https://videos.cern.ch/record/2757407>. Acesso em: 25 set. 2023.⁹

What's so special about the Higgs boson? **CERN**, © 2023. Disponível em: <https://home.cern/science/physics/higgs-boson/what>. Acesso em: 25 set. 2023.¹⁰