

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO ESTADO
DO RIO GRANDE DO NORTE

IFRN CAMPUS SANTA CRUZ

CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

FRANCISCO MÚCIO FERREIRA DA SILVA

**O CONCEITO DE ANTIMATÉRIA E UMA ANÁLISE DA SUA
UTILIZAÇÃO EM AULAS DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO**

SANTA CRUZ

2023

FRANCISCO MÚCIO FERREIRA DA SILVA

**O CONCEITO DE ANTIMATÉRIA E UMA ANÁLISE DA SUA
UTILIZAÇÃO EM AULAS DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO**

Monografia apresentada como trabalho de conclusão do curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Norte, *Campus* Santa Cruz, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de licenciado em Física.

ORIENTADOR: Prof. Me. Caio
Vasconcelos Pinheiro da Costa

SANTA CRUZ

2023

Silva, Francisco Múcio Ferreira da
S586c O conceito de antimatéria e uma análise da sua utilização em aulas de física do ensino médio / Francisco Múcio Ferreira da Silva - 2023.
69 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte.
Orientador: Prof. Me. Caio Vasconcelos Pinheiro da Costa.

1. Antimatéria. 2. Ensino médio. 3. Física moderna. 4. Proposta de ensino.
I. Costa, Caio Vasconcelos Pinheiro da. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnológica do Rio Grande do Norte. III. Título.

CDU 53:37

FRANCISCO MÚCIO FERREIRA DA SILVA

**O CONCEITO DE ANTIMATÉRIA E UMA ANÁLISE DA SUA
UTILIZAÇÃO EM AULAS DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO**

Monografia apresentada como trabalho de conclusão do curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Norte, *Campus* Santa Cruz, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de licenciado em Física.

Trabalho de Conclusão apresentado e aprovado em 27/09/2023, pela seguinte Banca Examinadora:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Caio Vasconcelos Pinheiro da Costa – Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Me. Roney Roberto de Melo Sousa – 1º examinador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Me. Ubaldo Fernandes de Almeida – 2º examinador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

RESUMO

A presente pesquisa busca apresentar como se deu o surgimento do conceito de antimatéria, algumas das suas aplicações e sugerir uma proposta de ensino para ser utilizada no Ensino Médio. Inicialmente, é apresentada uma breve revisão sobre o conteúdo de antimatéria, na qual falamos sobre a origem das equações de Klein-Gordon e de Dirac, tendo essa última previsto a existência das antipartículas. Para subsidiar a elaboração da proposta de ensino, foi realizada uma pesquisa, de caráter quantitativo e qualitativo, entre professores de Física e estudantes do município de Santa Cruz/RN sobre a presença desse tópico nas aulas de Física. Os resultados mostraram que esse tópico é pouquíssimo trabalhado dentro do Ensino Médio, mas que existe um grande interesse na sua inserção nas aulas de Física. Assim, sugerimos uma proposta didática, dividida em 5 momentos, baseada na teoria de aprendizagem significativa de David Ausubel, para apresentação do tópico de antimatéria nas aulas de Física do Ensino Médio, a partir da utilização de mapas mentais.

Palavras-Chave: Antimatéria; Ensino Médio; Física Moderna; Proposta de Ensino.

ABSTRACT

This research seeks to present how the concept of antimatter emerged, some of its applications and suggest a teaching proposal to be used in high school. Initially, a brief review of the content of antimatter is presented, in which we talk about the origin of the Klein-Gordon and Dirac equations, the latter of which predicted the existence of antiparticles. To support the preparation of the teaching proposal, a quantitative and qualitative survey was carried out among Physics teachers and students in the city of Santa Cruz/RN about the presence of this topic in Physics classes. The results showed that this topic is rarely studied in high school, but that there is great interest in its inclusion in Physics classes. Thus, we suggest a didactic proposal, divided into 5 moments, based on David Ausubel's theory of meaningful learning, for presenting the topic of antimatter in High School Physics classes, using mental maps.

Keywords: Antimatter; High school; Modern physics; Teaching Proposal.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mar de Dirac

Figura 2 – Imagem do pósitron

Figura 3 – Armadilha tipo Penning

Figura 4 – Esboço de uma armadilha tipo Ioffe

Figura 5 – Produção de pares

Figura 6 – Emissão de pósitrons no corpo humano

Figura 7 – Mapa mental – Surgimento da antimatéria

Figura 8 – Mapa mental – Utilização da antimatéria

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação das respostas dos questionários aplicado com os alunos da escola A da Rede Federal, alunos da escola B da Rede Privada e os alunos da escola C da Rede estadual, para a pergunta 1.

Quadro 2 – Comparação das respostas dos questionários aplicado com os alunos da escola A da Rede Federal, alunos da escola B da Rede Privada e os alunos da escola C da Rede estadual para a pergunta 2.

Quadro 3 – Comparação das respostas dos questionários aplicado com os alunos da escola A da Rede Federal, alunos da escola B da Rede Privada e os alunos da escola C da Rede estadual, para a pergunta 3.

Quadro 4 – Comparação das respostas dos questionários aplicado com os alunos da escola A da Rede Federal, alunos da escola B da Rede Privada e os alunos da escola C da Rede estadual, para a pergunta 4.

Quadro 5 – Comparação das respostas dos questionários aplicado com os alunos da escola A da Rede Federal, alunos da escola B da Rede Privada e os alunos da escola C da Rede estadual, para a pergunta 5.

Quadro 6 – Comparação das respostas dos questionários aplicado com os professores da escola A da Rede Federal, professores da escola B da Rede Privada e os professores da escola C da Rede estadual, para a pergunta 1.

Quadro 7 – Comparação das respostas dos questionários aplicado com os professores da escola A da Rede Federal, professores da escola B da Rede Privada e os professores da escola C da Rede estadual, para a pergunta 2.

Quadro 8 – Comparação das respostas dos questionários aplicado com os professores da escola A da Rede Federal, professores da escola B da Rede Privada e os professores da escola C da Rede estadual, para a pergunta 3.

Quadro 9 – Comparação das respostas dos questionários aplicado com os professores da escola A da Rede Federal, professores da escola B da Rede Privada e os professores da escola C da Rede estadual, para a pergunta 4.

Quadro 10 – Comparação das respostas dos questionários aplicado com os professores da escola A da Rede Federal, professores da escola B da Rede Privada e os professores da escola C da Rede estadual, para a pergunta 5

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CP – Reversão Carga-Paridade

FMC – Física Moderna e Contemporânea

GeV – Giga elétron-volt

KeV – Quilo elétron-volt

MeV – Mega elétron-volt

PET – Tomografia por Emissão de Póstrons

T – Reversão temporal

TNT – Trinitrotolueno

LISTA DE SÍMBOLOS

δ_{ij}	Delta de Kronecker
c	Velocidade da luz no vácuo
E	Energia
\hat{H}	Operador hamiltoniano
h	Constante de Planck
\hbar	Constante reduzida de Planck
i	Unidade Imaginária
\vec{j}	Densidade de corrente
m	Massa
\hat{P}	Operador momento linear
ρ	Densidade de carga ou de probabilidade (a depender do contexto)
ψ	Função de onda
ψ^*	Complexo conjugado da função de onda
$ \psi ^2$	Densidade de probabilidade
V	Energia potencial
t	Instante de tempo
\vec{r}	Vetor posição
∇	Operador Nabla
∇^2	Laplaciano
∂	Derivada parcial
\square	D'Alembertiano
Σ	Somatório
tr	Traço
$\mathbb{1}$	Matriz identidade
$\mathbb{0}$	Matriz nula

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO 1 – UMA BREVE INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE ANTIMATÉRIA	13
1.1 EQUAÇÃO DE KLEIN-GORDON	13
1.2 EQUAÇÃO DE DIRAC	18
1.3 A ANTIMATÉRIA	22
1.4 PRODUÇÃO E ANIQUILAÇÃO DE PARES	24
1.5 APLICAÇÕES DA ANTIMATÉRIA NA TECNOLOGIA	26
1.6 POR QUE EXISTE MAIS MATÉRIA DO QUE ANTIMATÉRIA NO UNIVERSO?	27
CAPÍTULO 2 – MATERIAIS E MÉTODOS DA PESQUISA	28
CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
3.1 RESPOSTAS DOS ESTUDANTES AOS QUESTIONÁRIOS	30
3.2 RESPOSTAS DOS PROFESSORES AOS QUESTIONÁRIOS	34
CAPÍTULO 4 – PROPOSTA DIDÁTICA	44
4.1 METODOLOGIA DA PROPOSTA DIDÁTICA	44
4.2 SEQUÊNCIA DIDÁTICA	45
CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS	49
APÊNDICES	52

INTRODUÇÃO

Nos anos 1920, os físicos estavam estudando o comportamento das partículas subatômicas e, com isso, eles precisavam de uma nova teoria que descrevesse o comportamento dessas partículas já que a mecânica quântica antiga apresentava falhas. Quando Schrödinger desenvolveu sua equação, ela só descrevia partículas a baixas velocidades, ou seja, ela era incompatível com a relatividade especial de Einstein. Surgiram, então, duas novas equações para descrever partículas com altas velocidades: a equação de Klein-Gordon e a equação de Dirac. A equação de Klein-Gordon teve falhas e foi deixada de lado até Feynman reinterpretá-la. A ideia de antimatéria foi proposta em 1928, quando Paul Adrien M. Dirac (1902–1984) conseguiu combinar a mecânica quântica com a relatividade especial em uma equação que descrevia o movimento para um elétron com velocidade relativística.

Com essa nova ideia, os conceitos de matéria e de partícula elementar tiveram que ser revisados e aprimorados, uma vez que, para entendermos o que é antimatéria, precisamos saber primeiro o que é a matéria. A matéria é constituída por átomos, que possui sua vez são formados por partículas menores, sem estrutura interna, chamadas de partículas elementares. A antimatéria possui as mesmas características da matéria, diferindo apenas por um número quântico, em geral, a carga elétrica. Todavia, matéria e antimatéria também podem diferir por outras características como, por exemplo, o número leptônico¹.

O estudo da antimatéria está ligado ao mundo atual, à tecnologia e pode se conectar a realidade dos alunos da educação básica. É um tópico atual e fascinante, por isso, a importância de ser abordado pelos professores do Ensino Médio.

A antimatéria surgiu como alvo de estudo neste trabalho após entender que este tema tem grande relevância, apesar de pouco explorado, e que este tópico pode ser abordado de forma clara e objetiva no Ensino Médio, estabelecendo uma conexão com a Física Moderna e Contemporânea (FMC).

¹ Em física de partículas, o número leptônico é um número quântico conservado, que representa a diferença entre o número de léptons e o número de antiléptons em uma reação de partículas elementares. O número leptônico é um número quântico aditivo, de modo que sua soma seja preservada nas interações.

Este trabalho tem como **objetivo geral** *analisar a presença do tema antimatéria nas aulas de Física do Ensino Médio do município de Santa Cruz/RN e refletir sobre como a discussão desse tópico na educação básica pode ser inserido.*

Para que o objetivo geral seja alcançado, é preciso que, pontualmente, os seguintes objetivos específicos sejam atingidos:

- Fazer uma breve introdução sobre o conceito de antimatéria, para que o professor se aproprie desses conhecimentos e, posteriormente, possa fazer uso deles.
- Levantar informações acerca de como e se ocorre o ensino do conceito de antimatéria nas escolas de Ensino Médio do município de Santa Cruz.
- Identificar os principais problemas que dificultam a inserção de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea nas aulas de Física do Ensino Médio, refletindo sobre estratégias para solucioná-los.
- Apresentar uma proposta de ensino sobre o conceito de antimatéria que seja efetiva e viável para ser aplicada em aulas do Ensino Médio e que não tomem um tempo muito grande dentro do planejamento anual do professor.

Assim sendo, este trabalho explora um tema atual e de grande importância. Na proposta apresentada, é utilizada a teoria de aprendizagem significativa de Ausubel, para a construção do conhecimento. Essa teoria propõe uma aprendizagem baseada na disposição do aluno em aprender e na relevância do conteúdo.

A metodologia utilizada para a construção desta pesquisa, foi de natureza exploratória e explicativa, a depender da parte da pesquisa. Foram utilizados artigos e livros didáticos que abordam o tema e que contribuem para explorar o conteúdo de maneira mais didática. A abordagem foi qualitativa e quantitativa, já que utilizamos questionários para se coletar as informações necessárias. Os questionários foram aplicados entre professores e alunos de três escolas do município de Santa Cruz/RN sendo uma da rede federal, uma da rede privada e uma da rede estadual.

O trabalho foi dividido em 4 capítulos. No primeiro capítulo, é feita uma breve introdução sobre a origem do conceito de antimatéria, a partir das equações de Klein-Gordon e de Dirac. Além disso, nesse capítulo discutimos o que é a antimatéria, a produção e aniquilação de pares matéria-antimatéria, as aplicações da antimatéria na tecnologia e porque existe mais matéria do que antimatéria no universo. No segundo capítulo falamos sobre os materiais e métodos da pesquisa. No terceiro capítulo, apresentamos e discutimos os resultados obtidos a partir dos questionários.

Finalmente, no quarto capítulo, apresentamos uma proposta didática para o ensino do conceito de antimatéria.

CAPÍTULO 1 – UMA BREVE INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE ANTIMATÉRIA

Neste capítulo, faremos uma introdução sobre a origem e o desenvolvimento do conceito de antimatéria para que o leitor que não tem familiaridade com o assunto, possa se apropriar melhor sobre esse tópico.

No estudo da mecânica quântica relativística, temos duas principais equações de onda, a equação de Klein-Gordon e a equação de Dirac, que surgiram como uma generalização da equação não relativística de Schrödinger.

1.1 EQUAÇÃO DE KLEIN-GORDON²

Consideremos uma partícula livre (que não sofre ação de nenhuma força resultante). A equação não relativística de Schrödinger da mecânica quântica é:

$$\hat{H}\psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) \quad (1)$$

Sendo \hat{H} o operador Hamiltoniano e ψ uma função de onda.

Estamos considerando:

$$\hat{H} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad e \quad \hat{P} = -i\hbar \vec{\nabla} \quad (2)$$

Sendo \hat{P} o operador momento.

Agora, vamos utilizar o Hamiltoniano para uma partícula livre não relativística:

$$\hat{H} = \frac{\hat{P}^2}{2m} = \frac{(-i\hbar \vec{\nabla}) \cdot (-i\hbar \vec{\nabla})}{2m} \Rightarrow \hat{H} = \frac{-\hbar^2 \nabla^2}{2m} \quad (3)$$

² Oscar Klein foi um físico sueco que nasceu em 15 de setembro de 1894 e faleceu em 5 de fevereiro de 1977. Walter Gordon foi um físico teórico alemão que nasceu em 13 de agosto de 1893 e faleceu em 24 de dezembro de 1939. Os dois são conhecidos por desenvolver a teoria de Klein-Gordon, que descreve partículas com spin zero.

Substituindo a eq. (3) na eq. (1), ficaremos com:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi(\vec{r},t) = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(\vec{r},t) \quad (4)$$

Da relatividade restrita, temos:

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4 \quad (5)$$

Da mecânica clássica, sabemos que o Hamiltoniano está diretamente relacionado ao valor da energia total do sistema, de forma que:

$$\hat{H}.\hat{H} = (\hat{P}.\hat{P})c^2 + m^2c^4 \quad (6)$$

Substituindo o operador momento na equação (6), temos:

$$\hat{H}.\hat{H} = -\hbar^2c^2\nabla^2 + m^2c^4 = \hbar^2c^2\left[-\nabla^2 + \left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2\right] \quad (7)$$

Aplicando o ψ em ambos os lados da equação (7), ficaremos com:

$$\hat{H}^2\psi = -\hbar^2\frac{\partial^2}{\partial t^2}\psi = \hbar^2c^2\left[-\nabla^2 + \left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2\right]\psi \quad (8)$$

Portanto:

$$-\hbar^2\frac{\partial^2}{\partial t^2}\psi = \hbar^2c^2\left[-\nabla^2 + \left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2\right]\psi \quad (9)$$

Dividindo ambos os lados da equação por \hbar^2c^2 , teremos:

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\psi = \left[-\nabla^2 + \left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2\right]\psi \quad (10)$$

Reescrevendo a equação, temos:

$$\left[\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 + \left(\frac{mc}{\hbar} \right)^2 \right] \psi = 0 \quad (11)$$

Mas, $\square^2 = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2$ é denominado *operador D'Alembertiano*.

Temos, finalmente, a equação de Klein-Gordon:

$$\left[\square^2 + \left(\frac{mc}{\hbar} \right)^2 \right] \psi(\vec{r}, t) = 0 \quad (12)$$

A equação de Klein-Gordon foi obtida em 1926 e descreve o comportamento de partículas com spin zero, como o bóson de Higgs.

Agora, vamos tentar obter uma equação de continuidade a partir da equação de Klein-Gordon.

Temos:

$$\frac{\partial}{\partial t} |\psi|^2 = \frac{\partial}{\partial t} (\psi^* \psi) = \frac{\partial \psi^*}{\partial t} \psi + \psi^* \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (13)$$

Mas:

$$\hat{H} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Rightarrow \hat{H}\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad \therefore \quad \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{1}{i\hbar} \hat{H}\psi \quad (14)$$

Multiplicando por i o numerador e o denominador do termo à direita da igualdade na equação (14), ficamos com:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{i}{i\hbar} \hat{H}\psi \Rightarrow \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} \hat{H}\psi \quad (15)$$

uma vez que $i \cdot i = -1$.

$$\left(\frac{\partial \psi}{\partial t} \right)^* = \left(-\frac{i}{\hbar} \hat{H}\psi \right)^* = \frac{\partial \psi^*}{\partial t} = \frac{i}{\hbar} \hat{H}\psi^* \quad (16)$$

Substituindo as equações (15) e (16) na equação (13), ficamos com:

$$\frac{\partial |\psi|^2}{\partial t} = \frac{1}{\hbar} \hat{H} \psi^* \psi - \frac{1}{\hbar} \psi^* \hat{H} \psi \quad (17)$$

Mas:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \quad (18)$$

Substituindo a equação (18) na equação (17) e colocando $1/\hbar$ em evidência, temos:

$$\frac{\partial |\psi|^2}{\partial t} = \frac{1}{\hbar} \left[\psi \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \psi^* - \psi^* \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \psi \right] \quad (19)$$

Colocando $-\hbar^2 \vec{\nabla}/2m$ em evidência e, uma vez que os termos que contém os potenciais vão se cancelar, temos:

$$\frac{\partial |\psi|^2}{\partial t} = \frac{i}{\hbar} \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \vec{\nabla} (\psi \vec{\nabla} \psi^* - \psi^* \vec{\nabla} \psi) \right] \quad (20)$$

Simplificando \hbar , ficamos com:

$$\frac{\partial |\psi|^2}{\partial t} = -\frac{i\hbar}{2m} \vec{\nabla} (\psi \vec{\nabla} \psi^* - \psi^* \vec{\nabla} \psi) \quad (21)$$

Denominando:

$$|\psi|^2 = \rho \quad e \quad \frac{i\hbar}{2m} (\psi \vec{\nabla} \psi^* - \psi^* \vec{\nabla} \psi) = \vec{j}$$

Obtemos a equação de continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (22)$$

Note que, a partir dela, é possível se obter uma equação de continuidade que, nesse caso, relaciona a densidade de probabilidade com a corrente de probabilidade. Essa equação garante a conservação da probabilidade de se encontrar a partícula em uma determinada região do espaço e ao longo do tempo, ou seja, ela assegura que a

probabilidade de se encontrar a partícula não se acumula ou desaparece, mas é conservada durante a evolução temporal.

Tomando o complexo conjugado da equação de Klein-Gordon e subtraindo dela mesma:

$$\psi^* \left[\square^2 + \left(\frac{mc}{\hbar} \right)^2 \right] \psi - \psi \left[\square^2 + \left(\frac{mc}{\hbar} \right)^2 \right] \psi^* = 0 \quad (23)$$

Substituindo em \square^2 e desenvolvendo:

$$\frac{1}{c^2} \psi^* \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \psi^* \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \psi + \left(\frac{mc}{\hbar} \right)^2 \psi^* \psi - \frac{1}{c^2} \psi \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial t^2} + \psi \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \psi^* - \left(\frac{mc}{\hbar} \right)^2 \psi \psi^* = 0 \quad (24)$$

Cancelando os termos semelhantes, temos:

$$\frac{1}{c^2} \psi^* \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \psi^* \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \psi - \frac{1}{c^2} \psi \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial t^2} + \psi \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \psi^* = 0 \quad (25)$$

Mas:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\psi^* \frac{\partial \psi}{\partial t} - \psi \frac{\partial \psi^*}{\partial t} \right) = \frac{\partial \psi^*}{\partial t} \frac{\partial \psi}{\partial t} + \psi^* \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{\partial \psi^*}{\partial t} - \psi \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial t^2} = \psi^* \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \psi \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial t^2} \quad (26)$$

Logo, substituindo esse resultado na equação (25), ficamos com:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{c^2} \left(\psi^* \frac{\partial \psi}{\partial t} - \psi \frac{\partial \psi^*}{\partial t} \right) \right] + \vec{\nabla} \cdot (\psi \vec{\nabla} \psi^* - \psi^* \vec{\nabla} \psi) = 0 \quad (27)$$

Multiplicando por $i\hbar/2m$ em ambos os membros:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{i\hbar}{2mc^2} \left(\psi^* \frac{\partial \psi}{\partial t} - \psi \frac{\partial \psi^*}{\partial t} \right) \right] + \vec{\nabla} \cdot \left[\frac{\hbar}{2mi} (\psi \vec{\nabla} \psi^* - \psi^* \vec{\nabla} \psi) \right] = 0 \quad (28)$$

Note que, no segundo membro, fizemos o produto por $i/i = 1$. Com isso, vemos que:

$$\rho = \frac{i\hbar}{2mc^2} \left(\psi^* \frac{\partial \psi}{\partial t} - \psi \frac{\partial \psi^*}{\partial t} \right) \quad (29)$$

$$\vec{j} = \frac{\hbar}{2mi} (\psi^* \vec{\nabla} \psi - \psi \vec{\nabla} \psi^*) \quad (30)$$

Assim, percebemos que ρ também pode assumir valores negativos, o que levou o abandono temporário da eq. de Klein-Gordon.

1.2 EQUAÇÃO DE DIRAC³

A equação de Dirac foi proposta em 1928 e, assim como a equação de Klein-Gordon, tentava reunir a relatividade especial e a mecânica quântica numa mesma equação. No entanto, Dirac propôs uma equação de 1ª ordem tanto na parte espacial como na parte temporal:

$$\left[i\hbar \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} + \alpha_1 \frac{\partial}{\partial x} + \alpha_2 \frac{\partial}{\partial y} + \alpha_3 \frac{\partial}{\partial z} \right) - \beta mc \right] \psi(x, y, z, t) = 0 \quad (31)$$

Onde ψ passa a ser um campo de natureza *espinorial*, representado por uma matriz coluna com 4 elementos:

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \\ \psi_4 \end{bmatrix}$$

enquanto α_i e β são matrizes 4 x 4.

A equação de Dirac também pode ser escrita como:

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = -\hbar^2 c^2 \sum_{i,j=1}^3 \frac{1}{2} (\alpha_i \alpha_j + \alpha_j \alpha_i) \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^i \partial x^j} + \frac{\hbar mc^3}{i} \sum_{j=1}^3 (\alpha_j \beta + \beta \alpha_j) \frac{\partial \psi}{\partial x^j} + \beta^2 m^2 c^4 \psi \quad (32)$$

³ Paul, A. M. Dirac foi um físico teórico inglês. É considerado um dos fundadores da Mecânica Quântica e da Eletrodinâmica Quântica. Propôs sua equação em 1928.

Comparando com a equação (9), para que as duas sejam compatíveis, devemos ter:

$$\alpha_i \alpha_j + \alpha_j \alpha_i = 2\delta_{ij} = 2 \cdot \mathbb{1}$$

$$\alpha_j \beta + \beta \alpha_j = \mathbf{0}$$

$$\alpha_i^2 = \beta^2 = \mathbb{1}$$

Dessas condições decorre que as matrizes α e β tem traço nulo.

Prova:

$$\alpha_i \beta + \beta \alpha_i = 0 \Rightarrow \alpha_i \beta = -\beta \alpha_i$$

$$\alpha_i \beta \cdot \beta = -\beta \alpha_i \cdot \beta \Rightarrow \alpha_i = -\beta \alpha_i \cdot \beta$$

$$\text{tr } \alpha_i = \text{tr } (\alpha_i \mathbb{1}) = \text{tr } (\alpha_i \beta^2) = \text{tr } (\alpha_i \beta \cdot \beta) = \text{tr } (\beta \alpha_i \beta) = -\text{tr } \alpha_i$$

No penúltimo passo, usamos a propriedade: $\text{tr } (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}) = \text{tr } (\mathbf{B} \cdot \mathbf{A})$

$$\text{Assim, } \text{tr } \alpha_i = -\text{tr } \alpha_i \quad \therefore \text{tr } \alpha_i = 0$$

Por outro lado, $\alpha_i^2 = \beta^2 = \mathbb{1}$ implica que os autovalores de α e β são ± 1 .

Prova:

Se $\beta^2 = \beta \cdot \beta = \mathbb{1}$, então:

$$\beta \vec{v} = b \vec{v}$$

$$\beta \cdot \beta \vec{v} = \beta \cdot b \vec{v}$$

$$\vec{v} = b \cdot \beta \vec{v} = b(b \vec{v})$$

$$\vec{v} = b^2 \vec{v} \Rightarrow b^2 = 1 \Rightarrow b = \pm 1$$

Como o traço é a soma dos autovalores, a matriz deve ter dimensão par. A menor dimensão que satisfaz as 3 condições é $d = 4$. Logo:

$$\alpha_i = \begin{bmatrix} \mathbb{0} & \sigma_i \\ \sigma_i & \mathbb{0} \end{bmatrix} \quad e \quad \beta = \begin{bmatrix} \mathbb{1} & \mathbb{0} \\ \mathbb{0} & -\mathbb{1} \end{bmatrix}$$

onde

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{pmatrix}; \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

são as matrizes de Pauli.

$$\mathbb{0} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ e } \mathbb{1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

e $\mathbb{0}$ e $\mathbb{1}$ são as matrizes nula e identidade, respectivamente.

Fazendo:

$$p_0 = i\hbar \frac{\partial}{\partial x_0} \text{ com } x_0 = ct \quad (33)$$

$$p_i = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x_i} \text{ com } i = 1, 2, 3 \text{ e } x_1 = x, \quad x_2 = y, \quad x_3 = z \quad (34)$$

Assim, podemos expressar a equação de Dirac como:

$$(p_0 - \alpha_1 p_1 - \alpha_2 p_2 - \alpha_3 p_3 - \beta mc) \psi = 0 \quad (35)$$

As matrizes α e β devem ser independentes da posição e comutam com os operadores de posição e momentum. Essas matrizes descrevem uma nova propriedade interna chamada *spin*. O spin é uma propriedade puramente quântico-relativística das partículas subatômicas, que pode ser pensada como uma espécie de momento angular intrínseco, não havendo nenhum semelhante clássico. As partículas que possuem spin semi-inteiro ($\pm 1/2$, $\pm 3/2$, etc), como é o caso do elétron, são chamadas de *férmions*. Por outro lado, partículas que possuem spin inteiro (0, ± 1 , ± 2 , etc) são chamadas de *bósons* e estão associadas à mediação das interações fundamentais.

Das 4 soluções para a equação de Dirac, temos:

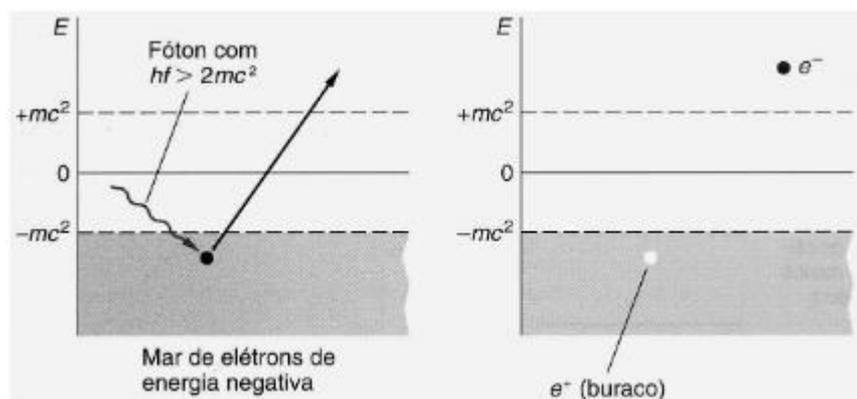
$$2 \text{ soluções para } E = +\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

$$2 \text{ soluções para } E = -\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

As soluções com energia negativa precisavam ser consideradas para que a teoria fosse matematicamente consistente. Dirac propôs que o vácuo é a região do espaço onde temos a menor energia possível. Como massa e a energia são equivalentes do ponto de vista relativístico, então, a equação admite a existência de partículas com energia negativa. Mas, surge um problema quando pensamos em valores de energia negativa. Se o elétron, caso tivesse energia zero, pudesse continuar emitindo energia, ele cairia para estados de energia com valores cada vez mais negativos, o que não acontece na realidade.

A solução de Dirac foi utilizar o *princípio da exclusão de Pauli*, uma vez que o elétron é um férmion e todos os férmions obedecem a tal princípio. Isso significa que cada estado quântico só pode ser ocupado por uma partícula de cada vez, ou seja, duas partículas diferentes não podem ter todos os números quânticos iguais. Dirac sugeriu que o vácuo deveria ser um estado no qual todos os elétrons teriam energia negativa e estariam ocupando Z carga negativa, cair nesse “mar de energia negativa”. Dirac ainda indicou a existência de um estado de energia negativa que não estivesse ocupado. Esse “buraco” se comportaria como uma partícula de mesma massa que o elétron, mas com carga positiva. Caso um fóton com energia maior do que $2mc^2$ interaja com algum elétron do mar de Dirac, é possível que este assumira um estado de energia positiva. Como consequência, seria gerado um “buraco” no mar de Dirac com a mesma massa do elétron, mas com carga oposta à do elétron.

Figura 01: Mar de Dirac



Fonte: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7961899/mod_resource/content/1/Aula05.pdf>

>.

Acesso em: 12 set. 2023.

Inicialmente, Dirac acreditou que esse buraco seria um próton, mas para Hermann Weyl⁴, a massa desse buraco deveria ser igual à do elétron e eles seriam capazes se aniquilarem criando energia na forma de fótons. Além disso, esses buracos não poderiam ser prótons pois, se assim o fossem, não poderiam existir átomos estáveis.

1.3 A ANTIMATÉRIA

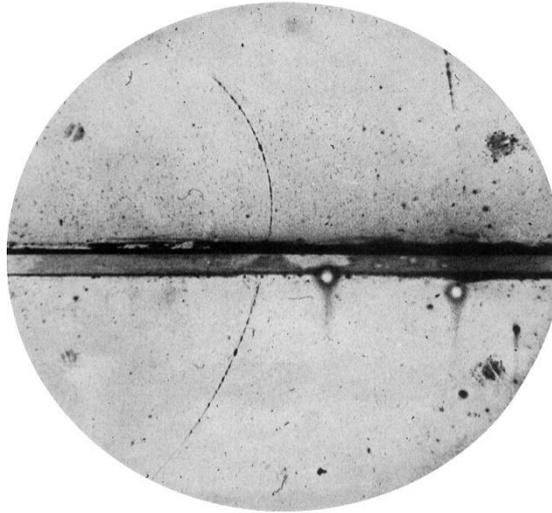
A antimatéria é o oposto da matéria ela é formada de antimoléculas e antiátomos. Segundo (Moreira, 2009, p.6) “a antimatéria é constituída de antiprótons, antinêutrons, antielétrons (chamados pósitrons), antiléptons, antiquarks. Partículas neutras como os fótons são iguais as suas antipartículas (*grávitons*⁵ também seriam iguais as suas antipartículas)”. Para cada partícula de matéria deve existir uma antipartícula. A antimatéria foi prevista por Dirac nos seus estudos sobre o elétron. Pouco tempo depois, ela foi descoberta experimentalmente por Carl Anderson.

No Instituto de Tecnologia da Califórnia, em 1932, Carl Anderson realizava experimentos com registros de raios cósmicos. Esses raios cósmicos, provenientes de diferentes partes do espaço, são partículas extremamente energéticas. Utilizando uma câmara de nuvens, também conhecida como câmara de Wilson, Anderson registrava o percurso dessas partículas de alta energia ao atravessarem uma placa de chumbo e serem influenciadas por um intenso campo magnético. Uma fotografia mostrou o rastro deixado por uma partícula com características semelhantes às do elétron. A diferença é que essa partícula se curvava numa direção oposta à do elétron. Carl Anderson deduziu que se tratava de em “elétron com carga positiva”, que foi nomeado de pósitron.

⁴ Hermann Weyl foi um matemático e físico alemão, nascido em 9 de novembro de 1885 e falecido em 8 de dezembro de 1955. Ele é conhecido por suas contribuições em diversos campos da matemática e da física teórica.

⁵ O gráviton é uma partícula hipotética na teoria quântica de campos que seria o portador da força gravitacional. É uma partícula elementar que interage com a massa e energia e seria responsável por transmitir a "força" da gravidade entre partículas. No entanto, até o momento, o gráviton não foi descoberto experimentalmente e sua existência ainda não foi comprovada.

Figura 02: Imagem do pósitron



Fonte: < <https://physicsopenlab.org/2016/02/09/positron-annihilation>>.

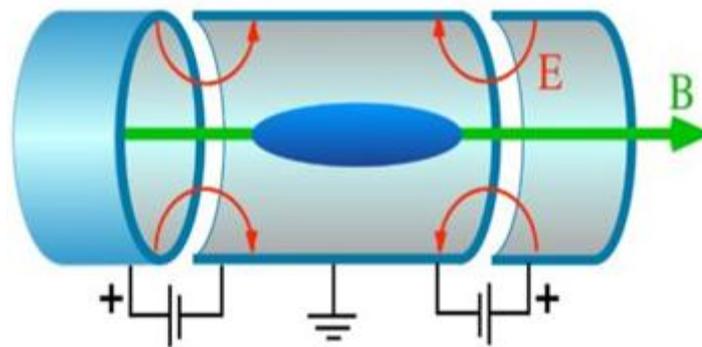
Acesso em: 05 jan. 2023.

O pósitron foi a primeira antipartícula a ser descoberta. Outras antipartículas foram descobertas mais tarde, como o antipróton, que foi descoberto em 1959 no mesmo laboratório onde foi descoberto o pósitron. Um ano mais tarde, foi descoberto o antinêutron e, em 1965, conseguiram produzir o antidêuteron. Estas são apenas algumas das antipartículas que já foram descobertas.

Ocorre um fenômeno interessante quando uma partícula de antimatéria se encontra com uma partícula de matéria correspondente: elas se aniquilam liberando energia na forma de fótons altamente energéticos. Além disso, o processo inverso também pode acontecer, de maneira que fótons podem dar origem a pares matéria-antimatéria. Por exemplo, um fóton com energia suficiente, ao colidir com o núcleo denso de um átomo, pode dar origem a um par elétron-pósitron.

As principais dificuldades encontradas no estudo da antimatéria é que ela existe em pouca quantidade e a sua existência é muito curta, devido à sua aniquilação com a matéria. As partículas de antimatéria existem em pequenas quantidades e podem ser criadas artificialmente, mas elas demandam um gasto muito grande de energia, o que não é viável. Para podermos estudar a antimatéria, é preciso confiná-las em armadilhas do tipo *Penning*, no caso de partículas com carga, já que neste dispositivo os campos magnéticos e elétricos evitam que elas se choquem contra a parede da armadilha.

Figura 03: Armadilha tipo Penning

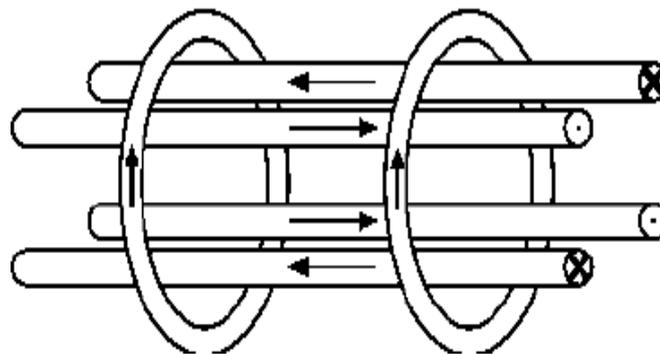


Fonte: < <https://www.astroblogs.nl/2019/11/14/hebben-de-mysterie-rondom-antimaterie-en-donkere-materie-soms-iets-met-elkaar-te-maken> >.

Acesso em: 12 set. 2023.

Já no caso das partículas que não possuem carga, estas são aprisionadas em armadilhas do tipo *loffe*, nas quais o campo magnético é aumentado em todas as direções em volta da partícula, fazendo com que esta fique presa na região em que o campo magnético é menos intenso.

Figura 04: Esboço de uma armadilha tipo loffe



Fonte: < https://www.researchgate.net/figure/A-sketch-of-an-loffe-trap_fig1_2149170 >.

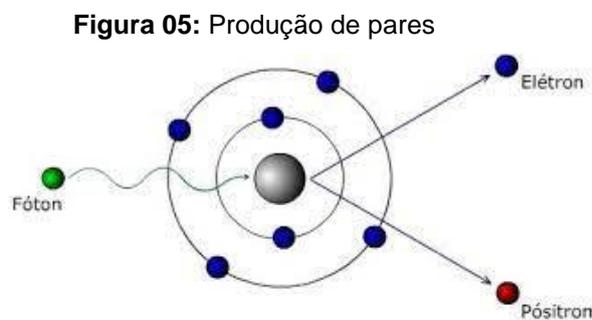
Acesso em: 12 set. 2023.

1.4 PRODUÇÃO E ANIQUILAÇÃO DE PARES

Quando matéria e antimatéria se encontram ocorre um processo chamado de aniquilação. Se o encontro ocorrer com pouca energia, serão criados apenas fótons, mas se a colisão for altamente energética, outras partículas e antipartículas podem

ser criadas. O encontro entre matéria e antimatéria é um processo tão energético, que “um grama de antimatéria lançada em nosso planeta produziria uma deflagração equivalente a quase três vezes a bomba atômica que devastou Hiroshima em 1945, assumindo que tinha 15 quilotons de TNT” (Rivera, 2020, p.2). Apesar da alta energia que é fornecida nessas colisões, não podemos utilizá-la como uma fonte de energia em nossa sociedade já que, na maior parte das vezes, a antimatéria só é obtida através dos raios cósmicos que chegam à Terra vindos do espaço ou através da sua produção em aceleradores de partículas, os quais demandam um alto gasto energético para criar uma quantidade ínfima de partículas de antimatéria. Além disso, após criadas, em geral, a vida dessas partículas é muito curta. Curiosamente, partículas de antimatéria também podem ser obtidas de forma natural, embora esse processo não possa ser controlado. Por exemplo, uma banana emite um pósitron a cada 75 minutos (em média). Isso ocorre porque elas contêm potássio-40, que decai emitindo pósitrons.

Quando um fóton com energia mínima de 1,022 MeV atinge o núcleo denso de um átomo, ele transfere toda a sua energia para o núcleo criando um par elétron-pósitron. Nesse processo, a energia e o momento são conservados.



Fonte: < <https://www.oocities.org/tomografiademadeira/interacao.html> >.

Acesso em: 15 nov. 2022.

A menor energia que um fóton precisa possuir para que seja capaz de criar um par elétron-pósitron é de $2mc^2$, onde m é massa de repouso do elétron e c é a velocidade da luz no vácuo. Como a massa do núcleo é muito grande em relação às massas do elétron e do pósitron, o núcleo sofrerá um recuo desprezível. Quando o par é produzido, observa-se que a aceleração de cada uma delas em relação ao núcleo é diferente, uma vez que, devido à interação coulombiana, uma das partículas

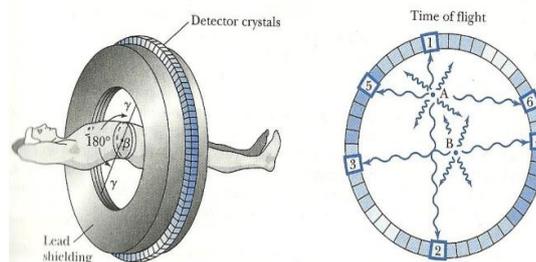
é atraída pelo núcleo e a outra é repelida. Imediatamente após a criação, cada uma das partículas terá uma energia de 511 keV.

Para que sejam criados outros pares de partículas, é necessário que haja mais energia. No caso do par próton-antipróton, é necessário 1,88 GeV, valor que é cerca de mil vezes maior que a energia necessária para criar um par elétron-pósitron.

1.5 APLICAÇÕES DA ANTIMATÉRIA NA TECNOLOGIA

A antimatéria é utilizada na medicina para a detecção de tumores, através da Tomografia de Emissão de Pósitrons (PET). Por meio desse exame, são geradas imagens tridimensionais que identificam os tumores. Quando o pósitron é emitido no corpo humano, ele percorre poucos milímetros até se aniquilar com os elétrons, emitindo radiação gama, que é utilizada para a construção dessas imagens em 3D.

Figura 06: Emissão de pósitrons no corpo humano



Fonte:

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/123094/mod_resource/content/1/FisVEsquemadaAula162013sem2.pdf>.

Acesso em: 17 nov. 2022.

Outra aplicação para a antimatéria seria a construção de naves espaciais que utilizassem antimatéria como fonte de energia. Isso faria com que o tempo de viagem fosse consideravelmente reduzido. Com a nossa tecnologia atual, o tempo gasto para se chegar a outros astros é inviável, devido às enormes distâncias que estes se encontram da Terra. Por exemplo, para se chegar à estrela *Alpha Centauri*, a estrela mais próxima da Terra depois do Sol, com a nossa tecnologia atual, seria necessária uma viagem com duração de 80 mil anos.

1.6 POR QUE EXISTE MAIS MATÉRIA DO QUE ANTIMATÉRIA NO UNIVERSO?

Um fato interessante é que existe mais matéria do que antimatéria no nosso universo e que, em tese, nos seus primórdios essa quantidade devia ser igual. Essa assimetria entre matéria e antimatéria decorre da *violação de carga-paridade (CP)*, que ocorre devido à interação fraca. “Trata-se de uma combinação das simetrias da conjugação de carga C, que consiste em trocar uma partícula por sua antipartícula, ou seja, todos os números quânticos aditivos da partícula são invertidos, e a paridade P, que inverte o sinal das coordenadas espaciais”. (Falcão, L. 2022, p.1). Uma evidência dessa violação foi observada no decaimento $k \rightarrow \pi^+ + \pi^-$.

Se a simetria CP for violada em algumas interações, isso pode levar a uma pequena diferença entre a quantidade de matéria e antimatéria produzida. Essa diferença pode ser ampliada com o tempo, à medida que a matéria e a antimatéria se aniquilam e se transformam em energia. No entanto, a diferença entre a quantidade de matéria e antimatéria ainda seria muito pequena para ser explicada apenas pela violação de CP. Outros processos, como a assimetria de neutrinos, também podem desempenhar um papel importante na explicação da predominância de matéria sobre antimatéria no universo.

No entanto, até o momento, nenhuma teoria física é amplamente aceita pela comunidade científica para explicar a assimetria matéria-antimatéria. É um campo ativo de pesquisa na física de partículas e cosmologia e espera-se que futuras descobertas experimentais forneçam uma compreensão mais clara dessa questão fundamental.

CAPÍTULO 2 – MATERIAIS E MÉTODOS DA PESQUISA

A antimatéria surgiu como alvo de estudo nesse artigo, após entender que este tema tem grande relevância e é pouco explorado no Ensino Médio, dentro do conteúdo de Física Moderna. Assim, foi desenvolvida uma pesquisa de natureza exploratória e explicativa, com abordagem qualitativa e quantitativa a fim de: proporcionar maior familiaridade com o conceito de antimatéria; investigar os problemas existentes no ensino-aprendizagem desse conceito no Ensino Médio; e prover subsídios para a construção de uma proposta de ensino desse conceito para alunos do Ensino Médio.

Inicialmente, realizamos uma pesquisa exploratória em livros de Física Moderna em nível de graduação e em alguns artigos de Ensino de Física sobre a origem e o desenvolvimento do conceito de antimatéria, mostrando as principais equações e interpretações que levaram à atual compreensão da comunidade científica sobre esse tópico.

Em seguida, a fim de diagnosticar se esse conteúdo vem sendo trabalhado nas turmas do Ensino Médio do município de Santa Cruz/RN e, em caso afirmativo, de que forma e em que nível de profundidade esse assunto é contemplado, fizemos uma pesquisa quantitativa do tipo *Survey*⁶ na qual aplicamos questionários entre professores de Física e alunos do terceiro ano do Ensino Médio de 3 (três) escolas situadas nesse município. Para que tivéssemos uma diversidade maior de realidades em nosso universo de pesquisa, foram escolhidas uma escola da rede federal (referida neste trabalho como Escola F), uma escola da rede privada (referida neste trabalho como Escola P) e uma escola da rede estadual (referida neste trabalho como Escola E). De maneira análoga, os docentes foram identificados como: pf1 e pf2, para os docentes da rede federal; pp, para o docente da escola privada; pe1 e pe2, para os docentes da rede estadual.

Foram utilizados dois questionários, sendo um para os professores e outro para os estudantes. O questionário dos professores continha 5 questões dissertativas, uma vez que a quantidade de professores era pequena (5 docentes) e que era importante conhecer mais detalhes sobre as práticas pedagógicas desenvolvidas. Já o questionário aplicado para os estudantes continha 5 questões de múltipla escolha, à

⁶ Em uma pesquisa tipo *Survey*, uma série de perguntas é feita aos participantes para coletar informações e opiniões sobre um determinado tópico.

medida que a quantidade de respondentes era considerável (130 alunos) e, dessa forma, seria mais simples tabular e analisar esses dados.

Os questionários foram aplicados em duas turmas de 3° ano do Ensino Médio em cada escola. Uma das perguntas feita no questionário dos professores foi a seguinte:

Você já discutiu com seus alunos o conceito de antimatéria? Em caso afirmativo, explique como se deu esse(s) momento(s).

Esta pergunta foi feita para saber se os professores dedicavam algum tempo dentro do ano letivo à discussão sobre antimatéria e, nos casos em que isso tivesse acontecido, conhecer quais foram as estratégias utilizadas pelo professor para abordar esse conteúdo.

Outra pergunta foi a seguinte: *No seu ponto de vista, que fatores dificultam a inserção de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea nas suas aulas no Ensino Médio?*

O intuito desta pergunta era conhecer melhor a realidade do professor, da escola e dos estudantes, com o intuito de identificar os problemas que interferem na viabilidade de se trabalhar tópicos de Física Moderna e Contemporânea nessas escolas.

Vejamos uma pergunta realizada no questionário dos estudantes.

Você já ouviu falar sobre o conceito de antimatéria nas suas aulas de Física (ou Ciências)?

() Sim () Não

Com esta pergunta queríamos verificar a familiaridade que os alunos possuem com o conceito de antimatéria.

Esses são apenas alguns exemplos das perguntas feitas a professores e alunos. Nos apêndices A e B, estão disponíveis, na íntegra, os dois questionários aplicados.

Os dados obtidos da pesquisa foram analisados considerando os objetivos do estudo, a fim de saber se o conceito de antimatéria é ensinado nas escolas, saber se os alunos já tinham ouvido falar no tema em outro ambiente e quais eram as dificuldades enfrentadas pelos professores para abordar temas como este, objetos da Física Moderna e Contemporânea.

O próximo capítulo apresenta os principais resultados obtidos, bem como uma análise crítica acerca dos fatores que influenciaram nesses resultados.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Vamos analisar os resultados dos questionários aplicados com os alunos e professores das três escolas. Primeiro, vamos comparar as respostas dos alunos e depois as dos professores, pergunta por pergunta.

3.1 RESPOSTAS DOS ESTUDANTES AOS QUESTIONÁRIOS

Quadro 01: Comparação das respostas dos questionários aplicado com os alunos da Escola F da Rede Federal, alunos da Escola P da Rede Privada e os alunos da Escola E da Rede Estadual, para a pergunta 1.

	Escola F (Federal)	Escola P (Privada)	Escola E (Estadual)
Número de alunos respondentes:	48	36	46
<p>Pergunta 1:</p> <p>Você já estudou algum dos conteúdos abaixo nas aulas de Física (ou Ciências) da sua escola?</p> <p>() Relatividade Geral</p> <p>() Física Quântica</p> <p>() Física Nuclear</p> <p>() Astronomia/Astrofísica</p> <p>() Cosmologia</p>	<p>(7) Relativ. Geral</p> <p>(14) Física Quântica</p> <p>(8) Física Nuclear,</p> <p>(19) Astron./Astrofís.</p> <p>(16) Cosmologia</p>	<p>(7) Relativ. Geral</p> <p>(9) Física Quântica</p> <p>(6) Física Nuclear</p> <p>(25) Astron./Astrofís.</p> <p>(18) Cosmologia</p>	<p>(7) Relativ. Geral</p> <p>(12) Física Quântica</p> <p>(9) Física Nuclear</p> <p>(22) Astron./Astrofís.</p> <p>(4) Cosmologia</p>

A partir da leitura da tabela acima, vemos que as respostas sugerem que todos os conteúdos de Física Moderna e Contemporânea (FMC), em maior ou menor escala, foram abordados em todas as escolas, o que causa certa estranheza. Diversas pesquisas apontam que existe um déficit enorme no ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio.

Os tópicos de FMC não são ensinados como deveriam por conta da deficiência existente na formação dos professores, inicial e continuada, aliada ao tempo insuficiente que é disponibilizado para as aulas de Física, e à extensa programação curricular, principalmente nas escolas públicas, onde o número de aulas da disciplina é reduzido. (NETO *et. al.*, 2019).

Dessa forma, acreditamos que esses tópicos tenham sido apenas comentados rapidamente em sala de aula, o que levou os alunos a responder que já haviam estudado esses conteúdos. A parte disso, notamos uma discrepância no conteúdo de Cosmologia dos alunos da Escola E em relação aos alunos das demais escolas. Uma possível explicação para esse resultado seria a pouca familiaridade ou o pouco interesse do professor da Escola E em relação ao conteúdo de Cosmologia. Por outro lado, é interessante saber que muitos tópicos de FMC vêm sendo abordados no Ensino Médio, mesmo que de forma sucinta.

Quadro 02: Comparação das respostas dos questionários aplicado com os alunos da Escola F da Rede Federal, alunos da Escola P da Rede Privada e os alunos da Escola E da Rede Estadual para a pergunta 2.

	Escola F	Escola P	Escola E
Número de alunos respondentes:	48	36	46
Pergunta 2:			
Você tem interesse em conteúdos relacionados à Física?	(24) Sim (24) Não	(20) Sim (16) Não	(24) Sim (22) Não
() Sim () Não			

Vemos que os dados obtidos foram bem parecidos para as três escolas. Os resultados aqui obtidos já eram esperados, já que muitos alunos veem a disciplina de Física como complicada e não atrativa, uma vez que utiliza a Matemática como linguagem para analisar e interpretar fenômenos naturais. Para Santos *et. al.* (2016):

A disciplina de Física é tradicionalmente compreendida pela maioria dos alunos como desinteressante por trazer nos conteúdos muitos cálculos matemáticos que, aparentemente, não têm serventia para as atividades práticas no cotidiano desses alunos.

Não podemos deixar de destacar que as novas tecnologias foram desenvolvidas com base na compreensão da FMC e que elas já fazem parte da realidade da maioria dos estudantes. Para Terrazzan (1992, p.5), “no mundo complexo em que vivemos, industrializado e informatizado, a Física desempenha papel privilegiado ao fornecer instrumental extremamente importante para essa compreensão. Cabe a nós essa tarefa.”

Quadro 03: Comparação das respostas dos questionários aplicado com os alunos da Escola F da Rede Federal, alunos da Escola P da Rede Privada e os alunos da Escola E da Rede Estadual, para a pergunta 3.

	Escola F	Escola P	Escola E
Número de alunos respondentes:	48	36	46
Pergunta 3: Você já ouviu falar sobre o conceito de antimatéria nas aulas de Física (ou Ciências)? Sim () Não ()	(13) Sim (35) Não	(16) Sim (20) Não	(14) Sim (32) Não

Aqui, a maioria dos alunos afirmou não ter ouvido falar sobre o conceito de antimatéria nas aulas de Física, o que é normal já que a grande maioria dos alunos não têm contato com a Física Moderna e Contemporânea durante toda a sua vida escolar. Apesar de ser um tema muito interessante, esse conteúdo ainda é pouco explorado no Ensino Médio, assim como nos livros didáticos.

Quadro 04: Comparação das respostas dos questionários aplicado com os alunos da Escola F da Rede Federal, alunos da Escola P da Rede Privada e os alunos da Escola E da Rede Estadual, para a pergunta 4.

	Escola F	Escola P	Escola E
Número de alunos respondentes:	48	36	46
<p>Pergunta 4:</p> <p>Você já ouviu falar sobre o conceito de antimatéria (na internet, em livros, etc.)?</p> <p>() Sim () Não</p>	<p>(21) Sim</p> <p>(27) Não</p>	<p>(24) Sim</p> <p>(12) Não</p>	<p>(22) Sim</p> <p>(24) Não</p>

Se compararmos as respostas da pergunta 4 com as da pergunta 3, notamos que houve uma redução dos alunos que disseram não ter ouvido falar sobre o conceito de antimatéria. Vemos aí a importância da internet, do YouTube e do seu algoritmo, que traz uma série de vídeos relacionados ao que os usuários costumam assistir. Assim, se o aluno tem o hábito de assistir a vídeos de Física, o algoritmo continuará recomendando novos vídeos relacionados ao assunto. Além do YouTube, alguns estudantes buscam por tópicos de Física na internet, usando o navegador. Filmes como Interestelar, A Teoria de Tudo, Perdido em Marte também reforçam conceitos da FMC.

Quadro 05: Comparação das respostas dos questionários aplicado com os alunos da Escola F da Rede Federal, alunos da Escola P da Rede Privada e os alunos da Escola E da Rede Estadual, para a pergunta 5.

	Escola F	Escola P	Escola E
Número de alunos respondentes:	48	36	46
<p>Pergunta 5:</p> <p>Você gostaria de estudar mais conteúdos de Física Moderna e Contemporânea (como os que estão listados na pergunta 1) nas aulas de Física?</p> <p>() Sim () Não () Indiferente</p>	<p>(35) Sim (7) Não (6) Indiferente</p>	<p>(32) Sim (3) Não (1) Indiferente</p>	<p>(33) Sim (10) Não (3) Indiferente</p>

Vemos nas respostas da pergunta 5 que os estudantes têm um grande interesse pelos conteúdos de FMC, os vários temas abordados por esta parte da Física. Algumas das suas aplicações fascinantes, como o laser, fazem com que os alunos queiram entender mais e a buscar mais. É claro que ainda existem aqueles que não gostam do conteúdo, porém, vemos que existe a necessidade de uma inserção maior de tópicos de FMC nas aulas do Ensino Médio.

3.2 RESPOSTAS DOS PROFESSORES AOS QUESTIONÁRIOS

Vamos, agora, analisar os resultados dos questionários aplicados com os professores na Escola F da Rede Federal, na Escola P da Rede Privada e na Escola E da Rede Estadual. O questionário se encontra no apêndice B. Vamos comparar as respostas dos professores das três escolas, pergunta por pergunta. Os questionários

foram aplicados com os professores de duas turmas de 3° ano do Ensino Médio em cada escola.

Quadro 06: Comparação das respostas dos questionários aplicado com os professores da Escola F da Rede Federal, professores da Escola P da Rede Privada e os professores da Escola E da Rede estadual, para a pergunta 1.

Professores	Formação acadêmica	Experiência profissional	Perguntas e respostas
pf1	Licenciatura em Física Mestrado na área de ensino de Física	Tempo de experiência como docente: 18 anos. Tempo de experiência no Ensino Médio: 18 anos. Tempo de experiência na disciplina de Física: 18 anos	1. Você trabalha conteúdos de Física Moderna e contemporânea nas suas turmas de Ensino Médio? Em caso afirmativo, quais? Sim. No primeiro ano: Relatividade especial e geral (apenas tópicos conceituais); no segundo ano: efeito fotoelétrico; transição eletrônica, espectros de emissão de luz.
pf2	Licenciatura em Física Mestrado na área de Física	Tempo de experiência como docente: 12 anos. Tempo de experiência no Ensino Médio: 11 anos. Tempo de experiência na disciplina de Física: 12 anos	1. Você trabalha conteúdos de Física Moderna e Contemporânea nas suas turmas de Ensino Médio? Em caso afirmativo, quais? Não.

pe1	Licenciatura em Física	<p>Tempo de experiência como docente: 5 anos.</p> <p>Tempo de experiência no Ensino Médio: 5 anos.</p> <p>Tempo de experiência na disciplina de Física: 5 anos.</p>	<p>1. Você trabalha conteúdos de Física Moderna e contemporânea nas suas turmas de Ensino Médio? Em caso afirmativo, quais?</p> <p>Sim, geralmente incluo tópicos de Física Moderna no conteúdo de ondulatória e óptica nas turmas de 2º ano.</p>
pe2	Licenciatura em Física	<p>Tempo de experiência como docente: 20 anos.</p> <p>Tempo de experiência no Ensino Médio: 12 anos.</p> <p>Tempo de experiência na disciplina de Física: 12 anos.</p>	<p>1. Você trabalha conteúdos de Física Moderna e contemporânea nas suas turmas de Ensino Médio? Em caso afirmativo, quais?</p> <p>Não de forma sistemática, trabalho de forma pontual e investigativa para estimular os alunos, pontuando que os principais avanços tecnológicos estão diretamente relacionados à Física Moderna. Por exemplo, o laser, a nanotecnologia (celulares e computadores), o leitor de código de barra, etc.</p>

pp	Licenciatura em Física Mestrado em Ensino de Física	Tempo de experiência como docente: 32 anos. Tempo de experiência no Ensino Médio: 32 anos. Tempo de experiência na disciplina de Física: 32 anos.	1. Você trabalha conteúdos de Física Moderna e contemporânea nas suas turmas de Ensino Médio? Em caso afirmativo, quais? Sim. Teoria da Relatividade, Física Quântica, Radioatividade.
----	--	---	---

Os professores pe1 e pe2, da rede estadual, não possuem formação acadêmica em nível de mestrado nem doutorado. Porém, isso não significa que eles abordem os conteúdos de forma menos significativa que os demais. Na grande maioria das escolas brasileiras, existe a necessidade de se trabalhar com tópicos mais atuais da Física, visto que muitas tecnologias têm seu princípio de utilização baseada na Física Moderna e Contemporânea. Alguns professores apontaram que a FMC é apresentada a nível de divulgação científica, devido a maioria dos conceitos serem complexos. Sobre as dificuldades apontadas pelos professores para levar temas de FMC para suas aulas, as mais comuns são: falta de material adequado, falta de conhecimento do conteúdo e a falta de preparação e execução das aulas (Grimes, Lawall e Neto, 2011; Neto *et. al*, 2011; apud Sales, Nilva. Lúcia. Lombardi, 2014).

Quadro 07: Comparação das respostas dos questionários aplicado com os professores da Escola F da Rede Federal, professores da Escola P da Rede Privada e os professores da Escola E da Rede estadual, para a pergunta 2.

Professores	Perguntas e respostas
pf1	2. Numa escala de 1 a 5, como você avalia o seu conhecimento sobre conteúdos de Física Moderna e Contemporânea? (x) 3

pf2	2. Numa escala de 1 a 5, como você avalia o seu conhecimento sobre conteúdos de Física Moderna e Contemporânea? (x) 1
pe1	2. Numa escala de 1 a 5, como você avalia o seu conhecimento sobre conteúdos de Física Moderna e Contemporânea? (x) 4
pe2	2. Numa escala de 1 a 5, como você avalia o seu conhecimento sobre conteúdos de Física Moderna e Contemporânea? (x) 4
pp	2. Numa escala de 1 a 5, como você avalia o seu conhecimento sobre conteúdos de Física Moderna e Contemporânea? (x) 4

Percebemos que a maioria dos professores afirmaram possuir um bom domínio dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea, apesar da pouca ou nenhuma formação acadêmica em nível de pós-graduação de alguns e de, durante a graduação, a maior parte deles não ter cursado muitas disciplinas de Física Moderna. Assim, vemos a necessidade de haver uma formação continuada entre os professores de Física. É fundamental que, além de uma formação de boa qualidade nos conteúdos de Física Clássica, o licenciado em Física tenha um bom domínio dos conteúdos de FMC.

Quadro 08: Comparação das respostas dos questionários aplicado com os professores da Escola F da Rede Federal, professores da Escola P da Rede Privada e os professores da Escola E da Rede estadual, para a pergunta 3.

Professores	Perguntas e respostas
pf1	3. Você já discutiu com seus alunos o conceito de antimatéria? Em caso afirmativo, explique como se deu esse(s) momento(s). Não.

pf2	<p>3. Você já discutiu com seus alunos o conceito de antimatéria? Em caso afirmativo, explique como se deu esse(s) momento(s).</p> <p>Não.</p>
pe1	<p>3. Você já discutiu com seus alunos o conceito de antimatéria? Em caso afirmativo, explique como se deu esse(s) momento(s).</p> <p>Não.</p>
pe2	<p>3. Você já discutiu com seus alunos o conceito de antimatéria? Em caso afirmativo, explique como se deu esse(s) momento(s).</p> <p>Não.</p>
pp	<p>3. Você já discutiu com seus alunos o conceito de antimatéria? Em caso afirmativo, explique como se deu esse(s) momento(s).</p> <p>Sim. Mostrei: vídeo e comentamos sobre antimatéria.</p>

Em geral, os tópicos de FMC são pouco explorados no Ensino Médio, como é o caso do conteúdo de antimatéria. Existem inúmeras dificuldades para que esses conteúdos sejam inseridos nas aulas, tais como: formação inadequada dos professores, carga horária insuficiente das disciplinas e pouco tempo disponível para preparação das aulas. Vemos que apenas o professor pp comentou sobre o conceito de antimatéria nas suas aulas. Talvez, por este atuar na rede privada, haja uma cobrança maior por parte da escola em lecionar temas mais atuais. Por outro lado, como tivemos um contato prévio com o professor a respeito da pesquisa e isso aconteceu alguns meses antes que fosse aplicado o questionário na rede privada, é possível que o docente tenha inserido o tema nas aulas já tendo a pesquisa em mente. De todo modo, isso não torna essa inserção menos importante, dada a importância do tema e o efeito positivo que esse momento possa ter causado.

Quadro 09: Comparação das respostas dos questionários aplicado com os professores da Escola F da Rede Federal, professores da Escola P da Rede Privada e os professores da Escola E da Rede estadual, para a pergunta 4.

Professores	Perguntas e respostas
pf1	<p>4. No seu ponto de vista, que fatores dificultam a inserção de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea nas suas aulas de Ensino Médio?</p> <p>Falta de tempo, conteúdo programático do ENEM, formação dos professores de Física com poucas disciplinas de Física Moderna.</p>
pf2	<p>4. No seu ponto de vista, que fatores dificultam a inserção de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea nas suas aulas de Ensino Médio?</p> <p>Problemas na formação dos professores de Física com poucas disciplinas de Física Moderna, dificuldade de fazer a transposição didática dos conteúdos de Física Moderna e também o professor tem que complementar a própria formação se apropriando de outros conhecimentos para abordar o conteúdo de forma decente.</p>
pe1	<p>4. No seu ponto de vista, que fatores dificultam a inserção de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea nas suas aulas de Ensino Médio?</p> <p>A deficiência na base matemática do ensino fundamental fazendo com que tenhamos sempre que fazer uma reposição de aprendizagem no início do ano, que atrasa o cronograma previsto.</p>
pe2	<p>4. No seu ponto de vista, que fatores dificultam a inserção de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea nas suas aulas de Ensino Médio?</p>

	A carga horária baixa, na maioria das vezes são em média 1 ou 2 aulas semanais; nível dos alunos que na maioria das vezes não dominam as operações básicas da matemática; formação dos professores, cujos currículos contém poucas horas trabalhadas com conteúdo da Física Moderna
pp	4. No seu ponto de vista, que fatores dificultam a inserção de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea nas suas aulas de Ensino Médio? Alguns conteúdos como a Teoria da Relatividade não são perceptíveis no cotidiano.

Os professores listaram uma série de fatores que dificultam a inserção de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea nas suas aulas de Ensino Médio. O professor pp tem uma percepção bem diferente dos demais, apontando a dificuldade de visualização dos fenômenos relativísticos, tais como dilatação do tempo e contração do comprimento. A maioria dos professores apontou as lacunas na formação docente como um problema para introduzir conteúdos de FMC nas aulas do Ensino Médio. Pinto *et. al.* (1999) destacam algumas dificuldades na introdução da Física Quântica:

A primeira refere-se ao formalismo matemático inerente à descrição quântica; outra, diz respeito às novidades conceituais que se distanciam da Física Clássica de forma ainda mais acentuada do que esta da Física do senso comum; a terceira dificuldade está relacionada com o tratamento experimental dos temas quânticos. Assim, temos que ir em busca de formas alternativas e tentativas. (PINTO *et. al.*, 1999).

Outra dificuldade que podemos destacar é que, na maioria das vezes, os professores não conseguem sequer abordar de maneira satisfatória o eletromagnetismo. Caso essa realidade fosse diferente, dentro do próprio

eletromagnetismo, poderia ser trabalhado o efeito fotoelétrico, que é um tema bastante interessante e presente em diversos dispositivos da tecnologia que usamos.

Quadro 10: Comparação das respostas dos questionários aplicado com os professores da Escola F da Rede Federal, professores da Escola P da Rede Privada e os professores da Escola E da Rede estadual, para a pergunta 5.

Professores	Perguntas e respostas
pf1	5. Você gostaria de receber uma proposta de ensino sobre o conceito de antimatéria, contendo material didático e planos de aula, para aplicar nas suas turmas do Ensino Médio? <input checked="" type="checkbox"/> Sim
pf2	5. Você gostaria de receber uma proposta de ensino sobre o conceito de antimatéria, contendo material didático e planos de aula, para aplicar nas suas turmas do Ensino Médio? <input checked="" type="checkbox"/> Sim
pe1	5. Você gostaria de receber uma proposta de ensino sobre o conceito de antimatéria, contendo material didático e planos de aula, para aplicar nas suas turmas do Ensino Médio? <input checked="" type="checkbox"/> Sim
pe2	5. Você gostaria de receber uma proposta de ensino sobre o conceito de antimatéria, contendo material didático e planos de aula, para aplicar nas suas turmas do Ensino Médio? <input checked="" type="checkbox"/> Sim
pp	5. Você gostaria de receber uma proposta de ensino sobre o conceito de antimatéria, contendo material didático e planos de aula, para aplicar nas suas turmas do Ensino Médio? <input checked="" type="checkbox"/> Sim

Todos os professores participantes da pesquisa afirmaram que gostariam de receber uma proposta de ensino sobre o conceito de antimatéria. Uma proposta desse tipo seria fascinante, tendo em vista que é um conteúdo desconhecido pela maior parte dos alunos e com poucos materiais disponíveis. Temas como esse podem ser capazes de despertar a curiosidade dos alunos, provocando um interesse maior por parte dos estudantes.

Portanto, ficou evidente que o tema antimatéria é pouco abordado em sala de aula. Vimos também que os alunos, no geral, têm interesse pela FMC e que deve haver uma maior inserção destes tópicos nas aulas do Ensino Médio.

CAPÍTULO 4 – PROPOSTA DIDÁTICA

Neste capítulo, apresentamos uma proposta didática que tem como finalidade o ensino-aprendizagem do conceito de antimatéria em turmas do Ensino Médio. Essa proposta se faz necessária dada a carência de materiais e da pouca ou nenhuma inserção desse tema no Ensino Médio.

4.1 METODOLOGIA DA PROPOSTA DIDÁTICA

A proposta didática deste trabalho consiste na utilização da teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel para a compreensão do termo antimatéria no Ensino Médio. Para isso ser possível, é necessário que os professores estejam trabalhando o conteúdo de Física Quântica, para que tenham um mínimo embasamento teórico que permita a discussão desse tópico.

O uso da teoria cognitiva de Ausubel é muito importante, pois ela preza por uma aprendizagem mais relevante e um dos seus pressupostos é que os conceitos prévios são fundamentais para a construção de novos saberes. Isso se deve ao fato de que aquele novo conhecimento não será assimilado de maneira aleatória, mas sim em associação com conceitos já existentes (subsunçor) na estrutura cognitiva do aluno. Subsunçor é um conceito ou ideia já existente na estrutura cognitiva do aluno. Esses conceitos ou ideias são como “ganchos mentais” que permitem a ancoragem de novas aprendizagens. Seguindo esse raciocínio, não seria interessante ensinar o conceito de antimatéria ao educando antes de ensinar o conceito de matéria, visto que a aprendizagem não seria significativa, mas mecânica. Assim sendo, existem algumas condições para que uma aprendizagem seja significativa.

Para haver aprendizagem significativa são necessárias duas condições. Em primeiro lugar, o aluno precisa ter uma disposição para aprender: se o indivíduo quiser memorizar o conteúdo arbitrariamente e literalmente, então a aprendizagem será mecânica. Em segundo, o conteúdo escolar a ser aprendido tem que ser potencialmente significativo, ou seja, ele tem que ser lógico e psicologicamente significativo: o significado lógico depende somente da natureza do conteúdo, e o significado psicológico é uma experiência que cada indivíduo tem. Cada aprendiz faz uma filtragem dos conteúdos que têm

significado ou não para si próprio. (BARON, M. P; DOROCINSKI, S. I; Finck, N. T. L; PELIZZARI, A. 2002, p.2)

Na aprendizagem significativa, também se espera que os alunos aprendam a aprender, ou seja, que consigam aprender de forma efetiva e que o conhecimento fique retido por mais tempo e não de forma mecânica, quando o conteúdo é apenas memorizado.

4.2 SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Esta sequência didática apresenta uma possibilidade de se ensinar o conteúdo de antimatéria de forma significativa através da utilização de mapas mentais.

Segundo Fenner (2017), mapa mental é um diagrama sistematizado que ajuda na gestão de informações. O mapa mental é a maneira mais fácil de introduzir e de extrair informações do seu cérebro – é uma forma criativa e eficaz de anotar o que realmente orienta os seus pensamentos.

Para iniciar a atividade proposta nesta sequência didática, o professor pode começar avaliando os conhecimentos prévios dos alunos. Em seguida, pode introduzir o novo conteúdo explorando os conteúdos prévios dos estudantes (subsunçores), utilizando-se de mapas mentais para a construção desses novos conhecimentos.

No primeiro encontro, será feita uma revisão de matemática acerca das operações envolvendo vetores e matrizes. Uma vez que a maioria dos estudantes têm dificuldades em matemática básica e que, talvez não estejam familiarizados com vetores e com matrizes, essa revisão será essencial para a apresentação da equação de Dirac.

No segundo encontro, será abordada um pouco da mecânica clássica, que servirá como base para apresentarmos a mecânica quântica, traçando um paralelo sobre o que é estudada em cada uma. A mecânica clássica é fundamental para o entendimento dos conceitos básicos da mecânica quântica. A mecânica clássica traz conceitos importantes como o de posição, velocidade, força e princípio fundamentais como o da conservação da energia e o da conservação do momento. No entanto, a mecânica clássica é limitada a analisar fenômenos que ocorram com baixas velocidades e que envolvam um número pequeno de partículas. Nesse domínio de validade, é necessário utilizar a mecânica quântica, que expande alguns conceitos da

mecânica clássica e introduz outros conceitos importantes, como os de dualidade onda-matéria, superposição de estados quânticos, emaranhamento, etc.

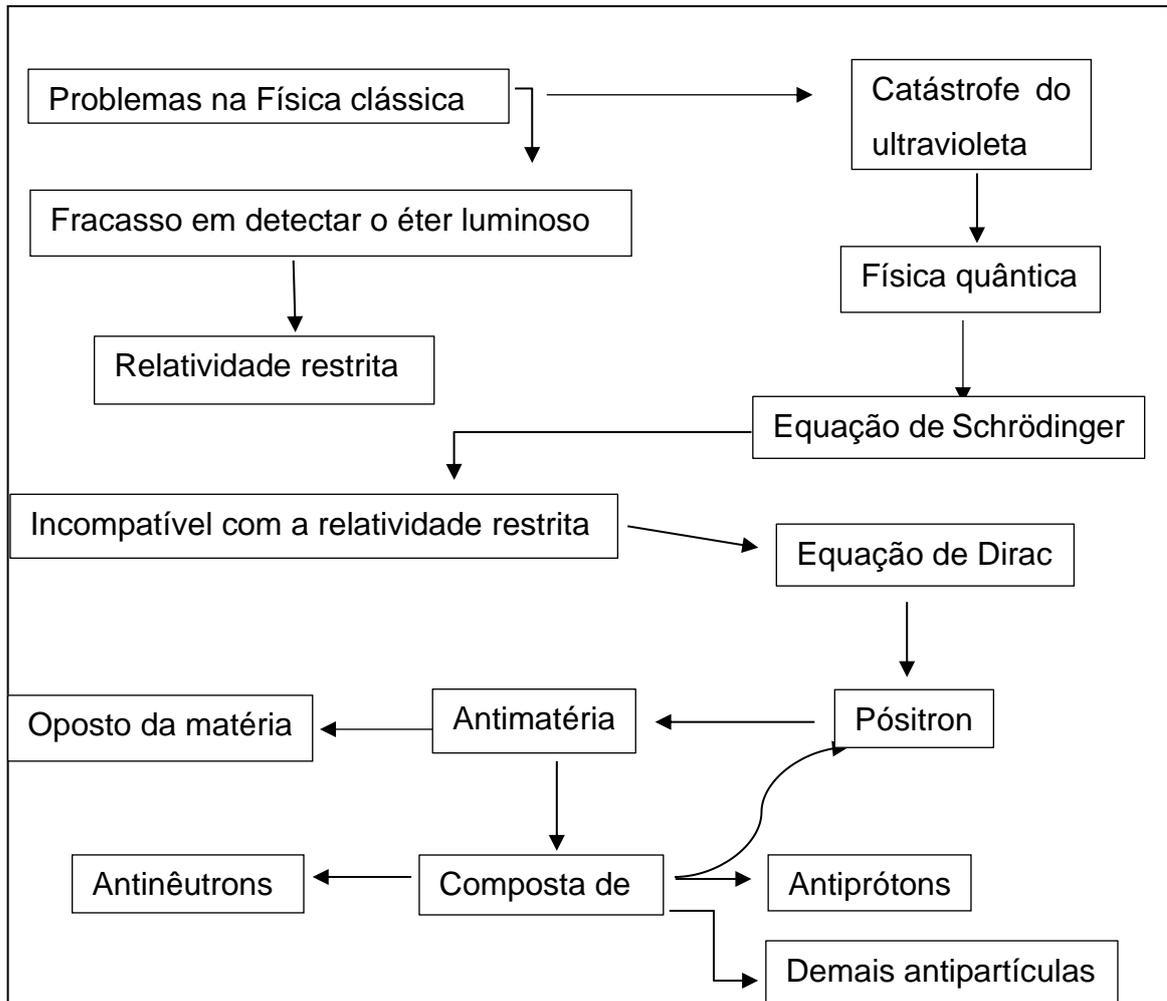
No terceiro encontro, será feita uma breve introdução à relatividade restrita (ou especial). Embora que não percebamos no dia-a-dia diretamente os efeitos relativísticos, a relatividade restrita mudou a nossa concepção de espaço e de tempo, sendo fundamental para o entendimento do nosso universo. Ela trata de coisas como viagens no tempo, buracos negros e possui aplicações interessantes, como a utilização no GPS para que se obtenha resultados mais precisos. A relatividade especial, juntamente com a mecânica quântica, são duas teorias fundamentais da física moderna.

No quarto encontro, será apresentada a equação de Dirac de forma bastante simplificada, já que a total compreensão dessa equação requer conhecimentos mais avançados de Matemática. Logo, o professor explicará apenas que esta equação descreve o comportamento de partículas subatômicas, como o elétron, levando em conta os efeitos relativísticos e que a partir dela foi prevista a existência da antimatéria. Também será explicado brevemente o significado dos operadores momento e das matrizes α e β , que estão presentes na equação de Dirac. Além disso, serão mostradas algumas aplicações interessantes da antimatéria, como o exame de tomografia por emissão de pósitron.

No quinto encontro, será introduzido o conceito de *spin*, introduzido em 1925 por George Uhlenbeck e Samuel Goudsmit. O spin é uma propriedade quântico-relativística fundamental das partículas subatômicas, tais como o elétron, e representa um *momento angular intrínseco* dessas partículas. Nesse encontro, será discutida a natureza quantizada do spin, isto é, que ele só pode assumir valores bem definidos ($\pm 1/2, \pm 3/2 \dots$). Também será explicado o significado dos termos spin “up” e “down” e seu surgimento.

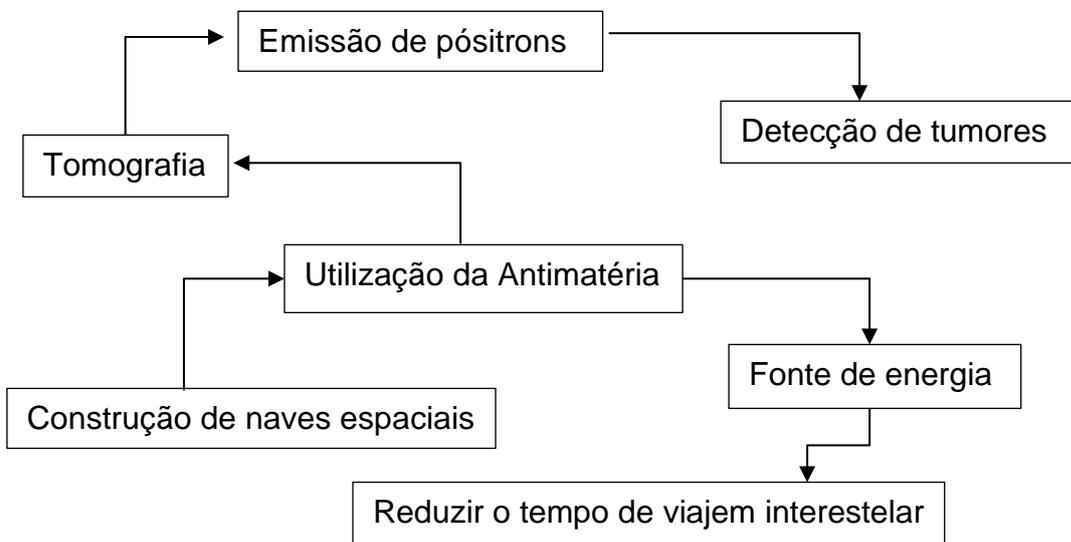
Caso o leitor deseje obter mais informações sobre a proposta de ensino sugerida neste trabalho, recomendamos consultar o apêndice C, onde estão disponíveis todos os planos de aula referentes a cada um dos encontros.

Figura 07: Mapa mental – Surgimento da antimatéria



Fonte: Acervo do autor

Figura 08: Mapa mental – Utilização da antimatéria



Fonte: Acervo do autor

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho mostrou um pouco sobre o surgimento do conceito de antimatéria, bem como as suas características. Também evidenciou, através de uma pesquisa entre professores e estudantes do município de Santa Cruz/RN, que existe a necessidade de que sejam trabalhados mais conteúdos de FMC no Ensino Médio. Além disso, traz uma proposta didática para o Ensino Médio acerca do conteúdo de antimatéria, visando uma aprendizagem significativa do conteúdo abordado entre os estudantes.

Vimos a importância da teoria de Ausubel para uma aprendizagem significativa, baseada na estrutura cognitiva dos alunos, e a construção de mapas mentais que facilitam a aprendizagem. Nesse sentido, a melhor maneira de aprender depende de cada um, já que aprendemos de formas diferentes.

Por fim, vale salientar que a intenção da proposta de ensino apresentada anteriormente não é fornecer um planejamento fechado no qual o professor consiga, de imediato, alcançar todas as metas de aprendizagem, mas apenas de sugerir uma sequência de aulas abordando um conteúdo pouco convencional, fazendo uso para isso de uma metodologia que propicie uma aprendizagem efetiva dos alunos.

Futuramente, dando continuidade ao trabalho ora apresentado, temos a pretensão de produzir um material didático sobre o conceito de antimatéria voltado para o Ensino Médio, de maneira que seja feita uma transposição didática dos conceitos mais importantes dentre aqueles apresentados no capítulo 1. Tão logo seja produzido, uma cópia desse material será entregue aos professores participantes da pesquisa, além de ficar disponível para quaisquer outros professores que desejem utilizá-lo.

REFERÊNCIAS

- A descoberta da antipartícula do elétron** – SoCientífica. Disponível em: <<https://socientifica.com.br/descoberta-da-antipartacula-do-eletron/>>. Acesso em: 22 jun. 2022.
- Aniquilação de pósitrons.** Disponível em:<<https://physicsopenlab.org/2016/02/09/positron-annihilation>>. Acesso em: 05 jan. 2023.
- Antimatéria** – Departamento de Física Nuclear – IF-USP. Disponível em: <<https://portal.if.usp.br/fnc/pt-br/p%C3%A1gina-de-livro/antimat%C3%A9ria>>. Acesso em: 16 jun. 2022.
- Antimatéria** – Unicentro. Disponível em: <<https://www3.unicentro.br/petfisica/2021/09/03/8123/>>. Acesso em: 14 jun. 2022.
- Antimatéria** – Seara da ciência. Disponível em: <<https://seara.ufc.br/pt/secoes-especiais-de-ciencia-e-tecnologia/secoes-especiais-fisica/antimateria/>>. Acesso em: 15 jun. 2022.
- Armadilha de nêutrons ultrafrios.** Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/A-sketch-of-an-loffe-trap_fig1>. Acesso em: 12 set. 2023.
- Baron, M. P; Dorocinski, S. I; Finck, N. T. L; Pelizzari, A. **Teoria da aprendizagem segundo Ausubel.** Disponível em: <<http://portaldoprofessor.mec.gov.br/storage/materiais/0000012381.pdf>>. Acesso em: 07 jul. 2023.
- Dirac, P. A. M. **The Principles of Quantum Mechanics.** Disponível em: <<https://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/wasbleibt/57355817/57355817.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2022.
- Dissertação de Mestrado – **Proposta Didática Investigativa para Desenvolver o Tema de Física de partículas e Interações Fundamentais.** Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/191047/PPEF-F0015-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>>. Acesso em: 14 out. 2022.
- Falcão, L. **Assimetria matéria-antimatéria** – a violação de CP em interações fortes e fracas. Disponível em: <scielo.br/j/rbef/a/kX8b9jKxTZs87XJNtZQY7zR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 set. 2022.
- Fenner, Germano. **Mapas Mentais: Potencializando ideias.** Disponível em:<[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=UGM9DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Segundo+Fenner+\(2017\),+mapa+mental+%C3%A9+um+diagrama+sistemizado+que+ajuda+na+gest%C3%A3o+de+informa%C3%A7%C3%B5es.+O+mapa+mental+%C3%A9+a+maneira+mais+f%C3%A1cil+de+introduzir+e+de+extrair+informa%C3%A7%C3%B5es+do+seu+c%C3%A9rebro+%E2%80%93+%C3%A9+uma+forma+criativa+e+eficaz+de+anotar+o+que+realmente+orienta+os+seus+pensamentos.&ots=GXVCvFz9Ki&sig=HshGlfJCM4](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=UGM9DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Segundo+Fenner+(2017),+mapa+mental+%C3%A9+um+diagrama+sistemizado+que+ajuda+na+gest%C3%A3o+de+informa%C3%A7%C3%B5es.+O+mapa+mental+%C3%A9+a+maneira+mais+f%C3%A1cil+de+introduzir+e+de+extrair+informa%C3%A7%C3%B5es+do+seu+c%C3%A9rebro+%E2%80%93+%C3%A9+uma+forma+criativa+e+eficaz+de+anotar+o+que+realmente+orienta+os+seus+pensamentos.&ots=GXVCvFz9Ki&sig=HshGlfJCM4)>

[_qXJbCeW1ckXLRMs&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](#)>. Acesso em 19. out. 2023.

Física de Partículas – UNESP. Disponível em:

<https://professores.ift.unesp.br/ricardo.matheus/files/talks/2012_07/aula1_pub.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2022.

Instituto de Física USP – Física V – **Criação e aniquilação da pares**. Disponível em:<

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/123094/mod_resource/content/1/FisVEsque_madaAula162013sem2.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2022.

Introdução à Física de partículas. Disponível em:

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7961899/mod_resource/content/1/Aula05.pdf>. Acesso em: 12 set. 2023.

Mar de Dirac. Disponível em: <https://stringfixer.com/pt/Dirac_sea>. Acesso em: 16 jun. 2022.

Moreira, A. M. **O Modelo Padrão da Física de Partículas**. O modelo padrão da física. 1 ed. Porto Alegre, RS, Brasil: Revista Brasileira de Ensino de Física, 2009. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/rbef/a/sMFh5cP7J9S8RzcXGsmV3fR/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 19 out. 2022.

Neto *et. al.* **Ensino de Física moderna e contemporânea no Ensino Médio**: o que pensam os envolvidos? Disponível em: <

https://www.researchgate.net/profile/Antonio-Nunes-19/publication/335286881_Ensino_de_Fisica_moderna_e_contemporanea_no_Ensino_Medio_o_que_pensam_os_envolvidos/links/5d7c08b792851c87c387ff84/Ensino-de-Fisica-moderna-e-contemporanea-no-Ensino-Medio-o-que-pensam-os-envolvidos.pdf>. Acesso em: 29 de set. 2023.

O princípio de exclusão de Pauli – Plato. Disponível em: <<http://plato.if.usp.br/1-2005/fnc0376n/na6/node7.html>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

Pinto *et. al.* **É possível levar a Física Quântica para o Ensino Médio?** Disponível em:

<https://www.if.ufrj.br/~pef/aulas_seminarios/notas_de_aula/carlos_2011_1/ensinoMQ/ZaneticPinto.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2023.

Raio X. **Produção de pares**. Disponível em: <

<https://www.oocities.org/tomografiademadeira/interacao.html>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

Rivera, G. B. **La Antimateria**. Disponível em:

<<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2205/2205.08348.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2022.

Sales, N. L. L. **PROBLEMATIZANDO O ENSINO DE FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NA FORMAÇÃO CONTINUADA DE PROFESSORES: ANÁLISE DAS CONTRIBUIÇÕES DOS TRÊS MOMENTOS PEDAGÓGICOS NA CONSTRUÇÃO DA AUTONOMIA DOCENTE**. Disponível em:

teses.usp.br/teses/disponiveis/81/81131/tde-03122014110755/publico/Nilva_Lucia_Lombardi_Sales.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2023.

Santos *et. al*: **Perspectivas e desafios sob o olhar de alguns professores de Física do Ensino Médio**. Disponível em:

<https://scientiaplena.emnuvens.com.br/sp/article/view/2970/1581>>. Acesso em: 07 jul. 2023.

Será que os mistérios em torno da antimatéria e da matéria estão de alguma forma relacionados? Disponível em: <

<https://www.astroblogs.nl/2019/11/14/hebben-de-mysteries-rondom-antimaterie-en-donkere-materie-soms-iets-met-elkaar-te-maken>>. Acesso em; 12 set.2023.

Terrazzan, E. A. **A INSERÇÃO DA FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NO ENSINO DE FÍSICA NA ESCOLA DE 2º GRAU**. Disponível em:

https://scholar.google.pt/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=A+inser%C3%A7%C3%A3o+da+f%C3%ADsica+moderna+e+contempor%C3%A2nea+no+ensino+de+f%C3%ADsica+na+escola+de+2%C2%BA+grau+-+Dialnet+%28unirioja.es%29&btnG=>. Acesso em: 13 jul. 2023.

APÊNDICES

Apêndice A – Questionário dos professores

FORMULÁRIO DE PESQUISA – PROFESSORES DO ENSINO MÉDIO

Nome do(a) professor(a): _____

Nome da Escola: _____

Turma analisada: _____ Turno: _____

Prezado(a) colega, por gentileza, preencha as informações abaixo e, em seguida, responda às questões. Agradecemos imensamente pela colaboração.

FORMAÇÃO ACADÊMICA

Graduação

- () Licenciatura em Física
- () Licenciatura em Matemática
- () Licenciatura em Química
- () Licenciatura em Ciências Biológicas
- () Outra graduação Qual? _____

Pós-graduação

- () Aperfeiçoamento Área: _____
- () Especialização Área: _____
- () Mestrado Área: _____
- () Doutorado Área: _____

EXPERIÊNCIA PROFISSIONAL

Tempo de experiência como docente: _____

Tempo de experiência no Ensino Médio: _____

Tempo de experiência na disciplina de Física: _____

PERGUNTAS

1. Você trabalha conteúdos de *Física Moderna e Contemporânea* nas suas turmas do Ensino Médio? Em caso afirmativo, quais?

2. Numa escala de 1 a 5, como você avalia o seu conhecimento sobre conteúdos de *Física Moderna e Contemporânea*?

1 2 3 4 5

3. Você já discutiu com seus alunos o conceito de **antimatéria**? Em caso afirmativo, explique como se deu esse(s) momento(s).

4. No seu ponto de vista, que fatores dificultam a inserção de conteúdos de *Física Moderna e Contemporânea* nas suas aulas no Ensino Médio?

5. Você gostaria de receber uma proposta de ensino sobre o conceito de antimatéria, contendo material didático e planos de aula, para aplicar nas suas turmas do Ensino Médio?

Sim

Não

Apêndice B – Questionário dos alunos

FORMULÁRIO DE PESQUISA – ESTUDANTES DO ENSINO MÉDIO

Obs: sua resposta é confidencial e não será compartilhada com seu professor.

Nome do(a) estudante: _____

Nome da Escola: _____

Série/Ano: _____ Turma: _____ Turno: _____

Perguntas

1. Você já estudou algum dos conteúdos abaixo nas aulas de Física (ou Ciências) da sua escola? Pode marcar mais de um, se for o caso.

- Relatividade Especial
- Física Quântica
- Física Nuclear
- Astronomia/Astrofísica
- Cosmologia

2. Você tem interesse em conteúdos relacionados à Física?

- Sim
- Não

Em caso afirmativo, quais?

3. Você já ouviu falar sobre o conceito de **antimatéria** nas suas aulas de Física (ou Ciências)?

Sim

Não

4. Você já ouviu falar sobre o conceito de **antimatéria** fora da escola (na internet, em livros, etc)?

Sim

Não

Em caso afirmativo, onde foi?

5. Você gostaria de estudar mais conteúdos de *Física Moderna e Contemporânea* (como os que estão listados na pergunta 1) nas suas aulas de Física?

Sim

É indiferente

Não

Apêndice C – Planos de Aula



PLANO DE AULA 1

1. Tema (título) da aula

Vetores e matrizes.

2. Duração da aula

1 aula com a duração de 45 minutos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo geral

Compreender os conceitos de vetor e de matriz.

3.2 Objetivos específicos

- *Compreender o que é um vetor, as suas características e como podemos expressá-los em termos das suas componentes.*
- *Compreender que um vetor pode ser representado por uma matriz coluna.*
- *Compreender o que é uma matriz, sua dimensão e identificar seus elementos.*

- *Conhecer as operações que podem ser realizadas entre vetores e entre matrizes.*

4. Conteúdos da aula

Matrizes: definição, dimensão, identificação dos elementos e noções sobre operações entre matrizes.

Vetores: definição, características (módulo, direção e sentido), componentes e representação matricial.

5. Conhecimentos prévios

Noções de álgebra e geometria, no nível de profundidade do Ensino Médio.

6. Estratégias de ensino

Aula expositiva dialogada.

7. Sequência didática

Primeiramente, o professor fará questionamentos aos alunos sobre diferentes formas de organizar dados e introduzirá o conceito de matriz. Em seguida, explicará quais são as características de uma matriz e quais operações podem ser feitas entre elas. Em seguida, o professor relembrará a diferença entre grandezas escalares e vetoriais, fazendo uma revisão sobre as características dos vetores. Por fim, mostrará que um vetor pode ser representado através de uma matriz coluna, cujos elementos são cada uma das componentes do vetor. Então, será realizada uma atividade avaliativa.

8. Recursos utilizados

Quadro branco, marcador para quadro branco, apagador e livro didático.

9. Avaliação da aprendizagem

A avaliação será formativa, de maneira que a nota (cujo valor será definido pelo professor responsável) será atribuída com base em uma atividade que será realizada na parte final da aula.

10. Referências

Plano de aula – vetores. Disponível em: <
<https://www.preparaenem.com/fisica/vetores.htm>>. Acesso em: 28 set. 2023.

Plano de aula – matrizes. Disponível em: <
<https://brasilecola.uol.com.br/matematica/matriz.htm>>. Acesso em: 28 set. 2023.



PLANO DE AULA 2

1. Tema (título) da aula

Breve revisão sobre Mecânica Clássica.

2. Duração da aula

1 aula com a duração de 45 minutos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo geral

Relembrar conceitos fundamentais da dinâmica, tais como momento e energia.

3.2 Objetivos específicos

- *Compreender como as equações de movimento da Mecânica Clássica podem prever o comportamento futuro de uma partícula.*
- *Compreender os conceitos de momento linear e de momento angular.*
- *Compreender o conceito de energia mecânica.*
- *Perceber que o momento linear e a energia também podem ser tratados como operadores.*

4. Conteúdos da aula

Objeto de estudo da Dinâmica, momento linear, momento angular, energia mecânica.

5. Conhecimentos prévios

Cinemática e leis de Newton.

6. Estratégias de ensino

Aula expositiva dialogada.

7. Sequência didática

Primeiramente, o professor discutirá qual é o objeto de estudo da dinâmica e de que forma, a partir das condições iniciais, é possível se prever o comportamento futuro de uma partícula. Em seguida, o professor relembra os conceitos de momento linear e de momento angular. Depois, revisará o conceito de energia mecânica. Por fim, será realizada uma atividade avaliativa.

8. Recursos utilizados

Quadro branco, marcador para quadro branco, apagador e livro didático.

9. Avaliação da aprendizagem

A avaliação será formativa, de maneira que a nota (cujo valor será definido pelo professor responsável) será atribuída com base em uma atividade que será realizada na parte final da aula.

10. Referências

Plano de aula – Dinâmica. Disponível em:
<<https://conceitosdomundo.pt/energia-mecanica/>>. Acesso em: 28 set. 2023.

Plano de aula – momento linear. Disponível em:
<<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/leis-de-conservacao/momento-linear-2/>>. Acesso em: 28 set. 2023.



PLANO DE AULA 3

1. Tema (título) da aula

Introdução à Relatividade Restrita.

2. Duração da aula

1 aula com a duração de 45 minutos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo geral

Introduzir os conceitos fundamentais da relatividade restrita, como dilatação do tempo e contração do comprimento.

3.2 Objetivos específicos

- *Discutir o princípio da relatividade.*
- *Perceber a velocidade da luz como uma constante universal.*
- *Introduzir o conceito de espaço-tempo.*
- *Apresentar a dilatação temporal e a contração do comprimento como consequências da teoria.*

4. Conteúdos da aula

Postulados da Relatividade Restrita. Dilatação do tempo e contração do comprimento.

5. Conhecimentos prévios

Conhecimentos básicos sobre Mecânica Clássica e Eletromagnetismo.

6. Estratégias de ensino

Aula expositiva dialogada.

7. Sequência didática

Primeiramente, o professor apresentará os problemas da Física Clássica que levaram ao surgimento da Teoria da Relatividade Restrita. Em seguida, introduzirá os dois postulados de Einstein. Depois, falará sobre a dilatação do tempo e sobre a contração do comprimento. Por fim, será realizada uma atividade avaliativa.

8. Recursos utilizados

Quadro branco, marcador para quadro branco, apagador e livro didático.

9. Avaliação da aprendizagem

A avaliação será formativa, de maneira que a nota (cujo valor será definido pelo professor responsável) será atribuída com base em uma atividade que será realizada na parte final da aula.

10. Referências

Plano de aula – Relatividade restrita. Disponível em: <

https://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/material_didatico/2011/introducao_relatividade_1.pdf>. Acesso em: 28 set. 2023.



PLANO DE AULA 4

1. Tema (título) da aula

Uma breve introdução à equação de Dirac.

2. Duração da aula

2 aulas com duração de 45 minutos cada.

3. Objetivos

3.1 Objetivo geral

Introduzir a equação de Dirac num nível de profundidade adequado ao Ensino Médio.

3.2 Objetivos específicos

- *Compreender como surgiu a equação de Dirac.*
- *Compreender como a equação de Dirac descreve o comportamento de partículas como o elétron.*
- *Compreender como a equação previu a existência da antimatéria.*

4. Conteúdos da aula

Equação de Dirac.

5. Conhecimentos prévios

Conhecimentos básicos sobre Física Clássica e noções de Física Quântica.

6. Estratégias de ensino

Aula expositiva dialogada.

7. Sequência didática

Primeiramente, o professor utilizará uma apresentação de slides para evidenciar o contexto histórico do surgimento da equação de Dirac. Depois, explicará como essa equação descreve o comportamento de partículas como o elétron. Então, mostrará como a equação previu a existência da antimatéria e, por fim, será realizada uma atividade avaliativa.

8. Recursos utilizados

Quadro branco, marcador para quadro branco, projetor multimídia.

9. Avaliação da aprendizagem

A avaliação será formativa, de maneira que a nota (cujo valor será definido pelo professor responsável) será atribuída com base em uma atividade que será realizada na parte final da aula.

10. Referências

Equação de Dirac. Disponível em: <https://astronoo.com/pt/artigos/equacao-de-dirac.html>>. Acesso em: 19 set. 2023



PLANO DE AULA 5

1. Tema (título) da aula

O conceito de Spin.

2. Duração da aula

1 aula com a duração de 45 minutos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo geral

Compreender, num nível de profundidade adequado ao Ensino Médio, o que é o spin.

3.2 Objetivos específicos

- *Conhecer como se deu o surgimento do conceito de spin.*
- *Entender o que é a quantização do spin.*
- *Compreender o significado dos termos spin up e spin down.*

4. Conteúdos da aula

O spin de uma partícula.

5. Conhecimentos prévios

Conhecimentos básicos sobre Física Clássica e noções de Física Quântica.

6. Estratégias de ensino

Aula expositiva dialogada.

7. Sequência didática

Primeiramente, o professor falará sobre os problemas na Física Quântica que levaram ao surgimento do conceito de spin. Depois, discutirá o que é a quantização do spin e a sua necessidade. Em seguida, explicará o significado os termos spin up e spin down. Por fim, será realizada uma atividade avaliativa.

8. Recursos utilizados

Quadro branco, marcador para quadro branco, projetor multimídia.

9. Avaliação da aprendizagem

A avaliação será formativa, de maneira que a nota (cujo valor será definido pelo professor responsável) será atribuída com base em uma atividade que será realizada na parte final da aula.

10. Referências

Física do spin – disponível em: <
edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5105644/mod_resource/content/0/spin-1.pdf>. Acesso em: 19 set. 2023.