



**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JARAGUÁ DO SUL – CENTRO
LICENCIATURA EM FÍSICA**

ALAN ROBERTO CORRÊA

**FÍSICA EM QUADRINHOS:
Uma introdução à mecânica quântica**

JARAGUÁ DO SUL, 2020

**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JARAGUÁ DO SUL – CENTRO
LICENCIATURA EM FÍSICA**

ALAN ROBERTO CORRÊA

FÍSICA EM QUADRINHOS: Uma introdução à mecânica quântica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física do Câmpus Jaraguá do Sul - Centro do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Licenciado em Física.

Orientador:

Prof. Dr. Luiz Henrique Martins Arthury

JARAGUÁ DO SUL, 2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Corrêa, Alan Roberto

Física em quadrinhos: uma introdução à mecânica quântica
/ Alan Roberto Corrêa; orientação de Luiz Henrique
Martins Arthury. - Jaraguá do Sul, SC, 2020. 86 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto
Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -
Centro. Licenciatura em Física. Inclui Referências.

1. Física quântica. 2. Física moderna no Ensino Médio.
3. História em quadrinhos no ensino. 4. Material didático.
I. Arthury, Luiz Henrique Martins. II. Instituto Federal de
Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Linguagem,
Tecnologia, Educação e Ciência. III. Título.

FÍSICA EM QUADRINHOS: Uma introdução à mecânica quântica

ALAN ROBERTO CORRÊA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Licenciatura em Física pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 05 de dezembro de 2020.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luiz Henrique Martins Arthury, Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Luiz Fernando Morescki
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Me. Sarah Orthmann Tavernard de Alencar
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico esse trabalho à minha família, amigos, professores, colegas e a todos os interessados em ciência.

Para mim, é muito melhor compreender o universo como ele realmente é do que persistir no engano, por mais satisfatório e tranquilizador que possa parecer.

(Carl Sagan, 1995)

RESUMO

A crescente distribuição de informação que presenciamos na atualidade proporciona um acesso cada vez mais amplo a temas como ciência e tecnologia, mas também permite a disseminação da pseudociência, uma das formas mais nocivas de desinformação. Sendo a Física Quântica um dos tópicos que mais sofre com as apropriações distorcidas da pseudociência, este Trabalho de Conclusão de Curso foi desenvolvido com o intuito de apresentar um material didático auxiliar, na forma de História em Quadrinhos (HQ), para o estudo do assunto no Ensino Médio. A escolha dos principais tópicos e conceitos de Física Quântica para o conteúdo da HQ foi realizada por meio de uma pesquisa bibliográfica, de forma a ser utilizada na sala de aula como uma introdução ao assunto, e que aborde também a sua relação com a pseudociência. O material elaborado com essa pesquisa foi avaliado por professores de Física das redes estadual e federal de Santa Catarina, realizado mediante um questionário sobre o conteúdo apresentado, visando averiguar suas potencialidades e indicando as possíveis alterações para torná-lo um material potencialmente significativo na educação científica. Desta forma, consideramos que a HQ produzida, e retificada com as otimizações dos aspectos apontados pelos professores, oferece a possibilidade de se trabalhar efetivamente com esse tipo de material, que pode complementar materiais didáticos tradicionais, representando uma opção potencialmente enriquecedora para a prática do professor no ensino de Física Quântica no Ensino Médio.

Palavras-chave: Física quântica; Física moderna no Ensino Médio; História em quadrinhos no ensino; Material didático.

ABSTRACT

The growing distribution of information that we witness today provides an increasingly broader access to topics such as science and technology, but also allows the dissemination of pseudoscience, one of the most harmful forms of disinformation. Since Quantum Physics is one of the topics that suffers most from the distorted appropriations of pseudoscience, this Course Completion Work was developed with the aim of presenting an auxiliary didactic material, in the form of Comic, for the study of the subject in high school. The choice of the main topics and concepts of Quantum Physics for the content of the comic was made through a bibliographic research, in order to be used in the classroom as an introduction to the subject, and also to address its relationship with pseudoscience. The material elaborated with this research was evaluated by physics teachers from the state and federal networks of Santa Catarina, conducted through a questionnaire on the content presented, aiming to ascertain its potentialities and indicating possible changes to make it a potentially significant material in scientific education. Thus, we consider that the comic produced, and rectified with the optimizations of the aspects pointed out by the teachers, offers the possibility of working effectively with this type of material, which can complement traditional teaching materials, representing a potentially enriching option for the teacher's practice in the teaching of Quantum Physics in high school.

Keywords: Quantum physics; Modern physics in high school; Comics in teaching; Courseware.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Capa.....	24
Figura 2: Título	25
Figura 3: Partículas atômicas e subatômicas	26
Figura 4: Física clássica	27
Figura 5: Corpo Negro.....	28
Figura 6: Gráfico teórico vs. experimental	29
Figura 7: Max Planck.....	30
Figura 8: Pacotes de energia	31
Figura 9: Equação quântica.....	31
Figura 10: Efeito fotoelétrico.....	33
Figura 11: Albert Einstein	33
Figura 12: Frequência das cores.....	34
Figura 13: Fóton	35
Figura 14: Raias espectrais.....	36
Figura 15: Modelos atômicos	36
Figura 16: Niels Bohr.....	37
Figura 17: Orbitais quantizados.....	38
Figura 18: Salto quântico	39
Figura 19: Ondas de matéria.....	40
Figura 20: Padrão de interferência da luz	40
Figura 21: Dualidade onda-partícula	41
Figura 22: Louis de Broglie.....	42
Figura 23: Equação da relatividade e equação quântica.....	42
Figura 24: Equações comparadas.....	43
Figura 25: Comprimento de onda de uma partícula	44
Figura 26: Padrão de interferência dos elétrons.....	44
Figura 27: Fim da certeza, princípio da incerteza.....	45
Figura 28: Medição de partículas	46
Figura 29: Princípio da incerteza.....	47
Figura 30: Comportamentos distintos.....	48
Figura 31: Aposta na probabilidade.....	49
Figura 32: Função de onda	49

Figura 33: Probabilidade	50
Figura 34: Densidade de pontos	50
Figura 35: Átomo de Schrödinger.....	51
Figura 36: Frutos da teoria quântica.....	52

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1. ENSINO DE FÍSICA, TEORIA QUÂNTICA E APROPRIAÇÕES INDÉBITAS	15
1.1 Pseudociência e a quântica	15
1.3 Educação científica.....	18
1.4 Aprendizagem significativa crítica	19
1.5 Quadrinhos como material didático	20
2. METODOLOGIA	22
3. HISTÓRIA EM QUADRINHOS: FÍSICA QUÂNTICA.....	23
3.1 Seção I - Introdução	24
3.2 Seção II – O problema da radiação de corpo negro	28
3.3 Seção III – O dilema do efeito fotoelétrico	32
3.4 Seção IV – O mistério das raias espectrais	35
3.5 Seção V – A descoberta das ondas de matéria	39
3.6 Seção VI – Fim da certeza, princípio da incerteza.....	45
3.7 Seção VII – A aposta na probabilidade	48
3.8 Seção VIII – Finalizações.....	51
4. O RETORNO DOS PROFESSORES.....	53
4.1 Histórias em quadrinhos como material didático	54
4.2 Física quântica em quadrinhos.....	55
5. CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS.....	60
APÊNDICE A – Física em Quadrinhos: Mas afinal, o que é a Física Quântica?	63
APÊNDICE B – Questionário	77
ANEXO A – Respostas do questionário	78

INTRODUÇÃO

Albert Einstein uma vez sugeriu que “toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil – e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos” (EINSTEIN, citado em SAGAN, 2009, p. 12). Não à toa, o astrofísico e renomado divulgador científico Carl Sagan trouxe essa ideia já no início do primeiro capítulo de seu livro *O Mundo Assombrado pelos Demônios* (SAGAN, 2009), que retrata a preocupação do autor com a então crescente invasão das explicações pseudocientíficas¹ e místicas nos meios de comunicação e que sugere, por meio de uma abordagem crítica, demonstrar como é possível distinguir ciência de pseudociência. Infelizmente, tal preocupação ainda é necessária, pois a causa do assombro vivenciado por Sagan não deixou de existir, estando mesmo cada vez mais presente em nosso cotidiano. Guardando as devidas proporções, esta pesquisa pretende seguir os passos de Sagan, ao apresentar um pequeno contributo no esforço de levar a “coisa mais preciosa que temos” ao alcance de todos.

Escolhemos trabalhar com o tema de Física Quântica, por se tratar de uma das áreas do conhecimento científico que mais sofre com as deturpações pseudocientíficas, atualmente. Um dos contextos mais importantes para se oportunizar a abordagem de um assunto tão em voga e ao mesmo tempo tão complexo, é através da educação científica no Ensino Médio, que é onde o aluno se depara (ou deveria o fazê-lo) com as questões da física moderna.

A educação deve promover para todos uma oportunidade para se dominar conhecimentos e se desenvolver capacidades cognitivas necessárias ao atendimento de suas necessidades individuais e sociais, tendo em vista a construção de uma sociedade mais justa e igualitária (LIBÂNEO, 2003). Entretanto, apesar de a Física produzir um grande impacto na sociedade, paradoxalmente a disciplina de Física parece não ter boa aceitação entre os alunos (RICARDO; FREIRE, 2007), por ser tipicamente considerada abstrata e matematizada, apoiada na repetição de procedimentos e na memorização de fórmulas (BRASIL, 2018).

¹ “Pseudo” (grego *pseûdos*, -eos, mentira, falsidade). Expressa a noção de falso, enganador. *in* Dicionário Priberam da Língua Portuguesa [online], 2008-2020, <https://dicionario.priberam.org/pseudo> [consultado em 24-09-2020].

Sendo assim, para a abordagem da Física Quântica no Ensino Médio, especialmente com a introdução de seus principais conceitos e significados, propomos nesse trabalho a utilização de um material didático na forma de História em Quadrinhos (HQ), devido à natureza tanto textual quanto pictórica do meio, e do seu potencial em transmitir ideias e provocar uma reação positiva no seu leitor (MCCLOUD, 2005), sendo portanto uma opção auspiciosa em situações de ensino e aprendizagem (CARUSO e FREITAS, 2009, SANTOS NETO e SILVA, 2013, JORGE e PEDUZZI, 2016).

Para tanto, realizamos uma pesquisa bibliográfica delineando a escolha dos principais tópicos e conceitos de Física Quântica para o conteúdo da HQ, de forma a ser utilizada no Ensino Médio como uma introdução ao assunto, e que aborde também a sua relação com a pseudociência. O material produzido com essa pesquisa foi avaliado por professores de física das redes estadual e federal de Santa Catarina, através de uma breve pesquisa qualitativa, sendo que o levantamento de dados foi realizado por meio de um questionário sobre o conteúdo apresentado, visando averiguar suas potencialidades e indicando as possíveis alterações para torna-lo um material potencialmente significativo na educação científica, no Ensino Médio.

Justificativa

Vivemos atualmente uma chamada era da informação, devido à ampla distribuição de informação proporcionada pelo advento da internet. Temas como ciência e tecnologia têm sido cada vez mais acessíveis ao público, todavia, também propiciam a disseminação da desinformação. Uma das formas mais nocivas de desinformação se dá através das afirmações pseudocientíficas, ou seja, daquelas que se apresentam como de cunho científico, mas de forma equivocada ou mesmo deliberadamente dolosa. E um dos temas da ciência que mais sofre com as apropriações distorcidas da pseudociência é a Física Quântica (CRUZ e CRUZ, 2009).

Para que possamos desenvolver um esclarecimento mínimo para reconhecer a pseudociência enquanto forma de apropriação indevida do conhecimento científico, recorreremos à educação científica. De acordo com a Lei

9.394/1996 (lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional) e dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+ 2017), é no Ensino Médio que o indivíduo aprofunda seus conhecimentos e desenvolve a compreensão dos fundamentos científicos e tecnológicos. Do ponto de vista desta pesquisa, a educação científica deve buscar proporcionar uma aprendizagem significativa crítica, através da qual “o aluno poderá fazer parte de sua cultura e, ao mesmo tempo, não ser subjugado por ela, por seus ritos, mitos e ideologias” (MOREIRA, 2000, p.7).

Entretanto, segundo o PCN+ 2017, o ensino de Física é tradicionalmente tido como abstrato e matematizado, e recomenda que não se utilize em demasia a repetição automatizada de procedimentos e memorização de fórmulas, mas que se valore a construção dos significados, dos conceitos. Sendo assim, para abordar no Ensino Médio um assunto que apresenta desafios ao seu ensino, e que justamente também por isso tem sido usado de modo indevido na sociedade, é que propomos uma HQ para que, de modo chamativo e instigante, possamos permitir que o aluno desenvolva um senso crítico necessário para distinguir as pseudociências que se aproveitam da Física Quântica para adquirir um status de cientificidade (mas que não passam de folclore pseudocientífico). Conforme trabalhos já realizados sobre o uso de HQs no ensino, conforme veremos na sequência, pensamos que uma HQ, pelo modo como se utiliza de textos e imagens, possa ser um material facilitador ao estudante, para a introdução de temas de Física Moderna.

Objetivos

O principal objetivo deste trabalho foi produzir e avaliar uma História em Quadrinhos, voltada ao ensino de Física no Ensino Médio, sobre os conceitos de Física Quântica e suas apropriações indébitas. De modo a contemplar esse objetivo, pensamos nos seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar um estudo sobre conceitos básicos de Física Quântica;
- b) Identificar, na sociedade, os usos inadequados de termos associados à Física Quântica;

- c) Produzir um material didático no formato de História em Quadrinhos sobre aspectos básicos da Física Quântica e os usos inadequados de seus conceitos na sociedade;
- d) Submeter o material produzido à avaliação de professores de Física;
- e) Analisar, com base na avaliação dos professores, as potencialidades e limites do material produzido para sua utilização no ensino de Física.

Problema de pesquisa

De modo a articular os objetivos acima em nossa pesquisa propriamente dita, chegamos no problema de pesquisa: “Quais as potencialidades e limites da utilização didática de uma História em Quadrinhos produzida para a discussão de tópicos de Física Quântica [e os usos inadequados...] no Ensino Médio?”

1. ENSINO DE FÍSICA, TEORIA QUÂNTICA E APROPRIAÇÕES INDÉBITAS

1.1 Pseudociência e a quântica

A ciência e a tecnologia nunca estiveram tão amplamente acessíveis à população, assim como o interesse por essas temáticas (MACHADO; CRUZ, 2016). Entretanto, também é notável a distribuição de desinformação, ou seja, de informações equivocadas e até mesmo enganosas, como, por exemplo, as afirmações da pseudociência, que falsamente se apresentam como de cunho científico ou tecnológico, e não raro com o intuito de ludibriar a população, objetivando o lucro.

A ciência desperta um sentimento sublime de admiração. Mas a pseudociência também produz esse efeito. As divulgações escassas e malfeitas da ciência abandonam nichos ecológicos que a pseudociência preenche com rapidez. Se houvesse ampla compreensão de que os dados do conhecimento requerem evidência adequada antes de poder ser aceitos, não haveria espaço para a pseudociência (SAGAN, 2009, p.14).

Além de sua natureza enganosa, a pseudociência pode causar verdadeiros prejuízos, como atesta Knobel:

[...] vale lembrar que inúmeras vezes a pseudociência é utilizada com má fé, destinada a usurpar o dinheiro da população em geral que ingenuamente acredita em evidências casuais, rumores e anedotas. Esse fato se torna ainda mais drástico quando essas crenças atingem a área da saúde, onde o prejuízo financeiro pode vir acompanhado de um irreparável dano físico e/ou mental (2008, p. 6).

Uma das apropriações indevidas mais recorrentes no âmbito da pseudociência é no uso indiscriminado do termo “quântico”, conceito oriundo da Física Moderna e adjetivado de modo abusivo, indouto e mesmo charlatão nas mais diversas formas de comércio, de produtos da indústria alimentícia e farmacêutica, e ao folclore místico como um todo. A rápida disseminação desse “misticismo quântico”, como veio a ser conhecida essa prática pseudocientífica, pode ser percebida com uma rápida busca por termos relacionados no sistema de busca Google em 2018, como mostrado na Tabela 1, que tem como base de comparação os resultados de buscas realizadas por Cruz e Cruz (2009):

Tabela 1: Número de resultados de busca por termos no Google

Termo pesquisado	Entradas em 2009*	Entradas em 2018**
medicina quântica	9.070.000	73.000.000
terapia ou cura quântica	3.380.000	33.600.000
psicologia quântica	6.090.000	25.400.000
mente quântica	2.910.000	85.600.000

Fonte: *Cruz e Cruz, 2009, p. 3. **Dados coletados pelo autor.

Se os números verificados em 2009 já eram considerados absurdos, com o passar de quase uma década aumentaram consideravelmente. O importante biólogo e divulgador científico Richard Dawkins contundentemente já tinha dito que “Você pode comprar quantos livros de cura quântica desejar, sem mencionar a psicologia quântica, responsabilidade quântica, moralidade quântica, imortalidade quântica e teologia quântica”. (DAWKINS, citado em CRUZ e CRUZ, p. 3, 2009).

Os anúncios e publicidades de produtos e serviços supostamente quânticos em geral não esclarecem e nem justificam o porquê do emprego do termo, e, quando o fazem, é de maneira superficial e sem nenhuma relação com a ciência Física propriamente dita. Para Machado e Cruz (2016, p. 8), “uma apropriação e uma transposição de uma teoria científica, como no caso da Física Quântica, deve no mínimo expor os pressupostos, as correntes de pensamento, seu desenvolvimento histórico e interpretação que demarcam a estrutura dessa teoria”. Sendo assim, tudo o que se apresenta como “quântico”, mas sem qualquer tipo de embasamento científico ligado à Física Quântica, é passível de uma investigação mais cuidadosa quanto às suas origens.

1.2 Ensino de física moderna

Nas últimas décadas, muitos trabalhos foram produzidos para propor a inclusão de conteúdos de Física Moderna no ensino, analisar as necessidades educacionais e verificar a percepção e as dificuldades dos professores do Ensino Médio em relação a esta temática. O ensino da Física Moderna pode propiciar:

1. uma necessária e constante atualização dos conteúdos da Ciência Escolar, a fim de se superar a restrição do currículo às Ciências desenvolvidas até o final do século XIX;
2. uma compreensão mais ampla do mundo atual – um mundo mediado por tecnologias e objetos, cujo desenvolvimento vem sendo influenciado pelos avanços dessas duas áreas de conhecimento²;
3. uma maior aproximação entre a Ciência Escolar e outras manifestações culturais presentes no cotidiano, uma vez que assuntos relativos a essas duas ciências estão presentes em filmes e reportagens veiculados pela mídia;
4. uma compreensão mais aprofundada da importância da imaginação nos estudos científicos, por sua capacidade própria de antecipar realidades e, assim, de realizar (PAULA, ALVES e MATEUS, 2011, p. 7).

Em uma pesquisa realizada em 2009, físicos, pesquisadores em Ensino de Física e professores de Física do Ensino Médio propuseram uma lista de tópicos de Física Contemporânea para o Ensino Médio, entre os quais se destacam: efeito fotoelétrico, átomo de Bohr, leis de conservação, radioatividade, forças fundamentais, dualidade onda-partícula, fissão e fusão nuclear, origem do universo, raios X, metais e isolantes, semicondutores, laser, supercondutores, partículas elementares, relatividade restrita, Big Bang, estrutura molecular, fibras ópticas (CRUZ; CRUZ, 2009). Apesar da recomendação de todos esses profissionais, muitos desses assuntos ainda são estranhos ao contexto escolar.

Como já sugerimos, o processo de ensino e aprendizagem de física é tradicionalmente tido como abstrato e matematizado, de tal maneira que o PCN+ aponta o uso excessivo da “memorização de fórmulas ou repetição automatizada de procedimentos, em situações artificiais ou extremamente abstratas, ganhando consciência de que é preciso dar-lhe um significado” (BRASIL, 2017, p. 60). Claro que não podemos insistir nesse tipo de estratégia descontextualizada e sem significado ao aluno. Para Fiolhais e Trindade (2003), uma característica da Física que a torna particularmente difícil para os alunos é o fato de lidar com conceitos abstratos e, em larga medida, contra intuitivos. Logo, deveríamos propiciar ao aluno um conjunto de ferramentas críticas (como o é o próprio pensamento científico), de modo que ele possa “desenvolver a capacidade de processar informações e lidar com os estímulos do ambiente, organizando os dados disponíveis da experiência” (LUCKESI, 1994, p. 72).

Ademais, o ensino de física, assim como as demais disciplinas, ainda encontra diversas outras dificuldades, visto que a realidade da educação brasileira,

² Os autores incluem também o estudo de Química em seus argumentos.

com superlotação nas salas de aula, carência de professores de Física (INEP, 2004), e defasada estrutura material, metodológica e didática nas escolas, especialmente da rede pública, faz com que os professores busquem novas metodologias educacionais.

Valadares (2002) relata que um dos grandes desafios atuais do ensino de ciências nas escolas de nível fundamental e médio é construir uma ponte entre o conhecimento ensinado e o mundo cotidiano dos alunos. Diante disso, acreditamos ser de grande valia pensarmos em materiais de fácil e amplo acesso, como textos, vídeos, simulações, e, como nossa presente proposta, HQs que permitam uma maneira de tratar assuntos normalmente abstratos de modo mais próximo à linguagem do aluno.

1.3 Educação científica

Através da educação científica o indivíduo conhece os fundamentos da ciência e da tecnologia, e com isso pode desenvolver a capacidade de reconhecer as afirmações da pseudociência como forma de apropriação indevida do conhecimento científico. Entendemos que é no Ensino Médio que o indivíduo deve desenvolver e aprimorar o pensamento crítico e científico. De fato, a Lei 9.394/1996, que estabelece as diretrizes e bases da educação nacional (LDB), afirma, no art. 35, que o Ensino Médio terá como finalidades:

- I – a consolidação e o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos no ensino fundamental, possibilitando o prosseguimento de estudos;
- II – a preparação básica para o trabalho e a cidadania do educando, para continuar aprendendo, de modo a ser capaz de se adaptar com flexibilidade a novas condições de ocupação ou aperfeiçoamento posteriores;
- III – o aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico;
- IV – a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina.

Entretanto, nas Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+) para o Ensino Médio, é reconhecido que “o vasto conhecimento de física, acumulado ao longo da história da humanidade, não pode estar todo presente na escola média” (BRASIL, 2017, p. 61). Desta maneira, o

documento não prevê especificamente o ensino da Física Quântica, porém um de seus temas estruturadores é “Matéria e Radiação”, que abrange alguns tópicos da Física Moderna, “indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria” (BRASIL, 2017, p. 70). E isso nada mais é que Física Quântica. Os Parâmetros Curriculares Nacionais buscam construir uma visão da física de modo que esta esteja voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, crítico e atuante, com instrumentos para compreender, intervir e interagir com a realidade. Neste sentido, a física deve mostrar-se como um conjunto de competências específicas que possibilitem aos estudantes perceber e lidar com os fenômenos naturais e tecnológicos, presentes em seu cotidiano e na compreensão do universo como um todo, a partir de modelos e leis por ela construídos. Isso sugere que o aluno possa se tornar um sujeito crítico, que não apenas perceba a importância do pensamento científico, como a sugestão de Einstein no início deste trabalho, mas também possa diferenciar o conhecimento científico genuíno de discursos pseudocientíficos e charlatões.

1.4 Aprendizagem significativa crítica

“Aprendizagem significativa é aprendizagem com significado, compreensão, sentido, capacidade de transferência; oposta à aprendizagem mecânica, puramente memorística, sem significado, sem entendimento.” (MOREIRA, 2000, p. 6). A vontade de aprender, a utilização de materiais potencialmente significativos e o enriquecimento dos conhecimentos do aprendiz são alguns dos pressupostos para que ocorra a aprendizagem significativa.

Quando chega à escola, o aluno já possui concepções prévias sobre os assuntos que ele verá. De acordo com Moreira (2000, p. 4) “a aprendizagem significativa caracteriza-se pela interação cognitiva entre o novo conhecimento e o conhecimento prévio”, portanto, em uma metodologia de ensino que leve em conta os conhecimentos prévios dos estudantes, os novos conhecimentos adquirem significados ainda mais significativos. O conhecimento prévio é uma variável na aprendizagem, pois “aprendemos a partir do que já temos em nossa estrutura cognitiva” (MOREIRA, 2000, p. 4). Este primeiro momento da aula é importante para que seja possível haver uma aprendizagem significativa: a “aprendizagem

significativa é um processo por meio do qual uma nova informação relaciona-se com um aspecto especificamente relevante da estrutura de conhecimento do indivíduo” (MOREIRA, 1999, p. 153). A verificação de quais conhecimentos prévios os alunos já possuem em sua estrutura de conhecimento proporciona uma oportunidade para adaptar a aulas às necessidades específicas de cada grupo, e também possibilita uma posterior socialização entre os estudantes de diferentes graus de entendimento sobre o tema.

Todavia, para que não haja o risco de aprender significativamente coisas irrelevantes, dúbias ou simplesmente erradas, a aprendizagem significativa também deve buscar ser realizada com um viés crítico, permitindo ao indivíduo participar de sua cultura e, simultaneamente, estar fora dela, para percebê-la e reconhecer o que está “fugindo da realidade”, como os embustes da pseudociência, e ainda ter condições de lidar com tais situações quando necessário.

É através da aprendizagem significativa crítica que o aluno poderá fazer parte de sua cultura e, ao mesmo tempo, não ser subjugado por ela, por seus ritos, mitos e ideologias. É através dessa aprendizagem que ele poderá lidar construtivamente com a mudança sem deixar-se dominar por ela, manejar a informação sem sentir-se impotente frente a sua grande disponibilidade e velocidade de fluxo, usufruir e desenvolver a tecnologia sem tornar-se tecnófilo (MOREIRA, 2000, p. 7).

Uma proposta para alcançar tais objetivos é a utilização de materiais didáticos que auxiliem a compreensão dos conhecimentos apresentados e que permita uma integração entre o mundo cotidiano dos alunos e o saber ensinado, proporcionando assim um acréscimo substancial no processo educacional, almejando viabilizar uma aprendizagem significativa crítica.

1.5 História em Quadrinhos como material didático

As histórias em quadrinhos – HQs ou simplesmente quadrinhos – há muito tempo fazem parte do cotidiano de muitas pessoas de todas as faixas etárias, e compõem um cenário visual da cotidianidade, tendo a capacidade de viabilizar a cidadania cultural dos estudantes, permitindo articular as informações construídas em diferentes disciplinas curriculares por meio de textos e imagens (SANTOS NETO; SILVA, 2013). A partir de 2006, os quadrinhos foram inseridos na lista do

Programa Nacional Biblioteca da Escola (PNBE), que tem como objetivo promover o acesso dos estudantes à informação e à cultura, além de estimular o hábito da leitura (VERGUEIRO; RAMOS, 2009). Assim sendo, existe a possibilidade de serem utilizados como material didático na tentativa de promover uma introdução diferenciada a temas como os da Mecânica Quântica nas aulas de física no Ensino Médio, auxiliando os estudantes na compreensão do assunto.

McCloud (2005, p. 9) define histórias em quadrinhos como “imagens pictóricas e outras justapostas em sequência deliberada destinadas a transmitir informações e/ou a produzir uma resposta no espectador”, ou seja, mais do que um gênero, um material ou uma filosofia, os quadrinhos são um meio que pode conter ideias e imagens e que tem o potencial de gerar uma reação no seu leitor. Sendo assim, além da pura apreciação enquanto obra de arte, os quadrinhos tem o potencial de serem utilizados em um contexto educacional, acrescentando uma nova e diferente perspectiva sob um determinado assunto. Segundo Jorge e Peduzzi (2016, p. 11), “a utilização de Histórias em Quadrinhos em contextos educacionais pode e deve ser explorada de diversas maneiras.” Para Caruso e Freitas,

as tirinhas, por seu caráter lúdico, podem ser utilizadas pelo professor como instrumento de apoio em suas aulas capaz de “prender a atenção” dos alunos. Elas têm a vantagem de permitir que qualquer assunto de Física ou de Ciências possa ser abordado sem recorrer, num primeiro momento, à matematização do fenômeno (2009, p. 364).

Além da preocupação com o conteúdo a ser abordado, a escolha pela criação de uma HQ, para ser utilizada como material didático, demanda algum conhecimento de como esta mídia é produzida, dos elementos necessários para sua construção, de como fazer com que os leitores entendam o que queremos mostrar. Através da combinação de imagens e palavras é possível criar efeitos que não existem quando qualquer uma delas são usadas separadamente e, para tanto, é preciso estar atento à clareza e a comunicação da mensagem que pretendemos passar (MCCLOUD, 2008). Embora não existam regras rígidas para a elaboração das HQs, existem ferramentas, técnicas e tecnologias que podem servir de auxílio nesse processo criativo, e um dos propósitos desse trabalho foi verificar algumas soluções para esse fim.

2. METODOLOGIA

A produção de um material didático na forma de HQ (Apêndice A), para uma abordagem introdutória à Física Quântica, foi realizada a partir de uma pesquisa bibliográfica. Esse tipo de pesquisa tem por finalidade conhecer as diferentes formas de contribuição científica que se realizaram sobre determinado assunto ou fenômeno (OLIVEIRA, 1943, p. 199). Essa pesquisa fundamentou a escolha dos tópicos de Física Quântica potencialmente significativos para os alunos numa introdução ao tema, a fundamentação teórica dos conteúdos abordados e a linguagem escolhida para esse trabalho.

A escolha do material bibliográfico para a produção da HQ foi realizada tendo em conta a estrutura da narrativa, priorizando os aspectos conceituais da Teoria Quântica e o seu desenvolvimento histórico. Materiais bibliográficos destinados à divulgação científica também foram utilizados, devido à sua linguagem mais acessível, tendo em vista que o público alvo da HQ são os alunos do Ensino Médio.

Na sequência, para avaliar as potencialidades deste material, realizamos uma pesquisa qualitativa junto a professores de física. De modo geral, uma pesquisa qualitativa visa compreender detalhadamente os significados e características situacionais dos fenômenos, é descritiva e tem participação direta do pesquisador na interpretação dos dados (PINHEIRO, 2010, p. 20). Esses dados, em nosso caso, foram obtidos mediante de um questionário, um instrumento para coleta de dados com uma série ordenadas de perguntas que devem ser respondidas sem a presença do entrevistador (MARCONI; LAKATOS, 2007, p. 98).

As perguntas que compõem o questionário (Apêndice B) foram elaboradas objetivando a avaliação do material, quanto ao uso do formato (História em Quadrinhos) como material didático no ensino de Física, quanto ao conteúdo apresentado para o ensino dos aspectos conceituais, históricos e matemáticos da ciência e da Física Quântica.

O questionário foi submetido a um processo de validação, consistindo no escrutínio de três alunos da sétima fase do curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Campus Jaraguá do Sul – Centro, e de dois professores de Física da rede pública estadual, para a verificação da linguagem, da estrutura e da clareza das perguntas.

Desse modo, o questionário foi disponibilizado digitalmente na Internet e encaminhado para cerca de trinta professores da rede pública estadual e federal de Santa Catarina, dos quais oito responderam (Anexo A) e foram utilizados como os dados da pesquisa, possibilitando assim a verificação das potencialidades do material, de seus pontos fortes e fracos, e das possíveis alterações que se mostrem necessárias para torná-lo potencialmente mais significativo.

3. HISTÓRIA EM QUADRINHOS: FÍSICA QUÂNTICA

A história em quadrinhos produzida pretendeu abordar conceitos de Física Quântica mediante uma narrativa conceitual e histórica, sendo dividida em 8 seções que abordam as situações e as personalidades envolvidas no desenvolvimento da teoria, suas conclusões e aplicações, e ainda a questão da apropriação do termo pelo chamado “misticismo quântico” (MACHADO; CRUZ, 2016, p. 4).

É preciso enfatizar que, devido ao caráter evidentemente conciso da linguagem utilizada no formato de HQ, a intervenção do professor é fundamental para uma explanação mais aprofundada dos conceitos e das imagens utilizadas. Do mesmo modo, como muito bem lembra Dionísio:

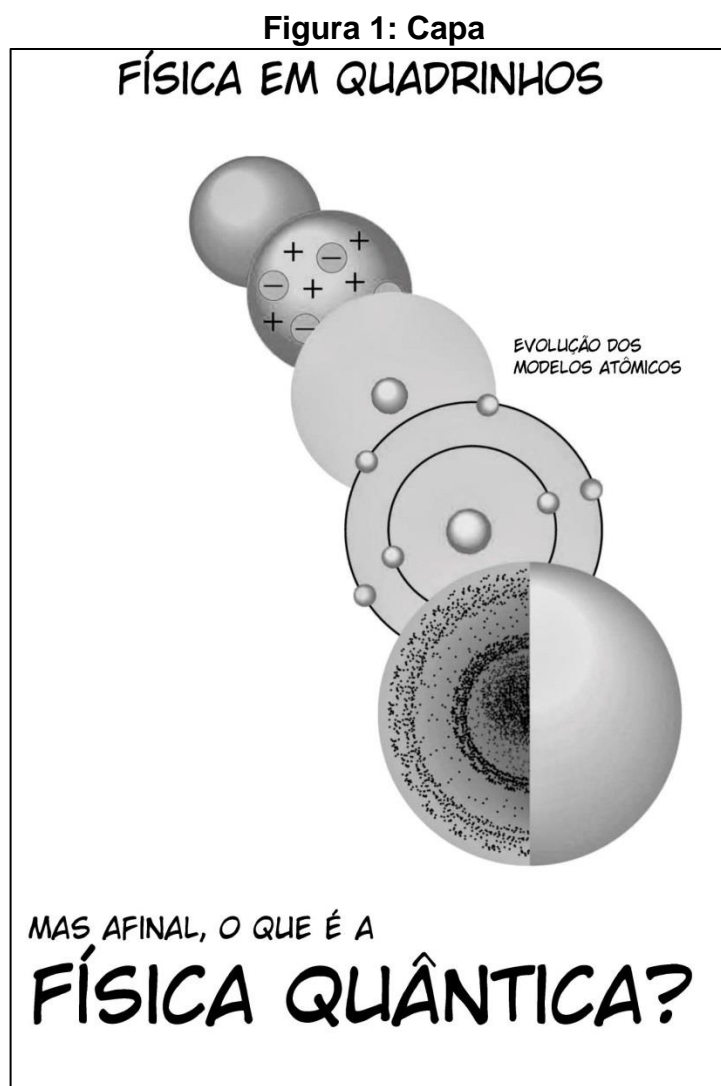
Ao falar de Física, não se poderá evitar o uso de alguns recursos de linguagem que são próprios a essa disciplina, como a representação de situações por meio de figuras, a referência a grandezas físicas por meio de símbolos e algumas equações (2004, p. 2).

Além das figuras, gráficos e equações apresentadas, os desenhos de “pessoas” e expressões faciais utilizadas na HQ elaborada foram inspirados nos *emojis*³, devido à rica variedade em seu rol de opções para expressões e situações diversas, e que foram adaptadas para suprir as necessidades do desenvolvimento da narrativa. Apresentamos na sequência toda a HQ elaborada, onde cada figura se refere a um segmento dos quadrinhos.

³ “Emoji”, ou símbolo gráfico, ideograma ou sequência de caracteres [ex.: :-), :-), ^_^] que expressa uma emoção, uma atitude ou um estado de espírito, geralmente usado na comunicação eletrônica informal. *in* Dicionário Priberam da Língua Portuguesa [online], 2008-2020, <https://dicionario.priberam.org/emoji> [consultado em 24-09-2020].

3.1 Seção I - Introdução

Apesar de uma capa não ser propriamente um elemento essencial de uma HQ, foi um recurso adotado para enriquecer o conteúdo na forma de uma apresentação primária do assunto tratado.



Fonte: produzido pelo autor

A imagem escolhida para a capa (figura 1) ilustra a “evolução”⁴ dos modelos atômicos, um tópico que é revisitado no corpo da HQ e demonstra duas características essenciais do roteiro: 1) as dimensões extremamente diminutas do

⁴ Usamos “evolução” em um sentido popular. Naturalmente sabemos que os modelos atômicos não se constituem propriamente como uma evolução, representando, na verdade, rupturas e modificações importantes em suas ideias.

nível da natureza, a níveis atômicos e mesmo subatômicos de que a Física Quântica trata e 2) o aspecto histórico do desenvolvimento científico acerca do assunto. No formato de texto, o título “Física em Quadrinhos” aparece como um jogo de palavras com o próprio termo “História em Quadrinhos”, e o título principal “Física Quântica” é apresentado dentro de uma pergunta, indicando que a resposta será o objeto da composição.

A HQ propriamente dita começa com um quadro que antecede o título (figura 2), trazendo um texto e uma imagem com o objetivo de refletir a realidade de crise de representação que o próprio termo (quântica) sofre atualmente devido à apropriação indevida e, conseqüentemente, por seu mau uso. “Essa crise de representação reside em um estranhamento na compreensão e na interpretação dos fenômenos descritos pela teoria científica, no caso a Teoria Quântica. Esta não compreensão desperta uma série de especulações e equívocos” (MACHADO; CRUZ, 2016, p. 6).

Figura 2: Título



Fonte: produzido pelo autor

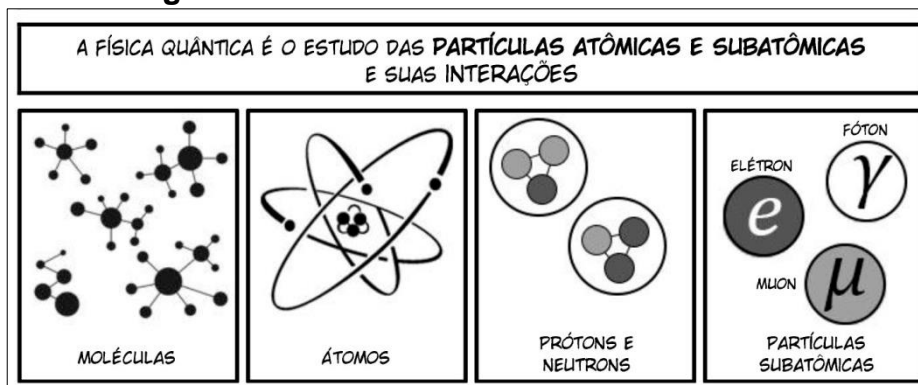
O desenho mostra a confusão e descontentamento de um sujeito ao pesquisar em um computador sobre quântica e obtendo resultados dúbios, demonstrados pela lista de embustes “quânticos”, em formato de texto e de cor mais clara que preenche o quadrinho. Essa apropriação indevida foi um dos principais motivadores para a confecção desse material. Segundo Machado e Cruz,

[...] a compreensão e entendimento de questões da ciência e tecnologia são cada dia mais presente na vida dos cidadãos e deve ser ponto de pauta na formação dos professores, fazendo-se presente através de recursos

didáticos que evidenciem estes tipos de apropriações na história, na sociedade e nas ciências. (2016, p. 14).

Na continuidade, com destaque para o título da História em Quadrinhos, também se repete a pergunta da capa, que é respondida já no próximo quadro (figura 3).

Figura 3: Partículas atômicas e subatômicas



Fonte: produzido pelo autor

A interpretação da definição da Física Quântica, expressado no texto do primeiro quadro da figura 3, é uma síntese do conceito apresentado por Pessoa Jr. (2006, p. 90), que diz que a Física Quântica “é a teoria física que descreve o mundo dos átomos”, e em conformidade com Dionísio (2004, p. 23), que afirma que a mesma é “a teoria adequada para a descrição dos sistemas atômicos”. Os quadrinhos com desenhos de moléculas, átomos e de partículas subatômicas (prótons, nêutrons, elétrons, fótons etc.) ilustram de forma simplificada alguns dos objetos de estudo da Física Quântica de acordo com as definições acima.

A seguir, uma pequena introdução (figura 4) ilustra a situação de um breve momento histórico, no final do século XIX, quando alguns cientistas acreditavam que a Mecânica Newtoniana e a Teoria Eletromagnética – que constituíam o cerne do que conhecemos atualmente como Física Clássica – poderiam explicar todos os fenômenos naturais, e que a tarefa dos físicos a partir de então seria apenas calcular e elaborar novos métodos e instrumentos para atingir medições mais precisas das grandezas físicas:

Por volta de 1890, a Física vivia uma situação um tanto paradoxal. Por um lado, as hoje denominadas teorias clássicas da Física estavam perfeitamente estabelecidas, gozavam de inteira confiança. A Mecânica, a

Termodinâmica e o Eletromagnetismo constituíam um formidável arcabouço teórico ao qual nada mais parecia necessário, nem mesmo possível, acrescentar (DIONÍSIO, 2005, p. 149).

No entanto, dois tipos de fenômenos escapavam das explicações da Física Clássica, um deles associado com o movimento de corpos em velocidades muito elevadas (pelo menos 10% da velocidade da luz) e outro relacionado com o comportamento de corpos muito pequenos (átomos e moléculas). O primeiro problema deu origem à Teoria da Relatividade, e o segundo levou à estruturação da Física Quântica (CHESMAN; ANDRÉ; MACEDO, 2004), também conhecida como Mecânica Quântica ou Teoria Quântica, que é o foco da HQ produzida.

Figura 4: Física clássica



Fonte: produzido pelo autor

Os pilares da Física Clássica (Mecânica e Eletromagnetismo) são ilustrados pelos desenhos dos dois cientistas citados: Isaac Newton, que aparece com uma maçã “bichada” na cabeça, em alusão à anedota em diz que ele “descobriu a gravidade” quando uma maçã caiu em sua cabeça; e James Clerck Maxwell, conhecido como o “pai do eletromagnetismo”⁵, mostrado com pequenas faíscas saindo de sua cabeça. Vale lembrar que os desenhos tem caráter lúdico e visam facilitar a associação da imagem ao conceito, para o aluno, devendo o professor

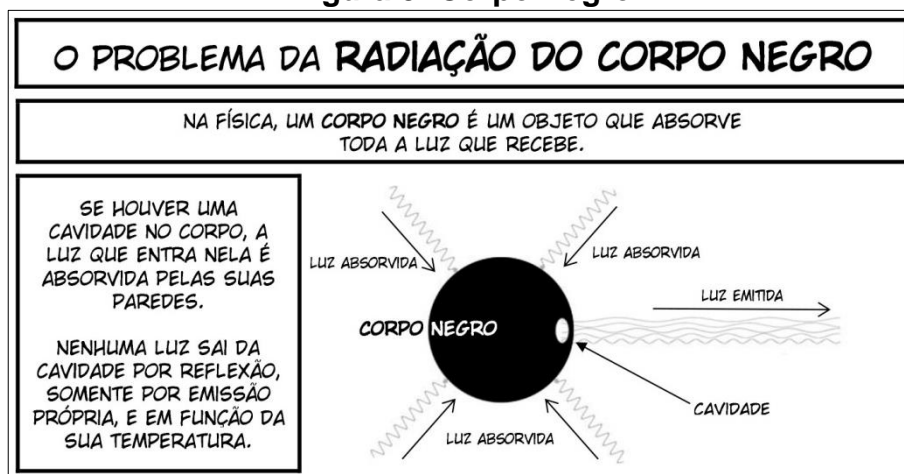
⁵ James Clerck Maxwell sintetizou, no séc. XIX, as ideias do eletromagnetismo em quatro equações, as hoje conhecidas equações de Maxwell. Mas essas ideias foram estruturadas por diversos outros pesquisadores, como Faraday, Volta e Ampere.

trazer esses aspectos à tona quando trabalhar com este material. Os dois sujeitos ilustrados entre os cientistas representam os pesquisadores da época, um com expressão orgulhosa de certeza afirmando “que está tudo resolvido na Física” e o outro divagando e lembrando que ainda há coisas a resolver, referenciadas no texto final, que elenca algumas das questões que a Física Clássica não abordava satisfatoriamente, como a radiação de cavidade, os espectros de raios e o efeito fotoelétrico (DIONÍSIO, 2004, p. 2). De fato, as questões ainda não respondidas foram justamente o divisor de águas entre a Física Clássica e a Física Moderna.

3.2 Seção II – O problema da radiação de corpo negro

Muitos autores indicam que um dos marcos iniciais da Física Quântica foi a explicação para a radiação eletromagnética emitida por corpos muito aquecidos. As teorias existentes, que tratavam a luz apenas como onda, não explicavam os dados obtidos experimentalmente, e este fato ficou conhecido como o problema da “radiação de corpo negro”, um objeto hipotético que absorve a totalidade da energia que incide sobre ele – não refletindo luz ou calor, e portanto indetectável e invisível por reflexão – e que, simultaneamente, seria o irradiador perfeito (CHESMAN; ANDRÉ; MACEDO, 2004; MAIA, 2009). Desta maneira, a figura 5 apresenta essa questão como o título da seção e é seguido por um texto conceituando o Corpo Negro e suas características básicas.

Figura 5: Corpo Negro



Fonte: produzido pelo autor

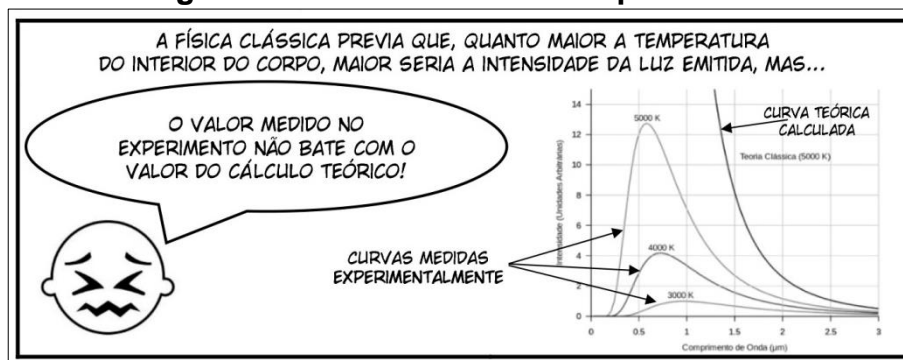
A ilustração que acompanha o texto, ainda na figura 5, reflete a descrição de Dionísio, que diz que:

A melhor realização prática de um corpo negro ideal, ou seja, aquele capaz de absorver completamente toda a radiação que recebe, é um pequeno orifício na superfície de um objeto oco: toda a radiação que por ele penetra ficará sofrendo sucessivas reflexões nas paredes internas, até ser eventualmente absorvida por completo (2005, p. 150).

Por se tratar de um objeto hipotético, a representação do Corpo Negro na HQ produzida pode se revelar bastante simplista (usualmente a representação da radiação incidente se dá pelo mesmo orifício da emissão, por exemplo), e mais uma vez se faz necessário lembrar da função do professor, que precisa intervir e complementar a explicação com exemplos mais acessíveis aos alunos, e trazer tais conceitos para a realidade dos estudantes (um bloco de metal aquecido é uma aproximação de um corpo negro, por exemplo).

De acordo com Dionísio (2005, p. 151), os cálculos baseados na Teoria Eletromagnética previam a emissão de uma quantidade infinita de energia nas frequências mais altas e, portanto, não conseguiam reproduzir os valores obtidos experimentalmente. Tais discrepâncias entre os valores teóricos e medidos são ilustrados na figura 6 que, junto ao sujeito com a expressão de frustração pelas diferenças constatadas, traz um gráfico que deve ser interpretado com o apoio do professor.

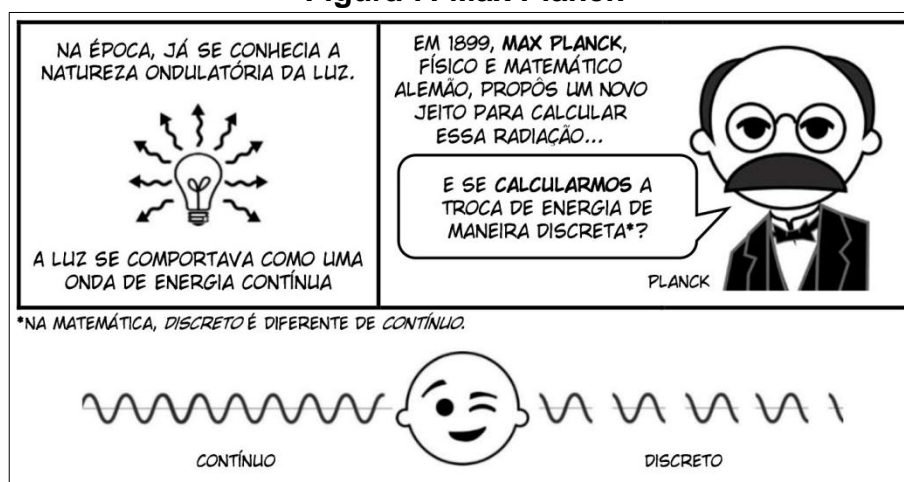
Figura 6: Gráfico teórico vs. experimental



Fonte: produzido pelo autor

Para explicar o que estava acontecendo, a figura 7 introduz o papel do físico e matemático alemão Max Planck que, entre 1899 e 1900, propôs que os corpos aquecidos emitem e absorvem luz em quantidades discretas de energia, e não de forma contínua, como numa onda (PAULA; ALVES; MATEUS, 2011).

Figura 7: Max Planck



Fonte: produzido pelo autor

A figura 7 também ilustra o comportamento ondulatório da luz, já conhecido na época de Planck, representado como raios ondulantes saindo de uma lâmpada, e explica que “na matemática, a palavra ‘discreta’ é um antônimo para ‘contínua’” (DIONÍSIO, 2004, p. 5), sendo tal diferença ilustrada na forma de ondas ininterruptas, quando contínuo, e intermitentes, quando discreto.

Na sequência, é apresentada uma série de quadrinhos (figura 8) com o personagem de Planck explicando, de maneira muito sucinta, o pensamento que o levou a solucionar matematicamente o problema do Corpo Negro.

Figura 8: Pacotes de energia



Fonte: produzido pelo autor

O texto dos balões sintetiza a exposição de Pessoa Jr. (2006, p. 91), que relata como o físico alemão solucionou o problema:

Imaginando que cada átomo em um corpo oscila com uma frequência ν , Planck foi obrigado a postular que a energia desta oscilação é um múltiplo inteiro de uma quantidade discreta ε , dada por $\varepsilon = h\nu$, onde h é hoje conhecida como a “constante de Planck”. Esta quantidade indivisível de energia ε era estranha à Física Clássica, e seria conhecida como um “quantum” (ou pacote) de energia.

O quadro da figura 9 dá ênfase para a equação de Planck que resolveu a discrepância dos resultados teóricos e medidos para a radiação do Corpo Negro, com os devidos termos descritos.

Figura 9: Equação quântica


PARA QUEM É FÃ DA MATEMÁTICA!

A ENERGIA DE CADA UM DESSES "PACOTES" VAI SER IGUAL À FREQUÊNCIA DE SUA ONDA MULTIPLICADO POR ESSA CONSTANTE!

$$E = nhf$$

- E É O VALOR TOTAL DA ENERGIA
- n É O NÚMERO DE "PACOTES"
- h É A CONSTANTE DE PLANCK
- f É A FREQUÊNCIA DA ONDA!

*QUANTUM, SIGNIFICA QUANTIDADE EM LATIM



PODEMOS CHAMAR ESSES PACOTES DE QUANTUM!*

E ASSIM PLANCK RESOLVEU MATEMATICAMENTE A DISCREPÂNCIA ENTRE OS RESULTADOS PARA A RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO, E SUA SOLUÇÃO LHE VALEU UM NOBEL DE FÍSICA EM 1918! MAS AINDA HAVIA ALGUNS PROBLEMAS A RESOLVER...

Fonte: produzido pelo autor

A palavra “*quantum*” é de origem latina e se traduz por “quantidade”. “Esta quantidade indivisível de energia [...] seria conhecida como um ‘quantum’ (ou pacote) de energia, donde se derivou a expressão ‘Física Quântica’ para a nova teoria que iria surgir” (PESSOA JR., 2006, p. 91). E embora a palavra *quantum* não tenha sido primeiramente utilizada por Planck, o desenho ilustra o físico se referindo ao termo para explicar sua proposta. Esse recurso foi utilizado para simplificar e reforçar a ideia da ligação de Planck com o próprio conceito do termo *quantum*, e por conseguinte, esclarecer a origem da expressão Física Quântica, e também nesse caso é imprescindível lembrar da necessidade da interferência do professor para possibilitar melhor entendimento da questão.

Em 1918, Max Planck foi laureado com o Prêmio Nobel de Física “em reconhecimento dos serviços que ele prestou para o avanço da Física por sua descoberta da energia quantizada” (THE NOBEL..., 2020, traduzido pelo autor). Tal informação está contida no texto do último quadro da figura 9 e tem por objetivo destacar e valorizar a importância dessa descoberta no desenvolvimento da teoria.

3.3 Seção III – O dilema do efeito fotoelétrico

O Efeito Fotoelétrico, “que descreve como a incidência de luz é capaz de gerar uma corrente elétrica em um metal” (PESSOA JR., 2006, p. 91), era outro problema não solucionado pela Física Clássica. O quadrinho (figura 10) traz uma representação simplificada do que ocorre no Efeito Fotoelétrico: uma onda de luz “colide” com uma placa de metal, que emite um elétron como resultado da colisão, o que é acompanhado de um texto que define o fenômeno e revela sua discrepância em relação à Física Clássica.

Figura 10: Efeito fotoelétrico

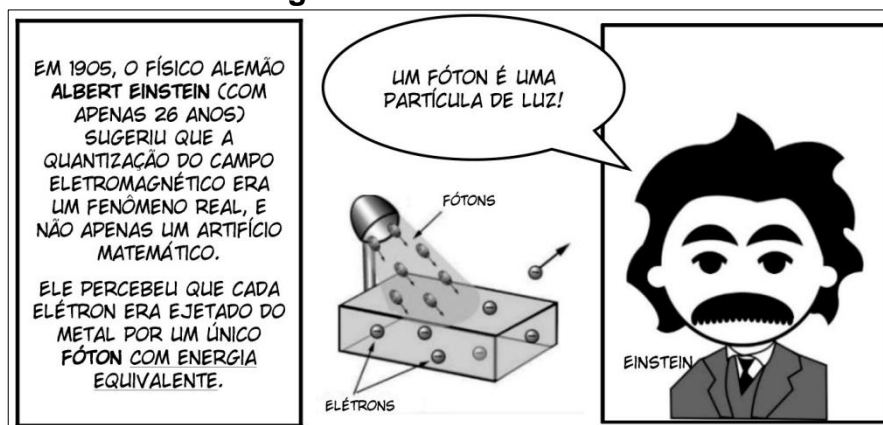


Fonte: produzido pelo autor

Numa interpretação clássica, o fenômeno ocorria pois os elétrons deveriam estar adquirindo energia cinética dos feixes de luz incidindo no metal, indicando que, com uma iluminação mais intensa (mais luz), maior seria a energia de emissão dos elétrons. Mas experimentalmente não era o que acontecia, pois as medições mostravam que a energia com que os elétrons eram emitidos não se relacionava com a intensidade de luz. Além disso, foi percebida uma frequência limiar, um limite abaixo do qual não ocorria mais a emissão de elétrons, independentemente da intensidade da luz (MCEVOY; ZARATE, 2012, p. 46).

O físico alemão Albert Einstein é apresentado nesse trecho da história (figura 11) como uma das principais personalidades no desenvolvimento da Teoria Quântica. “Em 1905, em seu chamado “ano miraculoso”, em um dos cinco artigos que publicou nos *Annalen der Physik*, Einstein propôs uma ideia revolucionária: a quantização do campo eletromagnético” (DIONÍSIO, 2004, p. 11).

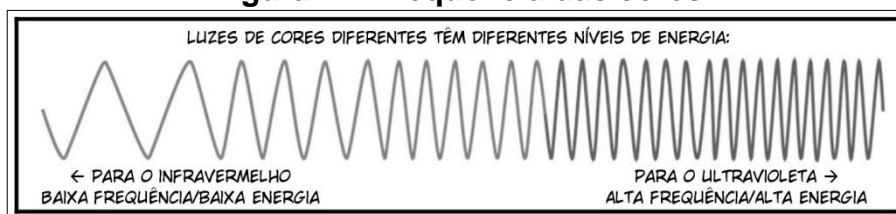
Figura 11: Albert Einstein



Fonte: produzido pelo autor

Segundo Dionísio (2005, p. 155), “Einstein propôs, no artigo em foco, que um raio luminoso fosse considerado como uma rajada de partículas, mais tarde denominadas fótons”. Essa solução apresentada pelo físico alemão foi conclusiva para explicar o efeito fotoelétrico. Em mais um exemplo da liberdade criativa e simplicidade intencional do autor, o que deve ser devidamente gerenciado pelo professor, a ilustração mostra Einstein se referindo ao *fóton*, mesmo não tendo sido ele a forjar o termo⁶. A figura 12 ilustra os diferentes níveis de energia das cores (frequência) de luz, entretanto apenas evidencia a questão da frequência da onda, devido ao fato de a HQ produzida não ser colorida. A inclusão desta imagem pareceu importante para demonstrar a questão da quantidade de energia em relação à frequência da onda eletromagnética, indispensável para explicar a ideia de quantização de Einstein, e, em razão das limitações da representação, requer necessariamente a intervenção do professor para elucidá-la adequadamente.

Figura 12: Frequência das cores



Fonte: produzido pelo autor

Os quadros seguintes (figura 13) trazem, na fala do personagem, um resumo do raciocínio de Einstein para explicar o fenômeno, conforme Dionísio (2004, p. 11-12): “Einstein estabeleceu que a energia de um fóton vale o produto da constante de Planck pela frequência da radiação: $E = h \times f$ ”, isto é, indicando a relação energética do elétron com a frequência da luz, não com sua quantidade ou intensidade.

⁶ Einstein se referia a “quantum de ação” ou “quantum da radiação”, que de todo modo possui o mesmo significado de fóton, termo cunhado cerca de 20 anos após Einstein ter publicado seu artigo sobre o Efeito Fotoelétrico, em 1905.

Figura 13: Fóton



Fonte: produzido pelo autor

Albert Einstein recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1921⁷, “por seus serviços em Física Teórica, e especialmente por sua descoberta da lei do Efeito Fotoelétrico” (THE NOBEL..., 2020, traduzido pelo autor). Como mencionado anteriormente, esse tipo de informação visa demonstrar a importância de tal descoberta para o desenvolvimento científico da Teoria Quântica.

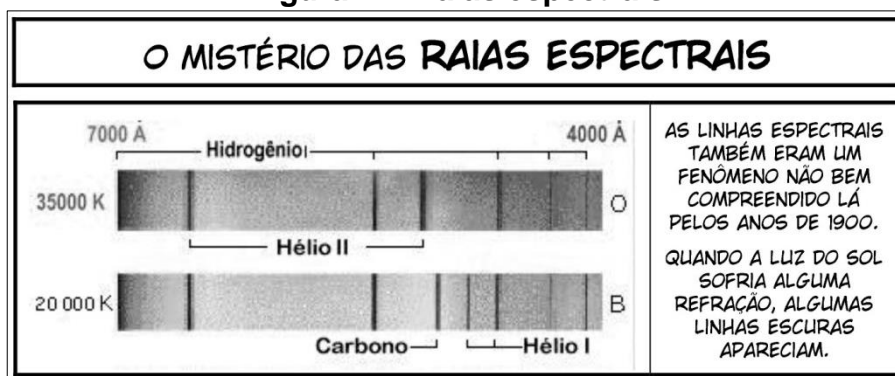
3.4 Seção IV – O mistério das raias espectrais

As raias espectrais também estavam na lista de problemas não explicados adequadamente pela Física Clássica. Os espectros das linhas de luz eram o resultado de um experimento em que um fecho luminoso passa através de um prisma, revelando um padrão de linhas coloridas e brilhantes, que diferiam de acordo com o material que produzia a luz (MCEVOY; ZARATE, 2012, p. 60-61). A figura 14 mostra o título da seção, uma breve definição do fenômeno e uma imagem

⁷ No ano de 1921 não foi anunciado um vencedor a tempo da cerimônia daquele ano, sendo a decisão de laurear Einstein uma escolha tardia da Academia Sueca de Ciências. O prêmio foi então anunciado em 1922, mas referente ao ano anterior. Para aumentar a confusão, Einstein não conseguiu ir receber o prêmio em 1922, tendo o feito em 1923.

reproduzindo as raias espectrais de absorção de duas fontes diferentes, sendo que tal representação se torna vazia de significado sem o auxílio da interpretação do professor. Como repetidamente estamos chamando a atenção, não é nossa intenção que a HQ produzida seja simplesmente oferecida ao aluno sem o devido aporte do professor. Pelo contrário, deve ser um material indissociável da prática do professor, para enriquecer e complementar suas aulas.

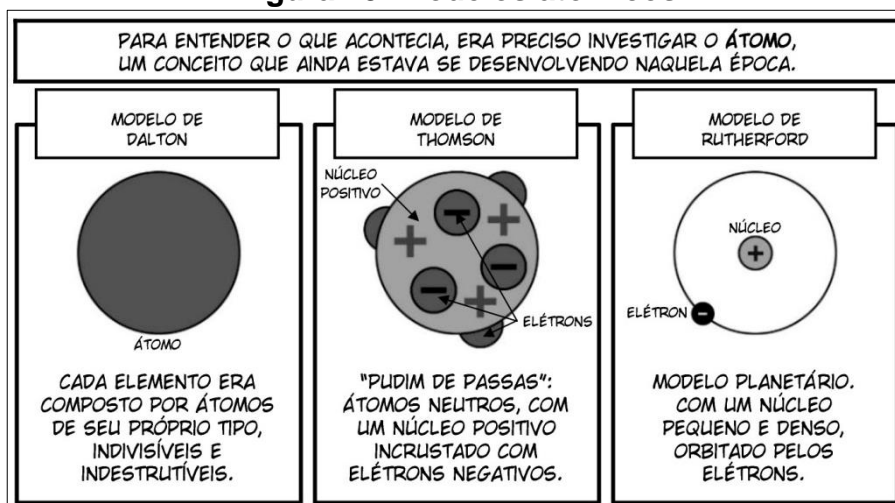
Figura 14: Raias espectrais



Fonte: produzido pelo autor

Historicamente, para explicar o fenômeno, foi necessário entender algo mais sobre o átomo, cujo conceito ainda guardava diferentes possibilidades, conforme ilustrado na figura 15:

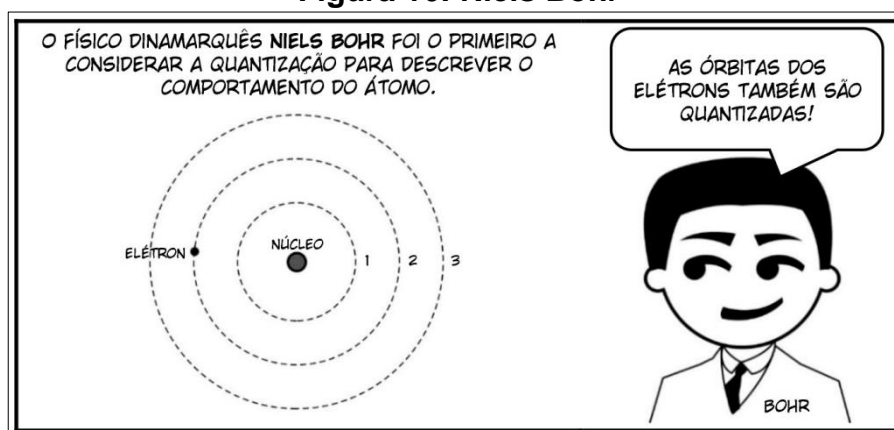
Figura 15: Modelos atômicos



Fonte: produzido pelo autor

Cada quadro da figura 15 mostra os principais modelos atômicos, a título de ilustração das interpretações de cada pesquisador, começando pelo modelo do químico e físico inglês John Dalton, que resgatou o antigo conceito de átomo do filósofo grego Demócrito, como algo indivisível (MCEVOY; ZARATE, 2012, p. 19). O segundo quadro traz o modelo do físico inglês J. J. Thomson, “no qual os elétrons negativos estavam encaixados numa esfera uniforme de carga positiva, como uvas passas num panetone” (MCEVOY; ZARATE, 2012, p. 71), e o terceiro é o modelo planetário do também físico inglês Ernest Rutherford (aluno de Thomson), que mostrava o átomo tendo os elétrons orbitando um centro pequeno, massivo e positivo (MCEVOY; ZARATE, 2012, p. 74). A evolução da pesquisa sobre o átomo e suas características ainda estava se desenrolando, e o físico dinamarquês Niels Bohr foi o responsável pelo próximo passo no desenvolvimento do tema. Segundo Pessoa Jr. (2006, p. 92), “Rutherford e Hans Geiger descobriram que o átomo tinha um núcleo duro [...]. Bohr então resolveu aplicar as ideias de Planck para este modelo atômico”, ou seja, o físico levou em consideração a quantização para caracterizar o átomo, como mostra a figura 16:

Figura 16: Niels Bohr

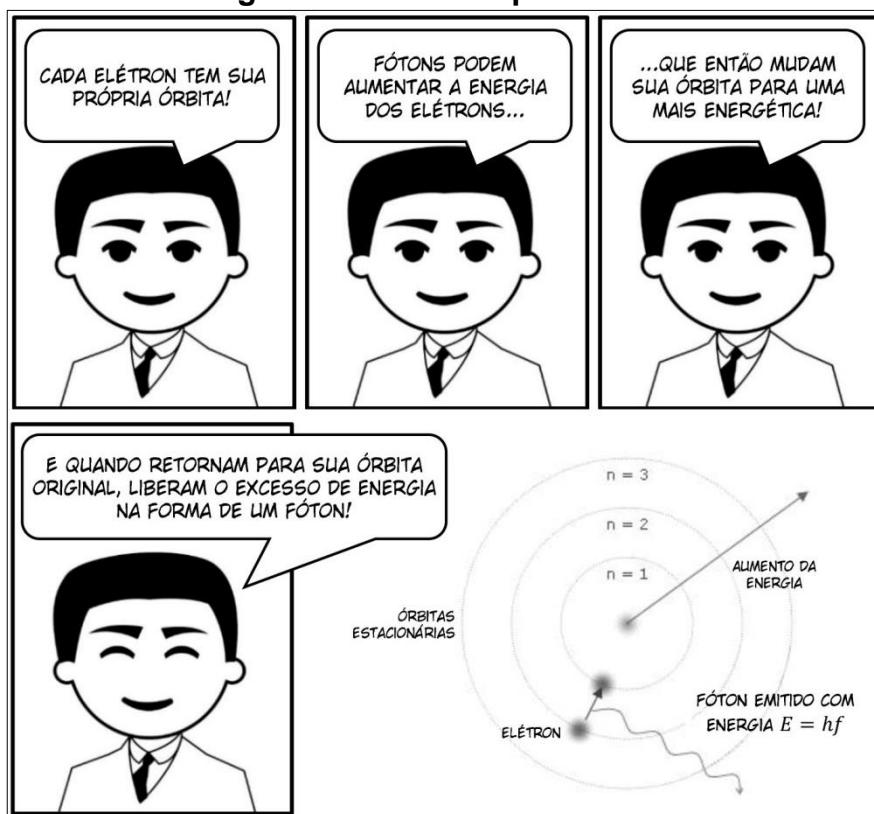


Fonte: produzido pelo autor

Para explicar essa situação, a figura 17 ilustra o conceito apresentado por Bohr, de acordo com o relato de Pessoa Jr.:

Em seu modelo, os elétrons que circundam o núcleo só podem ocupar certos níveis energéticos discretos. Quando um elétron passa de um nível mais energético para um menos energético, ele emite um quantum de luz com a diferença de energia correspondente a este salto (2006, p.92).

Figura 17: Orbitais quantizados

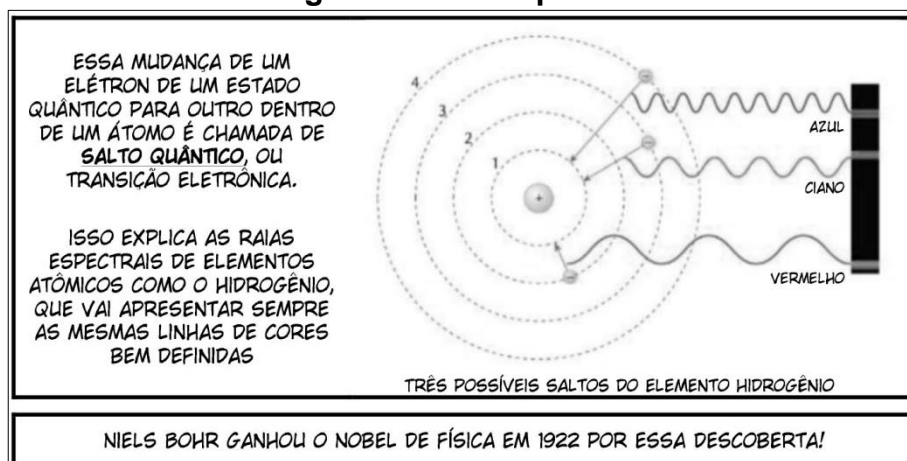


Fonte: produzido pelo autor

Essa diferença de energia é dada justamente pela relação de Planck em sua resolução do problema do corpo negro, também usada por Einstein na explicação do Efeito Fotoelétrico.

Segundo Dionísio (2004, p. 15), “a emissão de um fóton, segundo Bohr, ocorre quando um elétron salta de um estado de maior energia para outro de menor energia, devendo a energia do fóton emitido ser igual à energia perdida pelo elétron neste salto”. Além de elucidar o comportamento dos elétrons e das suas órbitas no átomo de hidrogênio, essa descoberta estabeleceu a questão da quantização na estrutura atômica, e foi fundamental para explicar as raias espectrais. McEvoy e Zarate (2012, p. 89) relatam que “a partir de então, Bohr estava em condições de esboçar um diagrama de energia baseado em obras físicas no átomo para demonstrar como as várias séries espectrais se formavam”. A figura 18 reflete, através de texto e de um gráfico, a concepção de Bohr para as raias espectrais:

Figura 18: Salto quântico



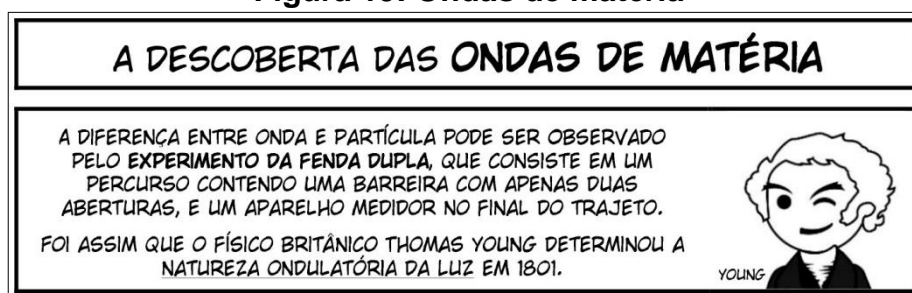
Fonte: produzido pelo autor

Como a representação gráfica na figura 18 trata de cores, cabe ao professor a tarefa de elucidá-la da melhor maneira aos alunos. O reconhecimento das contribuições de Bohr “por seus serviços na investigação da estrutura dos átomos e da radiação que emanam” (THE NOBEL..., 2020, traduzido pelo autor) veio com o Prêmio Nobel de Física de 1922, e foi também referenciado na figura 18.

3.5 Seção V – A descoberta das ondas de matéria

Para se trabalhar adequadamente com as ideias da quântica, é difícil (ou mesmo indesejável) procedermos a uma narrativa essencialmente cronológica. À pergunta “o que é a Teoria Quântica?”, Pessoa Jr. respondeu que “em pouquíssimas palavras, é uma teoria que concilia, de alguma maneira, aspectos contínuos (ondulatórios) e discretos (corpúsculares)” (2006, p. 89). Até essa seção da HQ, a descoberta da quantização que “decompunha” as ondas em partículas foi o foco da história. A narrativa então retrocede um pouco no tempo para demonstrar o experimento que evidenciou o comportamento ondulatório da luz, com um pequeno texto introdutório (figura 19):

Figura 19: Ondas de matéria



Fonte: produzido pelo autor

O texto indica que a natureza ondulatória da luz foi corroborada pelo físico inglês Thomas Young (figura 19) através da experiência da fenda dupla, conforme descreve Pessoa Jr.:

Um exemplo disso é dado pelo experimento de duas fendas. Em 1802, Thomas Young observou franjas de interferência para a luz que passava por duas fendas finas, e explicou esse padrão luminoso com a hipótese de que a luz é na realidade uma onda (2006, p. 89).

Mais uma vez, é interessante o professor mobilizar essa informação atentamente, uma vez que a natureza ondulatória da luz já tinha sido proposta anteriormente pelo físico e matemático Christiaan Huygens, no séc. XVII. Mas foi o experimento de Young que trouxe grande aceitação para essa proposta.

Figura 20: Padrão de interferência da luz



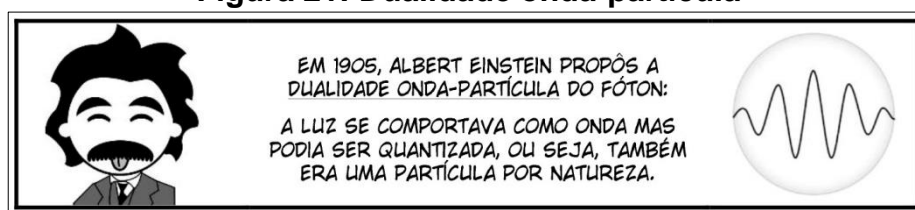
Fonte: produzido pelo autor

Através do experimento da fenda dupla, a demonstração de Young do padrão de interferência obtido, com linhas brilhantes e escuras alternadas, foi considerada a evidência que atestava que a natureza da luz era ondulatória (MCEVOY; ZARATE, 2012, p. 107). Os gráficos da figura 20 dispõem-se a demonstrar as diferenças entre partículas e ondas nos resultados que podem ser obtidos no

experimento, e novamente a interpretação das imagens requer o auxílio do professor como mediador no processo.

Na sequência, através da figura 21, é lembrada a ideia de Einstein sobre a quantização da luz e é revelada a proposta da seção, que é tratar sobre a dualidade onda-partícula, com as imagens do físico alemão e de uma representação bastante simplificada de um fóton como onda-partícula, que, como qualquer representação neste trabalho, certamente demanda a atenção do professor.

Figura 21: Dualidade onda-partícula



Fonte: produzido pelo autor

Conforme expõe Pessoa Jr.:

O primeiro tratamento teórico dessa dualidade onda-partícula foi apresentado por Louis de Broglie, irmão mais novo de Maurice, que lhe ensinara que o raio X se comporta tanto como onda quanto como partícula. Louis foi mais longe, porém, estendendo a dualidade para toda a matéria, em 1923. Usando a terminologia de de Broglie, toda partícula ou forma de radiação se reduz a um móvel com uma onda associada (2006, p. 93).

De maneira bem resumida, os quadros da figura 22 ilustram como o físico francês Louis de Broglie estendeu a ideia de Einstein do fóton, enquanto ente dual, também para a matéria, ou seja, partículas, como o elétron, também apresentariam um comportamento ondulatório.

Figura 22: Louis de Broglie



Fonte: produzido pelo autor

Para descrever suas ideias matematicamente, de Broglie utilizou a equação de Einstein para a relatividade, relacionada à equação quântica de Planck/Einstein (MCEVOY; ZARATE, 2012, p. 114), conforme demonstrado na tabela da figura 23.

Figura 23: Equação da relatividade e equação quântica

DE BROGLIE UTILIZOU A FAMOSA EQUAÇÃO DA RELATIVIDADE* DE EINSTEIN PARA A ENERGIA TOTAL E A RELACIONOU COM A EQUAÇÃO QUÂNTICA DE PLANCK/EINSTEIN!	
* MAS ESSA É OUTRA HISTÓRIA ;)	
EQUAÇÃO DA RELATIVIDADE:	EQUAÇÃO QUÂNTICA:
$E = mc^2$	$E = hf$
A ENERGIA TOTAL (E) É IGUAL A MASSA (m) VEZES A VELOCIDADE DA LUZ (c) AO QUADRADO	A ENERGIA TOTAL (E) É IGUAL A CONSTANTE DE PLANCK (h) VEZES A FREQUÊNCIA (f)

Fonte: produzido pelo autor

Na sequência, as equações são desenvolvidas e explicadas por de Broglie, conforme descrevem McEvoy e Zarate (2012, p. 114):

Ele começou com a famosa equação de Einstein, $E=mc^2$ para o conteúdo de energia total de tudo. Nesse caso, fótons...

$$E = mc^2 = (mc)(c)$$

Agora, observe a série de substituições feitas por de Broglie...

Dado que mc é exatamente massa vezes velocidade, a força, p, de um fóton...

$$E = (p)(c) = (p)(f\lambda)$$

Usando c (velocidade) = f (frequência) x λ (comprimento de onda) para as ondas.

Equacionando $E=hf$ da relação Planck/Einstein com a expressão acima, obtemos:

$$(h)(f) = (p)(f\lambda)$$

E um cálculo simples dá...

$$h/p = \lambda$$

Essa linha de raciocínio de de Broglie foi adaptada e referenciada conforme representado na tabela da figura 24:

Figura 24: Equações comparadas

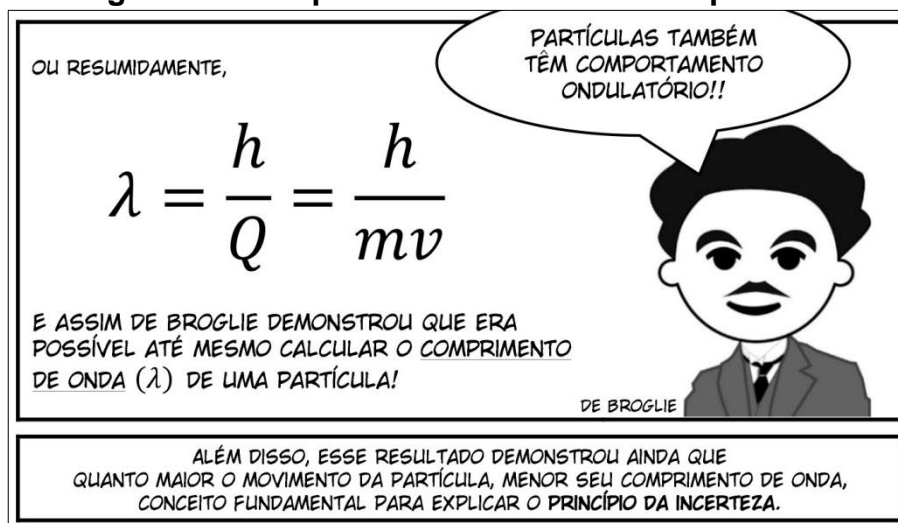
MATEMÁTICOS VAMOS LÁ!	
$E = mc^2$	COMEÇANDO COM A EQUAÇÃO DA RELATIVIDADE
$E = (mc)(c)$	QUE TAMBÉM PODE SER ESCRITA ASSIM
$E = (Q)(c)$	MASSA VEZES VELOCIDADE (mc) É O MOMENTO (Q), QUE É A QUANTIDADE DE MOVIMENTO.
$E = (Q)(f\lambda)$	COMO É A VELOCIDADE DA LUZ, SABEMOS QUE PODEMOS CALCULAR A VELOCIDADE DE UMA ONDA MULTIPLICANDO SUA FREQUÊNCIA (f) POR SEU COMPRIMENTO DE ONDA (λ)
$(Q)(f\lambda) = (h)(f)$	AGORA É SÓ IGUALAR A EQUAÇÃO QUÂNTICA COM À EQUAÇÃO DA RELATIVIDADE - AGORA TRANSFORMADA EM $E = (p)(f\lambda)$

Fonte: produzido pelo autor

A conclusão do desenvolvimento matemático da proposta de de Broglie, que diz que “o comprimento de onda para uma partícula ou corpo de momento p (para partículas com massa, $p = mV$) seria dado por: $\lambda = h/p$ ” (PESSOA JR., 2006, p. 93), assim como uma interpretação mais conceitual, são apresentadas na figura 25. A fala do personagem traduz, de forma sucinta, o que o físico francês pretendia expor com suas deduções:

de Broglie atribuía realidade física a suas ondas, às quais referia-se como “ondas de matéria”. Em sua concepção, as partículas apresentavam comportamento ondulatório, porque viajavam no espaço conduzidas por estas ondas, acompanhando a sua propagação (DIONÍSIO, 2004, p. 17).

Figura 25: Comprimento de onda de uma partícula



Fonte: produzido pelo autor

Louis de Broglie “previu assim que seria possível observar fenômenos ondulatórios para o elétron, como logo se confirmaria” (PESSOA JR., 2006, p. 93). Os padrões de difração previstos por de Broglie foram verificados experimentalmente, confirmando a propriedade ondulatória dos elétrons (MCEVOY; ZARATE, 2012, p. 117), conforme ilustrado na figura 26:

Figura 26: Padrão de interferência dos elétrons



Fonte: produzido pelo autor

Também foi referenciado na figura 26 o Prêmio Nobel de Física de 1929, recebido por Louis de Broglie “por sua descoberta da natureza ondulatória dos

elétrons” (THE NOBEL..., 2020, traduzido pelo autor), para encerrar a seção, evidenciando, mais uma vez, o reconhecimento da contribuição do pesquisador na evolução da Teoria Quântica.

3.6 Seção VI – Fim da certeza, princípio da incerteza

A Física Clássica demonstrava com clareza, através das suas medições, tanto a posição quanto a velocidade de um corpo em um determinado momento no tempo. Mas o físico alemão Werner Heisenberg percebeu que “a hipótese de Planck implica que quanto mais exatamente se tenta medir a posição de uma partícula, menos exatamente se consegue medir a sua velocidade, e vice-versa” (HAWKING, 2002, p. 42), como mostrado na sequência de quadros da figura 27 que, além do título da seção e do texto introdutório, introduz o personagem de Heisenberg começando a desenvolver sua ideia.

Figura 27: Fim da certeza, princípio da incerteza



Fonte: produzido pelo autor

Uma das maneiras mais imediatas de perceber os problemas associados à medição da posição e velocidade de uma partícula de dimensões diminutas, pode ser vislumbrada assim que tentarmos “ver” um elétron, por exemplo.

Suponhamos que queiramos saber, num dado momento, a exata posição e a velocidade de um elétron que vem em nossa direção. Sendo o elétron um ente microscópico, recebe as ondas luminosas que lhe enviamos como uma rajada de fótons, ou seja, partículas que, chocando-se contra ele, desviam-no de sua trajetória, alteram a sua velocidade (DIONÍSIO, 2004, p. 25).

A figura 28 traz uma sequência de quadros com o personagem do físico alemão expondo um resumo da sua alegação sobre as imprecisões nas medições na escala atômica, e também um gráfico que ilustra a situação.

Figura 28: Medição de partículas



Fonte: produzido pelo autor

Essa incongruência nas medições das partículas foi o que levou Heisenberg a formular o seu princípio da incerteza.

Mais especificadamente, ele mostrou que a incerteza na posição de uma partícula multiplicada pela incerteza de seu momento deve ser sempre maior do que a constante de Planck, uma quantidade aproximadamente relacionada ao teor de energia de um quantum de luz (HAWKING, 2002, p. 42).

Os conceitos envolvidos, e também uma forma equacionada do princípio da incerteza, são apresentados na figura 29:

Figura 29: Princípio da incerteza

UTILIZANDO A RELAÇÃO DE DE BROGLIE/EINSTEIN COMO PARTE DO CÁLCULO, HEISENBERG CHEGOU À DETERMINAÇÃO DA IMPRECISÃO QUE CAUSAVA ESSA INCERTEZA:

$$(\Delta Q)(\Delta x) \geq \frac{h}{4\pi}$$

- ΔQ É A INCERTEZA DO MOMENTO
- Δx É A INCERTEZA DA POSIÇÃO
- h É A CONSTANTE DE PLANCK (COLHA ELA AÍ DE NOVO!)

ESSE PRINCÍPIO INDICA QUE, QUANTO MAIOR A PRECISÃO NA MEDIDA DE UMA GRANDEZA (POSIÇÃO OU MOMENTO), MENOR SERÁ NA MEDIDA DA OUTRA, SEMPRE LIMITADO PELA CONSTANTE DE PLANCK!

Fonte: produzido pelo autor

Novamente, todos os gráficos e equações apresentados nesta seção, assim como todos os demais que aparecem na HQ como um todo, vão necessariamente requerer a mediação do professor de física.

Um importante desdobramento dos efeitos da incerteza é apresentado na figura 30, que mostra o personagem explicando sinteticamente por que comportamentos distintos (onda e partícula), para uma partícula, são detectados em experimentos diferentes.

Figura 30: Comportamentos distintos



Fonte: produzido pelo autor

Maior ainda foi a contribuição de Heisenberg para o desenvolvimento da Teoria Quântica em aspectos que fogem do escopo deste trabalho devido ao nível de aprofundamento necessário na sua abordagem. Heisenberg é um dos principais nomes na estruturação da quântica como um todo, e o reconhecimento de seus esforços veio através do Prêmio Nobel de Física de 1932, “pela criação da mecânica quântica, a aplicação da qual, entre outros, levou à descoberta das formas alotrópicos de hidrogênio” (THE NOBEL..., 2020, traduzido pelo autor), homenagem esta mencionada no último quadro da figura 30.

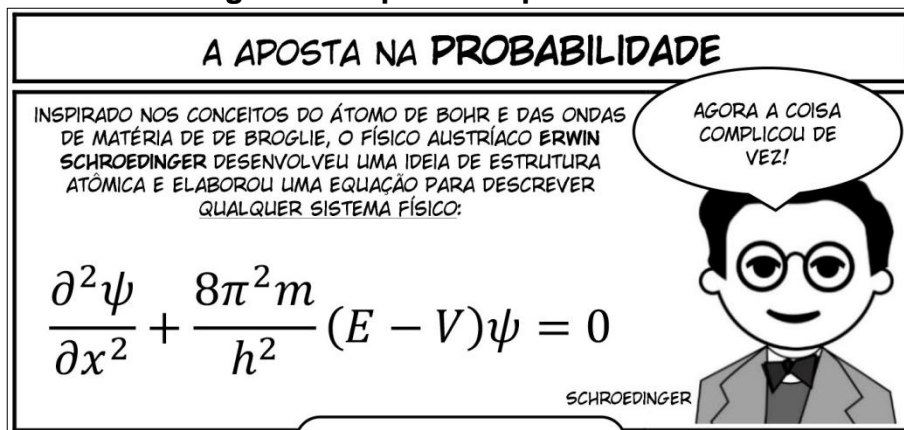
3.7 Seção VII – A aposta na probabilidade

O físico austríaco Erwin Schrödinger, após contribuições de Bohr e de de Broglie, propôs uma nova representação para o átomo, descrevendo-o matematicamente com uma equação de onda, obtendo assim uma grandeza chamada “função de onda” (PESSOA Jr., 2006, p. 95). Essa função de onda permite, por exemplo, a determinação estatística das posições dos elétrons em torno do núcleo atômico. Uma forma bastante conhecida para essa equação de Schrödinger é apresentada por McEvoy e Zarate (2012, p. 117):

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \Psi = 0$$

Além do título da seção, a equação, juntamente com um texto introdutório e o personagem de Schrödinger, são apresentados na figura 31:

Figura 31: Aposta na probabilidade



Fonte: produzido pelo autor

A própria forma da equação provoca a fala do personagem de Schrödinger, como exposta na figura 31, que reflete a especificidade (e aridez) matemática do tratamento quantitativo da quântica. “Aí está um excelente exemplo daquilo que chamamos “um modelo matemático para a descrição de um dado conjunto de fenômenos físicos”. Para o leigo, uma dúzia de símbolos incompreensíveis dispostos segundo algum critério hermético” (DIONÍSIO, 2004, p. 17). Sendo assim, como a HQ é destinada primeiramente para o uso no Ensino Médio, foi imperativo escolher os pontos principais do conceito para apresentar na história, como é elaborado nos quadros apresentados nas figuras 32 e 33:

Figura 32: Função de onda



Fonte: produzido pelo autor

Figura 33: Probabilidade



Fonte: produzido pelo autor

O princípio da incerteza de Heisenberg é retomado na sequência de falas do personagem (figura 33), seguido da interpretação da probabilidade da função de onda, apresentada da forma sintética inerente ao formato da HQ. O quadro seguinte repete a ideia com o apoio de um gráfico ilustrativo, como mostrado na figura 34:

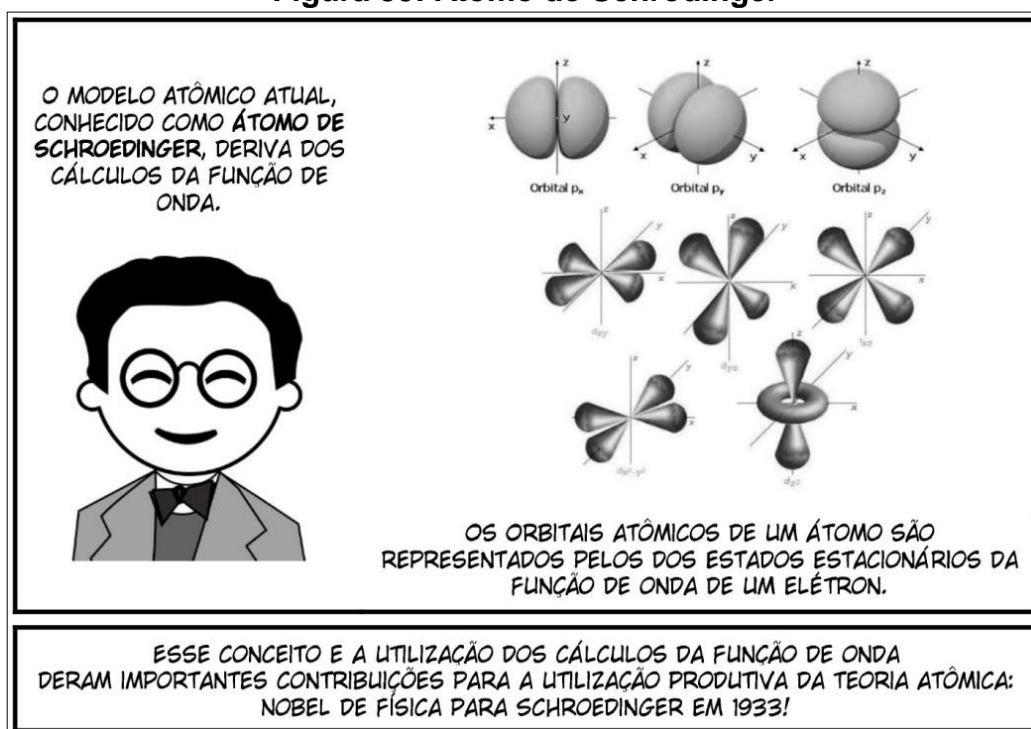
Figura 34: Densidade de pontos



Fonte: produzido pelo autor

O modelo usado atualmente para representar o átomo deriva dos cálculos de Schrödinger, sendo que “a equação de Schrödinger levou a previsões notáveis a respeito do comportamento dos sistemas microscópicos, todas elas comprovadas em experimentos posteriores” (DIONÍSIO, 2004, p. 20). A figura 35 traz alguns dos gráficos que foram gerados pelo uso da equação da probabilidade, ilustrando a nuvem de probabilidades dos orbitais atômicos.

Figura 35: Átomo de Schrödinger



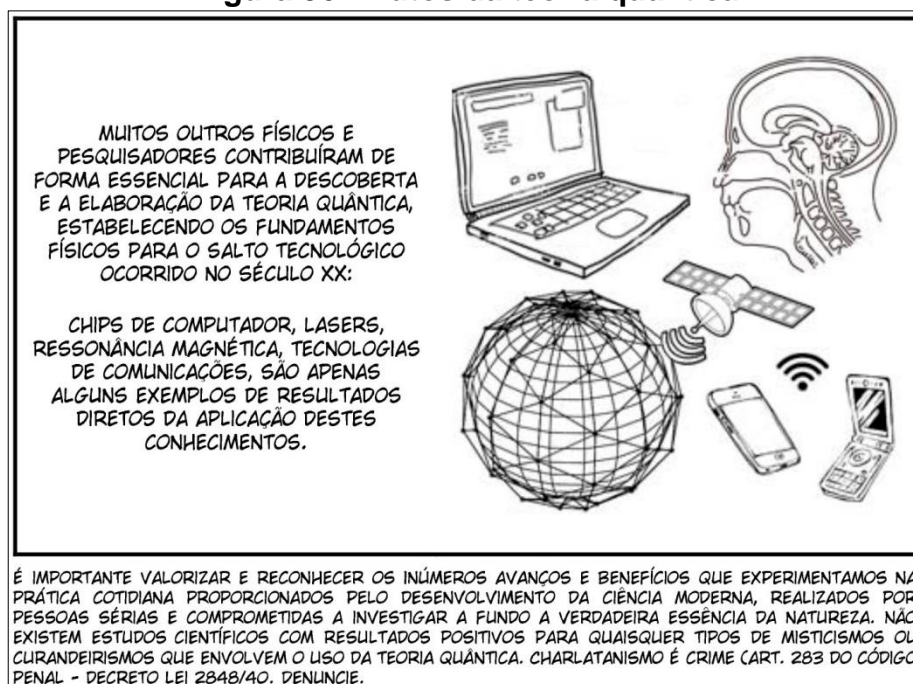
Fonte: produzido pelo autor

Erwin Schrödinger recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1933, “pela descoberta de novas formas produtivas da teoria atômica” (THE NOBEL..., 2020, traduzido pelo autor), referido no último quadro da seção (figura 35), em conformidade com o intuito de destacar a importância do cientista na evolução da Teoria Quântica, assim como já mencionado anteriormente.

3.8 Seção VIII – Finalizações

A História em Quadrinhos sobre tópicos da Física Quântica encerra com um quadro (figura 36) lembrando que muitos outros físicos e pesquisadores, que não foram citados devido ao espaço sucinto e limitado do formato escolhido, foram responsáveis pelo desenvolvimento da teoria. O texto do quadro também recorda dos frutos originados pela aplicação prática dos conceitos da Teoria Quântica, acompanhado de ilustrações a que se referem.

Figura 36: Frutos da teoria quântica



Fonte: produzido pelo autor

Das ideias desenvolvidas por Planck, Einstein, Bohr, de Broglie, Dirac e Schrödinger, e outros pesquisadores que seguiram seus passos, a Física Quântica se desenvolveu e obteve grande sucesso em explicar os fenômenos naturais na escala atômica. A dualidade onda-partícula, os princípios da incerteza e da superposição, o papel da probabilidade revelando uma realidade “indeterminista”, a influência do observador no comportamento do objeto observado, são elementos essenciais da Física Quântica (PESSOA JR., 2006) e que favoreceram o grande salto tecnológico experimentado pela humanidade no séc. XX. A invenção do transistor, que possibilitou a revolução eletrônica da segunda metade do séc. XX, do laser (e de suas diversas aplicações na medicina, na indústria, nas telecomunicações) e o desenvolvimento da nanociência e da nanotecnologia, só

para citar alguns exemplos, somente foi possível devido às descobertas sobre as propriedades quânticas da luz e da matéria (VALADARES; CHAVES; ALVES, 2005), e, sendo assim, merecem a devida atenção dos educadores e dos estudantes para a melhor compreensão do mundo que nos cerca.

Finalmente, o texto do último quadro da HQ (figura 36) enfatiza a importância do desenvolvimento científico, nos avanços reais e palpáveis na tecnologia e no cotidiano das pessoas, e também retoma a advertência inicial sobre o mau uso das interpretações da quântica, onde “autores” mal-intencionados (ou simplesmente indoutos na área sobre a qual especulam) transformam elementos da quântica em pura invenção esotérica e pseudofilosofia de autoajuda. “É importante focar as futuras formações para que no contato com este tipo de texto, que empodera o autor e não o leitor com argumentos plausíveis, estes fiquem atentos, pois isto é um forte indicio de argumentos indevidos ou até mesmo indébitos” (MACHADO e CRUZ, 2016, p. 15).

4. O RETORNO DOS PROFESSORES

O foco desse trabalho foi a produção de um material didático sobre Física Quântica na forma de História em Quadrinhos, devidamente fundamentado pela literatura científica. Mas, para obtermos uma avaliação mais objetiva do material produzido, analisamos, de forma qualitativa, as potencialidades do material em relação à sua possível implementação em sala de aula, na visão de professores de Física.

Desta maneira, buscamos conhecer, especificadamente: (i) a relação dos professores quanto ao uso de História em Quadrinhos como material didático; (ii) as percepções dos mesmos quanto ao conteúdo abordado no material produzido; e (iii) suas críticas e sugestões em relação ao material quanto ao seu possível uso em sala de aula, com alunos do Ensino Médio. Para alcançar tais objetivos, elaboramos um questionário abordando tais questões, enviado para professores de Física das redes federal e estadual de Santa Catarina, que responderam de forma anônima e colaborativa, e cujos perfis são apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Professores de física

Sujeito	Nível de Ensino	Tempo de Atuação
Professor A	Ensino Médio	4 anos
Professor B	Ensino Médio e Superior	20 anos
Professor C	Ensino Médio, Técnico, Superior e Pós-Graduação	17 anos
Professor D	Ensino Médio e Superior	14 anos
Professor E	Ensino Médio e Superior	20 anos
Professor F	Ensino Médio e Superior	1 ano
Professor G	Ensino Médio e Superior	20 anos
Professor H	Ensino Médio e Superior	13 anos

Fonte: o autor

Além do questionário, pretendíamos realizar entrevistas com alguns desses professores. Entretanto, tivemos que reorientar nossa pesquisa em função da pandemia de COVID 19, em 2020. Sendo assim, as respostas ao questionário compõem uma fonte de dados suficiente para uma avaliação inicial do material, e foram catalogadas de acordo com os objetivos específicos para esta pesquisa. A partir desses dados, fizemos as considerações apresentadas a seguir.

4.1 Histórias em quadrinhos como material didático

As histórias em quadrinhos não estão entre os recursos didáticos mais utilizados entre os professores questionados, sendo que apenas dois afirmaram utilizar esta forma de material. O professor G alegou que “acho válida a ideia, a dificuldade é encontrar materiais para essa abordagem”, evidenciando a falta de opções e/ou de divulgação sobre as publicações disponíveis no formato.

Embora a maioria dos professores atestar que não utiliza esse meio como material didático, em geral consideram que as histórias em quadrinhos são um bom recurso para a utilização em sala de aula.

Acredito que seja uma forma de potencializar a discussão dos conceitos envolvidos, visto que busca dinamizar quaisquer “modelos tradicionais” de construção coletiva do conhecimento. Não significa que os modelos tradicionais não sejam importantes, mas sim que a perspectiva de abordar por meio das HQ’s ajuda, inclusive, a desmistificar a idéia de ciência sisuda e sem lirismo, e acaba por contribuir com uma importante discussão atual

na pesquisa em educação em ciências que é as relações entre arte e ciência. (Professor A).

Acho uma ótima opção para alternar com outros recursos, pois desperta interesse dado ao poder lúdico do quadrinho (Professor H).

Entretanto, alguns professores enfatizam que a utilização de tal recurso deva ser de forma complementar, e quando não há alternativa melhor disponível.

Acho bem interessante. Principalmente nos casos em que os recursos eletrônicos são limitados. Senão, acho que uma produção ou apresentação em vídeo ou simulação podem se aproximar melhor do desejado visto que eles podem reproduzir movimento e cores (Professor E).

Sendo assim, é possível perceber a importância dada pelos professores sobre a utilização de materiais variados em sala de aula, e que as histórias em quadrinhos fazem parte do rol de recursos a serem empregados durante as aulas, desde que disponíveis e de forma complementar. No entanto, mesmo que haja ampla disposição de recursos eletrônicos e audiovisuais, a preferência por tais soluções, devido às suas características de reprodução de movimento e cores, não deve se sobrepor ao pluralismo de estratégias, visando sempre contemplar os diferentes perfis de aprendizagem.

4.2 Física quântica em quadrinhos

Em relação ao conteúdo da História em Quadrinhos produzida pelo autor, os professores consideraram adequado para complementar as aulas do Ensino Médio, como pretendido. Todavia, existe a percepção de que o material não é autossuficiente e necessita da mediação de um professor para suprir as lacunas encontradas devido à natureza do meio. Como oportunamente lembra o Professor D, o professor implementador deve estar preparado e precisa necessariamente conhecer o teor do material. Sobre o material em geral, esse professor comenta:

Bom apelo visual, bastante figura, com descrições do que está acontecendo e a física envolvida. Por outro lado, penso que o professor precisa estar bem ciente dos conteúdos que vai tratar com base nessa HQ, pois ele não poderá usá-la para aprender mecânica quântica e depois ensinar aos alunos. Por se tratar de uma HQ, ela é mais direta em alguns pontos, traz alguns termos sem maiores explicações e o professor vai precisar lidar com

isso (ex: raias espectrais, função de onda do elétron no átomo de hidrogênio, ...). Mas sobre estar adequada, não vejo motivo de não poder usar, desde que o professor tenha clareza do que quer extrair com ela (Professor D).

Um dos aspectos indissociáveis da Física Quântica é sua abordagem matemática, estando presente nas equações expostas no material produzido, evidentemente também voltado para o alcance dos alunos do Ensino Médio. O Professor B declarou que “Mostrar equações é uma forma de despertar o interesse para um futuro aprofundamento. A matemática da Física Quântica não é mesmo trabalhada no Ensino Médio”.

Em sua maioria, os professores demonstraram estar satisfeitos com o nível matemático trabalhado, e quase sempre enfatizaram que uma das equações apresentadas (a Equação de Schrödinger) não é adequada para o Ensino Médio, devendo ser apresentada de forma ilustrativa, como afirma o Professor C: “Alguns deles podem ser compreendidos, entretanto outros, como a função de onda, não vão representar nada ao estudante, podendo não alcançar o objetivo esperado”.

Ao abordar a Física Quântica em qualquer meio é preciso fazer uma adequação do conteúdo utilizado ao mesmo, muitas vezes com omissões que o tornam insuficiente por si só, mas que poderão ser complementadas com a intervenção adequada do professor. Quando perguntados sobre os tópicos abordados pelo autor na produção do material, a maioria dos professores considerou que não era necessário acrescentar ou retirar nada, mas o professor C sugeriu que “Talvez seja interessante apresentar o efeito Compton. A função de onda e distribuição de probabilidade me parecem bem difíceis de abordar nessa linguagem”.

O material produzido inicialmente pretendia abordar com maior profundidade a questão do charlatanismo quântico, questão que foi referida em uma das respostas:

A princípio eu não mudaria nada. Entendo que de “pano de fundo” existe a importante preocupação sobre o charlatanismo quântico, ainda que não seja o cerne do trabalho. Nesse sentido, se o foco principal fosse esse, eu adicionaria algo em relação ao charlatanismo. Mas, a HQ no que é a proposta do trabalho está completa (Professor A).

Esse tema foi uma das questões mais prejudicadas em relação ao conteúdo, devido à extensa quantidade de assuntos a serem trabalhados dentro da Física Quântica. Entretanto, pretendemos revisitar o tópico caso haja uma continuidade

deste trabalho. Entre as sugestões apresentadas pelos professores para a melhoria do material, também apareceu a abordagem sobre o charlatanismo quântico, de maneiras diferenciadas.

Sinceramente não tenho nenhuma sugestão para melhoria pois considero que a HQ está “pronta” para ser utilizada, considerando os objetivos adequados para uma aula, certamente. No entanto, reforço que, caso o autor queira – e realmente, reitero, é uma questão de querer, não de necessidade – expandi-la, eu adicionaria alguns quadros sobre o charlatanismo quântico. (Professor A)

[...] E você acha relevante colocar o texto final? Ele é um texto de opinião muito forte. Eu concordo com ela mas será que caberia para o trabalho? Parece que tira o foco de um trabalho acadêmico [...]. (Professor E).

Apesar de parecer válida a preocupação do professor E sobre a natureza acadêmica de um texto que aparenta ser ‘de opinião’, é preciso lembrar que o tema (charlatanismo quântico) é objeto de estudo de diversos artigos que indicam a necessidade de divulgar para a sociedade o caráter nocivo da abordagem pseudocientífica da Física Quântica. A superstição e a pseudociência buscam suas vítimas pela credulidade, fornecem respostas fáceis, mas evitam o exame crítico. A pseudociência é admitida quando a verdadeira ciência é mal compreendida, pois quem nunca teve acesso à ciência e não conhece como ela funciona, dificilmente terá consciência de estar abraçando a pseudociência (SAGAN, 2009). Por isso a importância de promover o pensamento crítico de maneira contínua, mas de maneira especial no Ensino Médio, quando surge a oportunidade de tratar de assuntos de cunho científico e tecnológico de maneira significativa.

Houve sugestões em relação a representação gráfica de alguns conceitos, seja por falta de clareza do desenho ou por falta de informações complementares.

[...] Cuidado com o tratamento dos alunos como "pequenos matemáticos" para tratar das equações, pode reforçar a ideia de que precisamos ser matemáticos para entender a matemática do Ensino Médio. - Você vai falar de dualidade no final do seu material, mas nos primeiros quadros coloca as partículas subatômicas apenas como bolinhas (como resolver isso? É preciso pensar estratégias, talvez uma nota de rodapé ou talvez evitar o desenho explícito delas) - Cuidado com a tentativa de explicar classicamente o princípio de incerteza (alguns livros didáticos do superior fazem isso). Nada contra a tentativa em si, mas é preciso ter noção de que isso é apenas uma analogia explicativa, pois pode parecer que, de alguma maneira, seria possível contar esse "incômodo" experimental e fazer sumir a incerteza, o que não é o caso [...]. (Professor D).

Com a utilização de recursos como notas de rodapé, como sugere o professor, é possível dirimir algumas das questões apresentadas, mas certamente quaisquer representações são insuficientes sem a intervenção de um professor, imprescindível para o entendimento do material.

5. CONCLUSÕES

A elaboração da HQ sobre Física Quântica para o Ensino Médio foi motivada primeiramente para servir de um material didático de divulgação científica para o combate à crescente onda de desinformação pseudocientífica a que estamos sendo expostos. O tema – Física Quântica – foi escolhido por abranger dois aspectos importantes: ser popularmente conhecido como “complicado” e “inacessível” e pelo abuso da apropriação indevida do termo fora do escopo da teoria. Os tópicos escolhidos para compor a HQ auxiliam o professor a estabelecer um rol de assuntos relacionados ao tema para a utilização em sala de aula. Entretanto, devido à natureza da proposta, alguns tópicos importantes da Física Quântica ficaram de fora, como o tunelamento quântico, por exemplo. As seções sobre os frutos da teoria e sobre seus maus usos ficaram reduzidas em relação ao originalmente pretendido, e merecem uma maior atenção na releitura do material.

Pensamos que a análise sobre a apreciação dos professores de Física pelo material produzido revelou que é possível a utilização de um meio como História em Quadrinhos enquanto material didático, reconhecendo suas potencialidades, como forma de linguagem atrativa, informal e prazerosa, com poder lúdico e capaz de chamar a atenção de alguns alunos. Naturalmente, vemos o uso desse material como um complemento às aulas de física, com ênfase ao papel basilar do professor no processo educativo.

De modo geral, os professores se mostraram satisfeitos em relação ao conteúdo abordado e sua coerência, sugerindo melhorias especialmente quanto à representação visual de alguns conceitos, revelando a importância da clareza necessária e inerente ao conhecimento científico. Outro ponto relevante apontado pelos professores foi a abordagem sobre a pseudociência, questão que merece uma representação mais aprimorada e detalhada, visando o entendimento do assunto para a análise crítica do estudante.

Isto posto, consideramos que o material produzido deverá ser revisto para otimizações dos aspectos propostos pelos professores e que, assim, poderá representar uma opção a mais para o professor interessado em dinamizar suas aulas, podendo ser utilizado como material didático complementar no ensino de Física Quântica no Ensino Médio. Adicionalmente, o material poderá servir de base para a elaboração de uma versão aperfeiçoada da HQ, adicionando os tópicos que não foram abordados e com desenhos realizados por um ilustrador.

REFERÊNCIAS

BRASIL. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **PCN+ Orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais: ciências da natureza, matemática e suas tecnologias.** Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2018.

CARUSO, Francisco; FREITAS, Nilton de. Física moderna no Ensino Médio: o espaço- tempo de Einstein em tirinhas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, [S.l.], v. 26, n. 2, p. 355-366, ago. 2009.

CHESMAN, Carlos; ANDRÉ, Carlos; MACÊDO, Augusto. **Física moderna: experimental e aplicada.** São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.

CRUZ, Frederico Firmo de Souza; CRUZ, Sônia Maria S. C. de Souza. **Pode o ambiente cultural e social definir o conteúdo escolar de física: o caso da mecânica quântica.** In: VII Empec - Encontro Nacional em Pesquisa em Educação em Ciências, Florianópolis, 2009.

DIONÍSIO, Paulo Henrique. Albert Einstein e a Física Quântica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, [s. l.], v. 22, ed. 2, p. 147-164, 1 ago. 2005.

DIONÍSIO, Paulo Henrique. Física Quântica: da sua pré-história à discussão sobre o seu conteúdo essencial. **Cadernos IHU Idéias**, [s. l.], 2004.

FIOLHAIS, Carlos; TRINDADE, Jorge. **Física no computador: o computador como uma ferramenta no ensino e na aprendizagem das ciências físicas.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 25, no. 3, set. 2003.

HAWKING, Stephen. **O universo numa casca de noz.** 11. ed. São Paulo: Arx, 2002.

INEP/MEC (2004). Ministério de Educação. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. **Estatísticas dos professores no Brasil.** Brasília: INEP, 2004. Disponível em <<http://portal.inep.gov.br/documents/186968/484154/Estat%C3%ADsticas+dos+professores+no+Brasil/2cfab3f2-3221-4494-9f7e-63ae08c154e1?version=1.1>>. Acesso em: 29 out. 2018.

JORGE, Letícia; PEDUZZI, Luiz O. Q. As pinceladas anti-newtonianas de William Blake. **Anais eletrônicos do 15º Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia**, Florianópolis, p. 1-15, nov. 2016.

KNOBEL, Marcelo. Ciência e pseudociência. **Física na escola**, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 6-9, 2008. Disponível em: <<http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol09-Num1/pseudociencia1.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

LIBÂNEO, José Carlos. **Organização e Gestão da Escola: Teoria e Prática.** 4.ed. Goiânia: Alternativa, 2003

LUCKESI, Cipriano Carlos. **Filosofia da educação**. São Paulo: Cortez, 1994.

MACHADO, Sandro da S. Livramento; CRUZ, Frederico de Firmo Souza. A Teoria Quântica e a apropriação do conhecimento científico: o uso da história filosofia da ciência pelos misticismos. **Anais eletrônicos do 15º Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia**, Florianópolis, nov. 2016.

MAIA, Nelson B. **O caminho para a Física Quântica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2009.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Técnicas de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

MCCLOUD, Scott. **Desenhando quadrinhos**. São Paulo: M.Books, 2008.

MCCLOUD, Scott. **Desvendando os quadrinhos**. São Paulo: M.Books, 2005.

MCEVOY, J. P.; ZARATE, Oscar. **Entendendo Teoria Quântica**: um guia ilustrado. São Paulo: Leya, 2012. ISBN 978-85-63066-98-5.

MOREIRA, Marco Antonio. **Aprendizagem significativa crítica**. III Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa, 2000, Lisboa. p. 33-45. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/~moreira/apsigcritport.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2018.

MOREIRA, Marco Antonio. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: E.P.U., 1999

OLIVEIRA, Silvio Luiz de. **Tratado de metodologia científica**. 2. ed. São Paulo: Pioneira, 1943.

PAULA, Helder F.; ALVES, Esdras Garcia; MATEUS, Alfredo Luis. **Quântica para iniciantes**: investigações e projetos. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

PESSOA JR., Osvaldo. Introdução histórica à Teoria Quântica, aos seus problemas de fundamento e às suas interpretações. **Caderno de Física da UEFS**, v. 04, p. 89-114, 2006.

PINHEIRO, José Maurício dos Santos. **Da iniciação científica ao TCC**: uma abordagem para os cursos de tecnologia. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2010.

RICARDO, Elio C.; FREIRE, Janaína C. A.. A concepção dos alunos sobre a física do Ensino Médio: um estudo exploratório. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 29, n. 2, p.251-266, 2007. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/060908.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2018.

SAGAN, Carl. **O mundo assombrado pelos demônios**: a ciência vista como uma vela no escuro. São Paulo: Companhia da Letras, 2009.

SANTOS NETO, Elydio dos; SILVA, Marta Regina Paulo da (Org.). **Histórias em quadrinhos e práticas educacionais**: o trabalho com universos ficcionais e fanzines. São Paulo: Criativo, 2013.

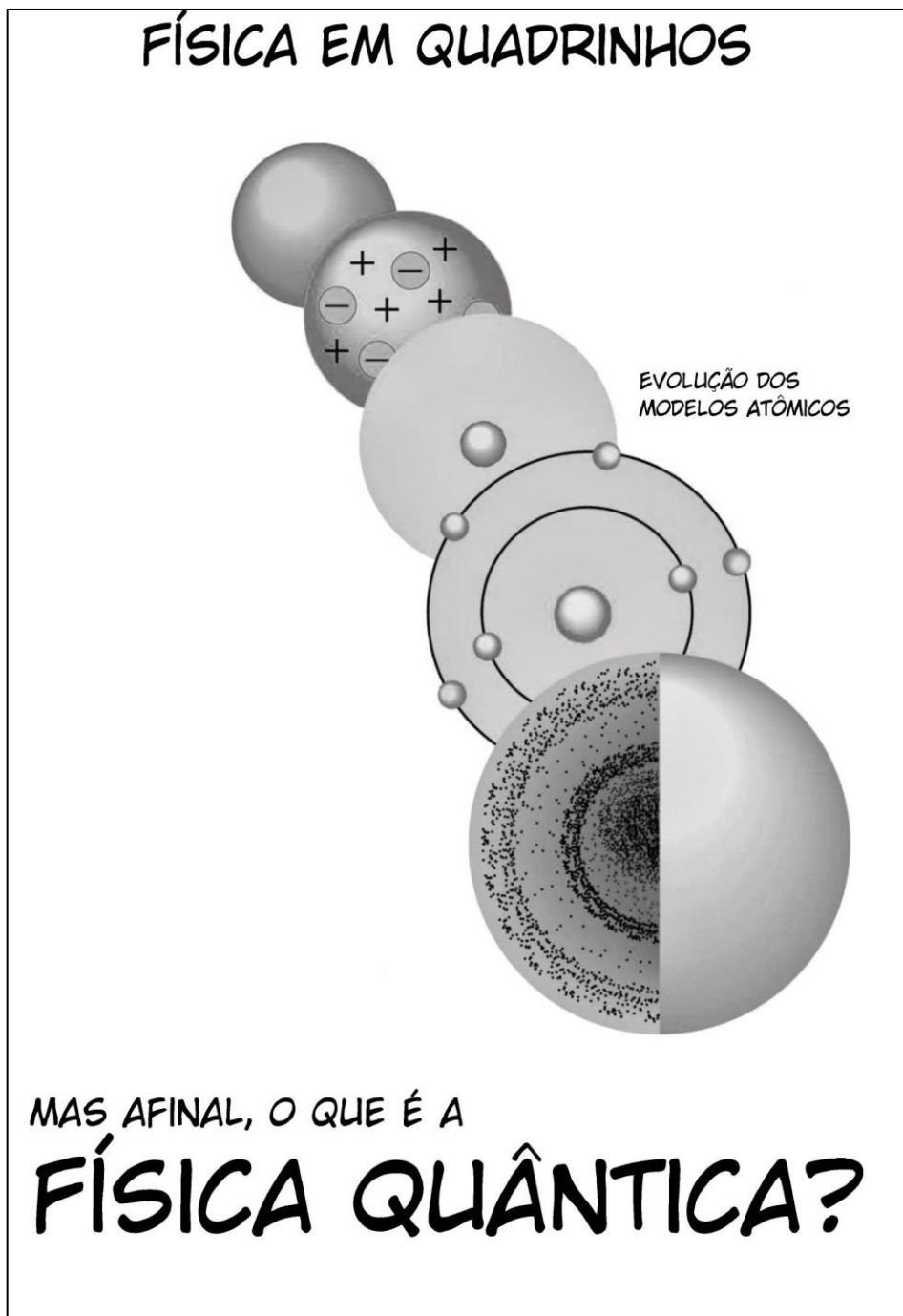
THE NOBEL Prize. All Nobel Prizes in Physics. [S. l.]. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes-in-physics/>. Acesso em: 23 ago. 2020.

VALADARES, Eduardo de Campos. **Física mais que divertida**: inventos eletrizantes baseados em materiais reciclados e de baixo custo. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2002.

VALADARES, Eduardo de Campos; CHAVES, Alaor; ALVES, Esdras Garcia. **Aplicações da Física Quântica**: do transistor à nanotecnologia. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

VERGUEIRO, Waldomiro; RAMOS, Paulo (Org.). **Quadrinhos na educação**: da rejeição à prática. São Paulo: Contexto, 2009.

APÊNDICE A – FÍSICA EM QUADRINHOS: MAS AFINAL, O QUE É A FÍSICA QUÂNTICA?

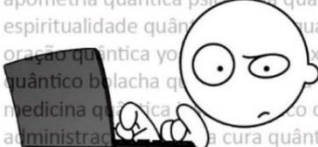


HOJE EM DIA, MUITAS PESSOAS JÁ DEVEM TER OUVIDO FALAR DA FÍSICA QUÂNTICA.

MAS SE FIZERMOS UMA BUSCA NA INTERNET COM A PALAVRA "QUÂNTICA", O RESULTADO SERÁ CATASTRÓFICO: MUITO DE PICARETAGEM E QUASE NADA DE FÍSICA!



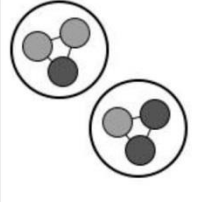
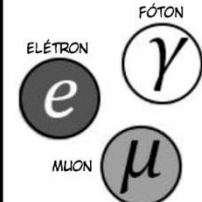
MAS AFINAL, O QUE É A

emagrecimento quântico terapia q
coach quântico sal quântico condic
apometria quântica psicologia quâ
espiritualidade quântica quântica
oração quântica yoga quântica x
quântico bolacha quântica quântica
medicina quântica quântica quântica
administracão quântica cura quânt



FÍSICA QUÂNTICA?

A FÍSICA QUÂNTICA É O ESTUDO DAS PARTÍCULAS ATÔMICAS E SUBATÔMICAS E SUAS INTERAÇÕES

 <p>MOLÉCULAS</p>	 <p>ÁTOMOS</p>	 <p>PRÓTONS E NEUTRONS</p>	 <p>FÓTON ELÉTRON MUON PARTÍCULAS SUBATÔMICAS</p>
--	---	--	--

TUDO COMEÇOU LÁ PELO FINAL DOS ANOS DE 1890, QUANDO MUITOS ACHAVAM QUE A MECÂNICA DE NEWTON E O ELETROMAGNETISMO DE MAXWELL - A BASE DO QUE CHAMAMOS DE FÍSICA CLÁSSICA - EXPLICAVAM SATISFATORIAMENTE QUASE TODOS OS FENÔMENOS FÍSICOS. QUASE.

 <p>ISAAC NEWTON</p>	<p>JÁ TÁ TUDO RESOLVIDO NA FÍSICA!</p> 	<p>...SÓ QUE NÃO...</p> 	 <p>JAMES C. MAXWELL</p>
---	--	---	---

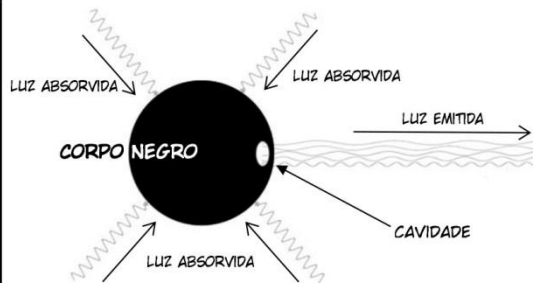
MAS AINDA HAVIA ALGUMAS QUESTÕES QUE A FÍSICA CLÁSSICA NÃO RESPONDA, COMO A RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO, O EFEITO FOTOELÉTRICO, E AS RAIAS ESPECTRAIS, POR EXEMPLO.

O PROBLEMA DA RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

NA FÍSICA, UM CORPO NEGRO É UM OBJETO QUE ABSORVE TODA A LUZ QUE RECEBE.

SE HOUVER UMA CAVIDADE NO CORPO, A LUZ QUE ENTRA NELA É ABSORVIDA PELAS SUAS PAREDES.

NENHUMA LUZ SAI DA CAVIDADE POR REFLEXÃO, SOMENTE POR EMISSÃO PRÓPRIA, E EM FUNÇÃO DA SUA TEMPERATURA.

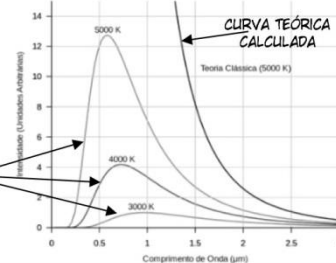


A FÍSICA CLÁSSICA PREVIA QUE, QUANTO MAIOR A TEMPERATURA DO INTERIOR DO CORPO, MAIOR SERIA A INTENSIDADE DA LUZ EMITIDA, MAS...

O VALOR MEDIDO NO EXPERIMENTO NÃO BATE COM O VALOR DO CÁLCULO TEÓRICO!



CURVAS MEDIDAS EXPERIMENTALMENTE



NA ÉPOCA, JÁ SE CONHECIA A NATUREZA ONDULATÓRIA DA LUZ.



A LUZ SE COMPORTAVA COMO UMA ONDA DE ENERGIA CONTÍNUA

EM 1899, MAX PLANCK, FÍSICO E MATEMÁTICO ALEMÃO, PROPÔS UM NOVO JEITO PARA CALCULAR ESSA RADIAÇÃO...

E SE CALCULÁRMOS A TROCA DE ENERGIA DE MANEIRA DISCRETA*?



PLANCK

*NA MATEMÁTICA, DISCRETO É DIFERENTE DE CONTÍNUO.



SE A ENERGIA VIER EM PEQUENOS "PACOTES"...

...APARECE UMA CONSTANTE NOS CÁLCULOS...

...ENTÃO OS VALORES CALCULADOS E MEDIDOS SERÃO CONDIZENTES!

PARA QUEM É FÃ DA MATEMÁTICA!

A ENERGIA DE CADA UM DESSES "PACOTES" VAI SER IGUAL À FREQUÊNCIA DE SUA ONDA MULTIPLICADO POR ESSA CONSTANTE!

$$E = nhf$$

- E É O VALOR TOTAL DA ENERGIA
- n É O NÚMERO DE "PACOTES"
- h É A CONSTANTE DE PLANCK
- f É A FREQUÊNCIA DA ONDA!

*QUANTUM, SIGNIFICA QUANTIDADE EM LATIM

PODEMOS CHAMAR ESSES PACOTES DE QUANTUM!*



E ASSIM PLANCK RESOLVEU MATEMATICAMENTE A DISCREPÂNCIA ENTRE OS RESULTADOS PARA A RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO, E SUA SOLUÇÃO LHE VALEU UM NOBEL DE FÍSICA EM 1918! MAS AINDA HAVIA ALGUNS PROBLEMAS A RESOLVER...

O DILEMA DO EFEITO FOTOELÉTRICO



O EFEITO FOTOELÉTRICO É A EMISSÃO DE ELÉTRONS POR UM MATERIAL (GERALMENTE UM METAL) QUANDO EXPOSTO À LUZ.


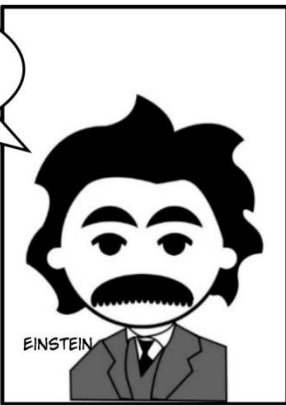
PELA FÍSICA CLÁSSICA, QUANTO MAIS ILUMINADO O METAL, MAIOR SERIA ESSA EMISSÃO DE ELÉTRONS.

MAS ISSO NÃO ACONTECIA COM QUALQUER TIPO DE LUZ...

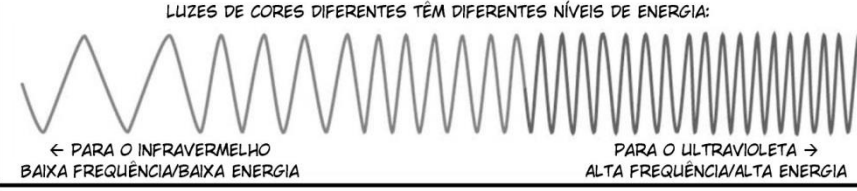
EM 1905, O FÍSICO ALEMÃO ALBERT EINSTEIN (COM APENAS 26 ANOS) SUGERIU QUE A QUANTIZAÇÃO DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO ERA UM FENÔMENO REAL, E NÃO APENAS UM ARTIFÍCIO MATEMÁTICO.

ELE PERCEBEU QUE CADA ELÉTRON ERA EJETADO DO METAL POR UM ÚNICO FÓTON COM ENERGIA EQUIVALENTE.

UM FÓTON É UMA PARTÍCULA DE LUZ!

LUZES DE CORES DIFERENTES TÊM DIFERENTES NÍVEIS DE ENERGIA:



O FÓTON PRECISA TER UM MÍNIMO DE ENERGIA...


...PARA ARRANCAR UM ELÉTRON DO METAL.

NÃO É PRA QUALQUER UM.

COMO A ENERGIA DE CADA FÓTON É IGUAL A SUA FREQUÊNCIA VEZES A CONSTANTE DE PLANCK, ($E = hf$, LEMBRAM?), SOMENTE FÓTONS MAIS ENERGÉTICOS (PRÓXIMOS DA FREQUÊNCIA DO ULTRAVIOLETA) PODEM CAUSAR O EFEITO FOTOELÉTRICO.

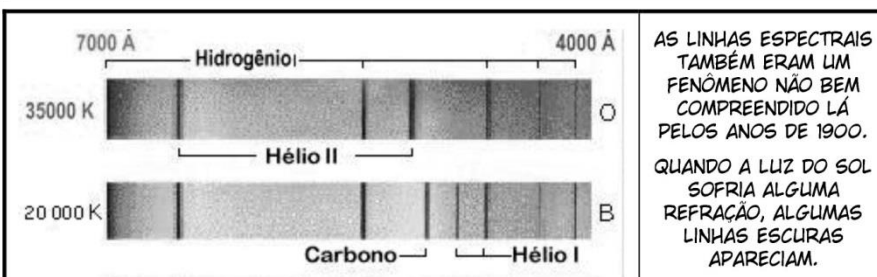
ENTÃO, NÃO IMPORTA A INTENSIDADE DA LUZ, MAS A SUA FREQUÊNCIA! SOMENTE AS MAIS ENERGÉTICAS VÃO CONSEGUIR ARRANCAR ELÉTRONS DO MATERIAL

ESSA DESCOBERTA VALEU UM NOBEL DE FÍSICA PARA EINSTEIN EM 1921.



E APRESENTOU A IDEIA DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DO FÓTON.

O MISTÉRIO DAS RAIAS ESPECTRAIS



PARA ENTENDER O QUE ACONTECIA, ERA PRECISO INVESTIGAR O ÁTOMO, UM CONCEITO QUE AINDA ESTAVA SE DESENVOLVENDO NAQUELA ÉPOCA.

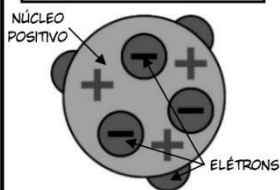
MODELO DE DALTON



ÁTOMO

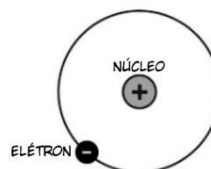
CADA ELEMENTO ERA COMPOSTO POR ÁTOMOS DE SEU PRÓPRIO TIPO, INDIVISÍVEIS E INDESTRUTÍVEIS.

MODELO DE THOMSON



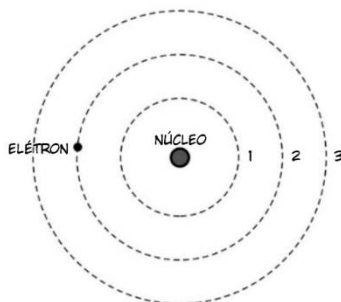
"PLUM DE PASSAS": ÁTOMOS NEUTROS, COM UM NÚCLEO POSITIVO INCRUSTADO COM ELÉTRONS NEGATIVOS.

MODELO DE RUTHERFORD



MODELO PLANETÁRIO. COM UM NÚCLEO PEQUENO E DENSO, ORBITADO PELOS ELÉTRONS.

O FÍSICO DINAMARQUÊS NIELS BOHR FOI O PRIMEIRO A CONSIDERAR A QUANTIZAÇÃO PARA DESCREVER O COMPORTAMENTO DO ÁTOMO.



AS ÓRBITAS DOS ELÉTRONS TAMBÉM SÃO QUANTIZADAS!

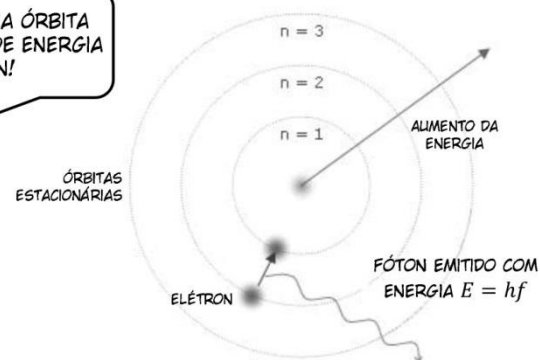


CADA ELÉTRON TEM SUA PRÓPRIA ÓRBITA!

FÓTONS PODEM AUMENTAR A ENERGIA DOS ELÉTRONS...

...QUE ENTÃO MUDAM SUA ÓRBITA PARA UMA MAIS ENERGÉTICA!

E QUANDO RETORNAM PARA SUA ÓRBITA ORIGINAL, LIBERAM O EXCESSO DE ENERGIA NA FORMA DE UM FÓTON!



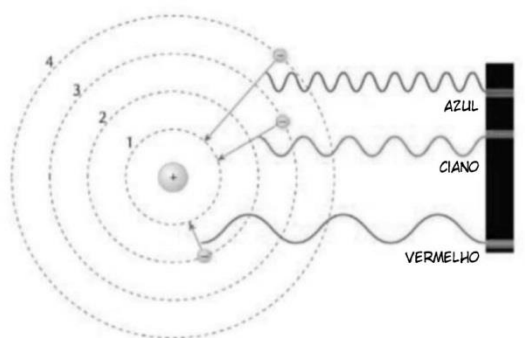
ÓRBITAS ESTACIONÁRIAS

ELÉTRON

FÓTON EMITIDO COM ENERGIA $E = hf$

ESSA MUDANÇA DE UM ELÉTRON DE UM ESTADO QUÂNTICO PARA OUTRO DENTRO DE UM ÁTOMO É CHAMADA DE SALTO QUÂNTICO, OU TRANSIÇÃO ELETRÔNICA.

ISSO EXPLICA AS RAIAS ESPECTRAIS DE ELEMENTOS ATÔMICOS COMO O HIDROGÊNIO, QUE VAI APRESENTAR SEMPRE AS MESMAS LINHAS DE CORES BEM DEFINIDAS



TÊS POSSÍVEIS SALTOS DO ELEMENTO HIDROGÊNIO

NIELS BOHR GANHOU O NOBEL DE FÍSICA EM 1922 POR ESSA DESCOBERTA!

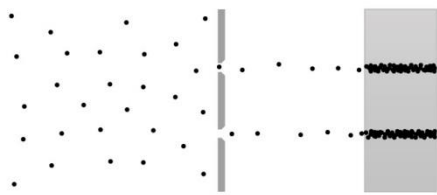
A DESCOBERTA DAS ONDAS DE MATÉRIA

A DIFERENÇA ENTRE ONDA E PARTÍCULA PODE SER OBSERVADO PELO EXPERIMENTO DA FENDA DUPLA, QUE CONSISTE EM UM PERCURSO CONTENDO UMA BARREIRA COM APENAS DUAS ABERTURAS, E UM APARELHO MEDIDOR NO FINAL DO TRAJETO. FOI ASSIM QUE O FÍSICO BRITÂNICO THOMAS YOUNG DETERMINOU A NATUREZA ONDULATÓRIA DA LUZ EM 1801.

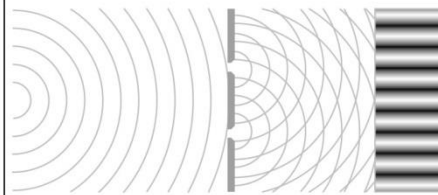


YOUNG

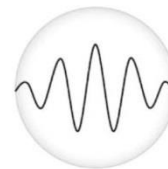
QUANDO PARTÍCULAS SÃO LANÇADAS CONTRA O OBSTÁCULO COM AS DUAS FENDAS, UM PADRÃO PRÓPRIO APARECE.



AO PASSAR PELAS FENDAS, AS ONDAS QUE SE FORMAM APRESENTAM UM PADRÃO DE INTERFERÊNCIA QUANDO SE ENCONTRAM.



EM 1905, ALBERT EINSTEIN PROPÔS A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DO FÓTON: A LUZ SE COMPORTAVA COMO ONDA MAS PODIA SER QUANTIZADA, OU SEJA, TAMBÉM ERA UMA PARTÍCULA POR NATUREZA.



O FÍSICO FRANCÊS LOUIS DE BROGLIE CURTIU A IDEIA DO FÓTON DE EINSTEIN E PENSOU ALÉM!

SE A LUZ PODE SE COMPORTAR COMO UMA PARTÍCULA...



...ENTÃO UMA PARTÍCULA...



...TAMBÉM PODE SE COMPORTAR COMO ONDA!



DE BROGLIE UTILIZOU A FAMOSA EQUAÇÃO DA RELATIVIDADE* DE EINSTEIN PARA A ENERGIA TOTAL E A RELACIONOU COM A EQUAÇÃO QUÂNTICA DE PLANCK/EINSTEIN!

* MAS ESSA É OUTRA HISTÓRIA :)

EQUAÇÃO DA RELATIVIDADE:

EQUAÇÃO QUÂNTICA:

$$E = mc^2$$

$$E = hf$$

A ENERGIA TOTAL (E) É IGUAL A MASSA (m) VEZES A VELOCIDADE DA LUZ (c) AO QUADRADO

A ENERGIA TOTAL (E) É IGUAL A CONSTANTE DE PLANCK (h) VEZES A FREQUÊNCIA (f)

MATEMÁTICOS VAMOS LÁ!

$$E = mc^2$$

COMEÇANDO COM A EQUAÇÃO DA RELATIVIDADE

$$E = (mc)(c)$$

QUE TAMBÉM PODE SER ESCRITA ASSIM

$$E = (Q)(c)$$

MASSA VEZES VELOCIDADE (mc) É O MOMENTO (Q), QUE É A QUANTIDADE DE MOVIMENTO.

$$E = (Q)(f\lambda)$$

COMO É A VELOCIDADE DA LUZ, SABEMOS QUE PODEMOS CALCULAR A VELOCIDADE DE UMA ONDA MULTIPLICANDO SUA FREQUÊNCIA (f) POR SEU COMPRIMENTO DE ONDA (λ)

$$(Q)(f\lambda) = (h)(f)$$

AGORA É SÓ IGUALAR A EQUAÇÃO QUÂNTICA COM À EQUAÇÃO DA RELATIVIDADE - AGORA TRANSFORMADA EM $E = (p)(f\lambda)$

OU RESUMIDAMENTE,

$$\lambda = \frac{h}{Q} = \frac{h}{mv}$$

E ASSIM DE BROGLIE DEMONSTROU QUE ERA POSSÍVEL ATÉ MESMO CALCULAR O COMPRIMENTO DE ONDA (λ) DE UMA PARTÍCULA!

PARTÍCULAS TAMBÉM TÊM COMPORTAMENTO ONDULATÓRIO!!

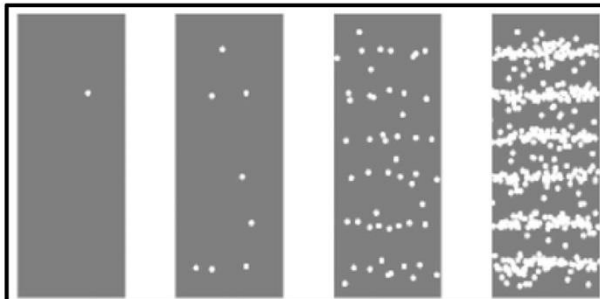


DE BROGLIE

ALÉM DISSO, ESSE RESULTADO DEMONSTROU AINDA QUE QUANTO MAIOR O MOVIMENTO DA PARTÍCULA, MENOR SEU COMPRIMENTO DE ONDA, CONCEITO FUNDAMENTAL PARA EXPLICAR O PRINCÍPIO DA INCERTEZA.

SUAS IDEIAS FORAM COMPROVADAS JUSTAMENTE UTILIZANDO UM ANÁLOGO DO EXPERIMENTO DE YOUNG, ATIRANDO-SE UM ELÉTRON POR VEZ CONTRA O OBSTÁCULO COM A DUPLA FENDA:

O RESULTADO FOI IMPRESSIONANTE! OBTIVE-SE UM PADRÃO DE INTERFERÊNCIA, REVELANDO A NATUREZA ONDULATÓRIA DO ELÉTRON!



A TEORIA ONDA-PARTÍCULA Rendeu um Nobel para de Broglie em 1929.

FIM DA CERTEZA, PRINCÍPIO DA INCERTEZA

O FÍSICO ALEMÃO WERNER HEISENBERG PERCEBEU QUE AS DESCOBERTAS DE DE BROGLIE TAMBÉM REVELAVAM UMA SÉRIA LIMITAÇÃO INTRÍNSECA À ESCALA QUÂNTICA, E ENTÃO PROPÓS O SEU PRINCÍPIO DA INCERTEZA:

NÃO É POSSÍVEL MEDIR AO MESMO TEMPO A POSIÇÃO E O MOMENTO DE UMA PARTÍCULA ATÔMICA

MAS POR QUÊ?

TUDO EXPERIMENTO PODE POSSUIR UMA PEQUENA IMPRECISÃO...



HEISENBERG

...QUE NA ESCALA DO MUNDO QUE VIVENCIAMOS PODE SER CONTORNADA.



MAS O MESMO NÃO OCORRE NO ESCALA ATÔMICA!



QUANDO MEDIMOS PARTÍCULAS ATÔMICAS E SUBATÔMICAS...

... USAMOS QUANTIDADES DE ENERGIAS PARECIDAS...

O QUE ALTERA SUAS CONDIÇÕES.

O FÓTON UTILIZADO PARA OBSERVAR O ELÉTRON ACABA TRANSFERINDO PARTE DE SUA ENERGIA PARA ELE, MODIFICANDO SUA POSIÇÃO E SEU MOVIMENTO.

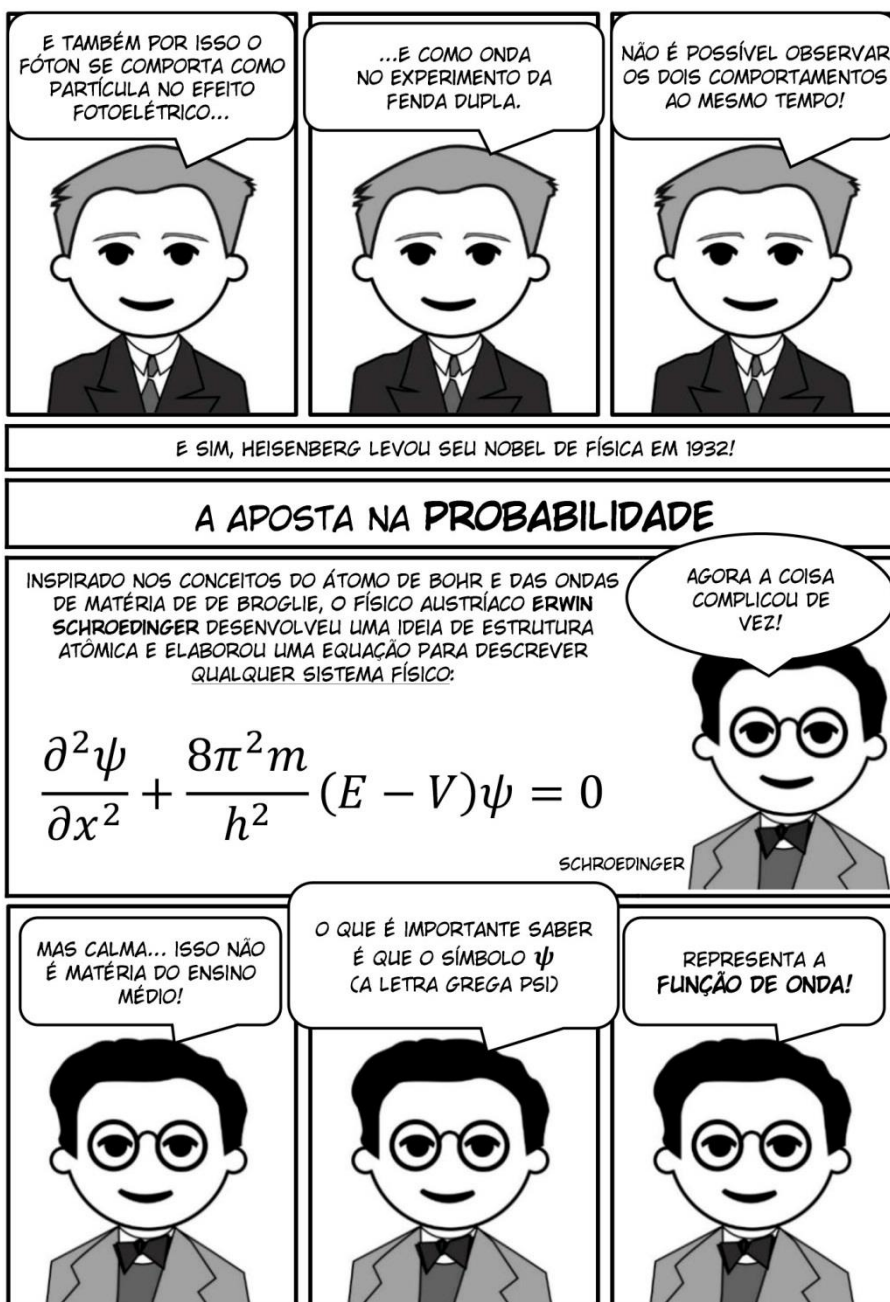
USAMOS FÓTONS PARA OBSERVAR ELÉTRONS E COISAS ASSIM.

LUTILIZANDO A RELAÇÃO DE DE BROGLIE/EINSTEIN COMO PARTE DO CÁLCULO, HEISENBERG CHEGOU À DETERMINAÇÃO DA IMPRECISÃO QUE CAUSAVA ESSA INCERTEZA:

$$(\Delta Q)(\Delta x) \geq \frac{h}{4\pi}$$

- ΔQ É A INCERTEZA DO MOMENTO
- Δx É A INCERTEZA DA POSIÇÃO
- h É A CONSTANTE DE PLANCK (COLHA ELA AÍ DE NOVO!)

ESSE PRINCÍPIO INDICA QUE, QUANTO MAIOR A PRECISÃO NA MEDIDA DE UMA GRANDEZA (POSIÇÃO OU MOMENTO), MENOR SERÁ NA MEDIDA DA OUTRA, SEMPRE LIMITADO PELA CONSTANTE DE PLANCK!



NA ESCALA QUÂNTICA NÃO TEMOS A CERTEZA SOBRE A POSIÇÃO...

...OU O MOVIMENTO DE UMA PARTÍCULA.

SÓ VERIFICAMOS UM OU OUTRO QUANDO AS MEDIMOS!

O ψ (A FUNÇÃO DE ONDA), ENTRE OUTRAS COISAS...

...TAMBÉM REPRESENTA A PROBABILIDADE DE UMA PARTÍCULA ATÔMICA OU SUBATÔMICA...

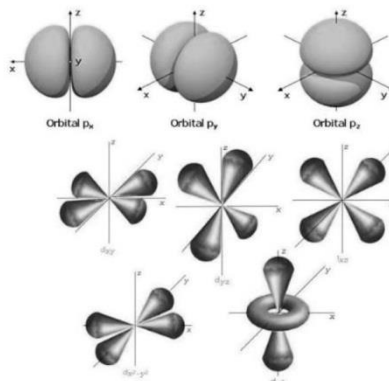
EXISTIR EM UM DETERMINADO LUGAR!

NÃO SABEMOS A EXATA POSIÇÃO DE UMA PARTÍCULA ATÉ A MEDIRMOS, MAS PODEMOS CALCULAR PROBABILIDADE DE ONDE ELA PODERÁ ESTAR...

A DENSIDADE DE PONTOS, OBTIDA PELO CÁLCULO DA FUNÇÃO DE ONDA (ψ), INDICA A PROBABILIDADE DE ENCONTRAR UM ELÉTRON. AQUI PERCEBEMOS QUE ESTA PROBABILIDADE DIMINUI QUANTO MAIS AFASTADA DO NÚCLEO ATÔMICO.




O MODELO ATÔMICO ATUAL, CONHECIDO COMO ÁTOMO DE SCHROEDINGER, DERIVA DOS CÁLCULOS DA FUNÇÃO DE ONDA.



OS ORBITAIS ATÔMICOS DE UM ÁTOMO SÃO REPRESENTADOS PELOS DOS ESTADOS ESTACIONÁRIOS DA FUNÇÃO DE ONDA DE UM ELÉTRON.

ESSE CONCEITO E A UTILIZAÇÃO DOS CÁLCULOS DA FUNÇÃO DE ONDA DERAM IMPORTANTES CONTRIBUIÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO PRODUTIVA DA TEORIA ATÔMICA: NOBEL DE FÍSICA PARA SCHROEDINGER EM 1933!

MUITOS OUTROS FÍSICOS E PESQUISADORES CONTRIBUÍRAM DE FORMA ESSENCIAL PARA A DESCOBERTA E A ELABORAÇÃO DA TEORIA QUÂNTICA, ESTABELECENDO OS FUNDAMENTOS FÍSICOS PARA O SALTO TECNOLÓGICO OCORRIDO NO SÉCULO XX:

CHIPS DE COMPUTADOR, LASERS, RESSONÂNCIA MAGNÉTICA, TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÕES, SÃO APENAS ALGUNS EXEMPLOS DE RESULTADOS DIRETOS DA APLICAÇÃO DESTES CONHECIMENTOS.



É IMPORTANTE VALORIZAR E RECONHECER OS INÚMEROS AVANÇOS E BENEFÍCIOS QUE EXPERIMENTAMOS NA PRÁTICA COTIDIANA PROPORCIONADOS PELO DESENVOLVIMENTO DA CIÊNCIA MODERNA, REALIZADOS POR PESSOAS SÉRIAS E COMPROMETIDAS A INVESTIGAR A FUNDO A VERDADEIRA ESSÊNCIA DA NATUREZA. NÃO EXISTEM ESTUDOS CIENTÍFICOS COM RESULTADOS POSITIVOS PARA QUALQUER TIPO DE MISTICISMOS OU CURANDEIRISMOS QUE ENVOLVEM O USO DA TEORIA QUÂNTICA. CHARLATANISMO É CRIME CART. 283 DO CÓDIGO PENAL - DECRETO LEI 2848/40. DENUNCIE.

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO

- 1) Há quanto tempo você atua como professor de Física? Em quais níveis de ensino?
- 2) Você fez alguma pós-graduação? Se sim, qual foi o foco de seu trabalho?
- 3) Você aborda a Física Quântica em suas aulas? Se sim, quais são os tópicos trabalhados e se a abordagem é conceitual e/ou matemática.
- 4) Qual a sua opinião a respeito do uso de história em quadrinhos (HQ) como recurso didático em aulas de Física?
- 5) Você já utilizou história em quadrinhos em suas aulas? Se sim, de que maneira tal recurso didático foi implementado e como você avalia o resultado da utilização desse tipo de material?
- 6) Na sua visão, os conteúdos abordados na HQ produzida pelo autor estão adequados para o uso no Ensino Médio? Comente.
- 7) Como você vê o uso dos aspectos matemáticos da Física Quântica na HQ?
- 8) Que tópicos de Física Quântica você acrescentaria ou removeria no material apresentado?
- 9) Como você avalia a potencialidade dessa HQ em suas aulas, ou seja, você utilizaria esse material como lhe foi apresentado? Comente.
- 10) Apresente suas possíveis sugestões para a melhoria do material e/ou para seu uso em sala de aula.

ANEXO A – RESPOSTAS DO QUESTIONÁRIO

1) Há quanto tempo você atua como professor de Física? Em quais níveis de ensino?

- A. Desde o final de 2016 (com algumas interrupções, não direto). Como professor de forma direta com nível médio. No mestrado, como atuei como estagiário em um curso de professores, mas "oficialmente" sempre com ensino médio.
- B. há 20 anos. Nós ensinamos: último ano do fundamental, médio e superior.
- C. 17 anos. Ensino médio, técnico, graduação e pós-graduação.
- D. 14 anos / Ensino médio e superior.
- E. 20 anos - Principalmente no Ensino Médio. Atuo cerca de 5 anos no ensino superior.
- F. Iniciei o trabalho como professor no início deste ano. Atuo no nível médio e superior.
- G. 20 anos, atualmente no Ensino Superior, Ensino Médio e EJA.
- H. 13 anos. Médio e superior

Sujeito	Nível de Ensino	Tempo de Atuação
Professor A	Ensino Médio	4 anos
Professor B	Ensino Fundamental, Médio e Superior	20 anos
Professor C	Ensino Médio, Técnico, Superior e Pós-Graduação	17 anos
Professor D	Ensino Médio e Superior	14 anos
Professor E	Ensino Médio e Superior	20 anos
Professor F	Ensino Médio e Superior	1 ano
Professor G	Ensino Médio, Superior e EJA	20 anos
Professor H	Ensino Médio e Superior	13 anos

2) Você fez alguma pós-graduação? Se sim, qual foi o foco de seu trabalho?

- A. Sim. Concluí recentemente (fevereiro de 2020) o Mestrado em Educação Científica e Tecnológica no PPGECT da UFSC. Meu foco de pesquisa foi a importância da Natureza da Ciência na formação de professores tendo como "ponto de partida" discussões a respeito da detecção das ondas gravitacionais.
- B. Sim, mestrado, trabalhei com física teórica. Iniciei um doutorado em geofísica mas não terminei.
- C. Sim. Calibração em sistema LIDAR para detecção de fluorescência em água
- D. Mestrado e doutorado em Física Atômica e Molecular. Trabalho com interação da radiação com a matéria, especialmente gelos astrofísicos e materiais poliméricos.
- E. Pós graduação em Ensino de Ciências e Mestrado em Educação em Ciências e em Matemática

- F. Sim, estou no período final do doutorado. Caracterização espectroscópica de materiais.
- G. Sim, sou Mestre em Ensino de Física, o foco foi Termodinâmica.
- H. Sim. Engenharia de Materiais

Sujeito	Graduação	Foco
Professor A	Mestrado em Educação Científica e Tecnológica	A importância da Natureza da Ciência na formação de professores
Professor B	Mestrado	Física Teórica
Professor C	Pós-Graduação	Calibração em sistema LIDAR para detecção de fluorescência em água
Professor D	Mestrado e doutorado em Física Atômica e Molecular	Trabalho com interação da radiação com a matéria, especialmente gelos astrofísicos e materiais poliméricos.
Professor E	Pós graduação em Ensino de Ciências e Mestrado em Educação em Ciências e em Matemática	
Professor F	período final do doutorado	Caracterização espectroscópica de materiais.
Professor G	Mestre em Ensino de Física	Termodinâmica
Professor H	Pós-Graduação	Engenharia de Materiais

3) Você aborda a Física Quântica em suas aulas? Se sim, quais são os tópicos trabalhados e se a abordagem é conceitual e/ou matemática.

- A. Trabalhei pouco com física quântica diretamente nesses anos. Parte pela já mencionada descontinuidade na atuação, parte por não ter trabalhado muito com turmas de 3º ano, onde usualmente se trata da física moderna. No entanto, sempre busquei "diluir" algumas discussões sobre o comportamento quântico das partículas ao longo de outras discussões em sala. Por via disso, normalmente a abordagem foi conceitual, apenas.
- B. Abordo de forma conceitual
- C. Já trabalhei na graduação (curso de engenharia elétrica) com abordagem conceitual e matemática e no ensino médio/técnico com abordagem basicamente conceitual.
- D. Trabalho com a disciplina de "Introdução à Química Quântica" no superior em química. Portanto, abordagem tanto conceitual quanto matemática. No ensino médio, faz mais de 10 anos que não leciono Física Moderna.
- E. Quase nunca abordei Física Quântica em minhas aulas. Mas venho me esforçando para inserir tópicos que tratam do Efeito Fotoelétrico; Quantização da Energia; Dualidade onda-partícula.
- F. Iniciei as atividades como professor no início deste ano, portanto ainda não trabalhei estes conteúdos.
- G. Quando consigo abordar, efeito fotoelétrico com abordagem teórica.
- H. Sim. Efeito fotoelétrico, dualidade onda-partícula, modelos atômicos, função de onda. A abordagem é conceitual

Sujeito	Tópicos Abordados	Abordagem
Professor A		conceitual
Professor B		conceitual
Professor C		conceitual e matemática
Professor D	"Introdução à Química Quântica"	conceitual e matemática
Professor E	Efeito Fotoelétrico; Quantização da Energia; Dualidade onda-partícula	
Professor F		
Professor G	Efeito Fotoelétrico	conceitual
Professor H	Efeito fotoelétrico, dualidade onda-partícula, modelos atômicos, função de onda.	conceitual

4) Qual a sua opinião a respeito do uso de história em quadrinhos (HQ) como recurso didático em aulas de Física?

- A. Acredito que seja uma forma de potencializar a discussão dos conceitos envolvidos, visto que busca dinamizar quaisquer "modelos tradicionais" de construção coletiva do conhecimento. Não significa que os modelos tradicionais não sejam importantes, mas sim que a perspectiva de abordar por meio das HQ's ajuda, inclusive, a desmistificar a idéia de ciência sisuda e sem lirismo, e acaba por contribuir com uma importante discussão atual na pesquisa em educação em ciências que é as relações entre arte e ciência.
- B. Um valioso material, por ser uma forma de linguagem mais atrativa, informal e prazerosa é capaz de passar conceitos importantes com diversão e visualização.
- C. Acredito que seja um recurso válido para alguns estudantes. Contudo, me parece que deva ser complementar.
- D. Estudei pouco essa possibilidade como recurso didático, mas penso que é uma ferramenta útil, como muitas outras. Tão importante quanto o recurso, é a mediação do professor para fazer render os frutos adequados e explorar todo o potencial de cada material.
- E. Acho bem interessante. Principalmente nos casos em que os recursos eletrônicos são limitados. Senão, acho que uma produção ou apresentação em vídeo ou simulação podem se aproximar melhor do desejado visto que eles podem reproduzir movimento e cores.
- F. Creio que o resultado seja positivo, pois chama a atenção do aluno por ser algo "diferente" e pouco utilizado em sala de aula.
- G. Acho válida a ideia, a dificuldade é encontrar materiais para essa abordagem.
- H. Acho uma ótima opção para alternar com outros recursos, pois desperta interesse dado ao poder lúdico do quadrinho.

5) Você já utilizou história em quadrinhos em suas aulas? Se sim, de que maneira tal recurso didático foi implementado e como você avalia o resultado da utilização desse tipo de material?

- A. HQ's nunca utilizei, mas confesso que após entrar em contato com sua pesquisa me questionei em relação a isso, pois acredito ser uma perspectiva

a ser utilizada. Desta forma, não consigo avaliar uma implementação propriamente minha, mas reiterar a importância da mesma, principalmente de acordo com as justificativas que salientei na questão anterior.

- B. Sim. Já utilizei alguns quadrinhos que comprei na livraria da física.
- C. Não utilizei.
- D. Não utilizei.
- E. Não utilizei. Só usei tirinhas em questões de prova ou exercícios.
- F. Não utilizei HQ em minhas aulas.
- G. Não, apenas tirinhas curtas para abordar conceitos.
- H. Sim. Utilizei como forma de contextualizar e como questão de avaliação.

Sujeito	Utilização de HQ na Sala de Aula	Implementação
Professor A	Não	
Professor B	Sim	
Professor C	Não	
Professor D	Não	
Professor E	Não	
Professor F	Não	
Professor G	Não	
Professor H	Sim	Contextualização e Avaliação

6) Na sua visão, os conteúdos abordados na HQ produzida pelo autor estão adequados para o uso no Ensino Médio? Comente.

- A. Sim, até porque os conceitos são abordados e explicados e não simplesmente “jogados” na HQ e as equações são de um formalismo que cabe ao que se trabalha – ou ao menos deveria se trabalhar – a nível de ensino médio.
- B. Sim. Sem dúvida acho que constitui um ótimo material para introduzir o assunto com os alunos do ensino médio.
- C. Sim. Acredito que está adequado para despertar interesse nesses assuntos.
- D. Em linhas gerais, sim. Bom apelo visual, bastante figura, com descrições do que está acontecendo e a física envolvida. Por outro lado, penso que o professor precisa estar bem ciente dos conteúdos que vai tratar com base nessa HQ, pois ele não poderá usá-la para aprender mecânica quântica e depois ensinar aos alunos. Por se tratar de uma HQ, ela é mais direta em alguns pontos, traz alguns termos sem maiores explicações e o professor vai precisar lidar com isso (ex: raias espectrais, função de onda do elétron no átomo de hidrogênio, ...). Mas sobre estar adequada, não vejo motivo de não poder usar, desde que o professor tenha clareza do que quer extrair com ela.
- E. Sim, estão muito bem adequados.
- F. Sim, o conteúdo é apresentado de forma clara e que possibilita o entendimento para um aluno de Ensino Médio.
- G. Achei o material bem produzido, com sequência coerente dos assuntos.
- H. Estão adequados. Questões pontuais poderia ser revistas, como o caso das HQ 3, que apresenta a energia com o n , número de pacotes. A maioria dos livros usa a constante de Planck e a frequência, além do mais fala em energia de cada pacote, logo, em desacordo com multiplicar pelo número de pacotes.

7) Como você vê o uso dos aspectos matemáticos da Física Quântica na HQ?

- A. Considerando que o objetivo da HQ é servir de material, e entendendo que as equações nela vêm muito na perspectiva de exposição, acredito que desde que o professor que utilizará ela aborde mais detalhadamente (com exemplos e, se possível, exercícios), tais aspectos matemáticos estão adequados. Arriscaria dizer que (considerando obviamente todo o complexo que é uma aula de ciências) o professor que utilizará a HQ só terá dificuldades com os aspectos matemáticos se, equivocadamente, considerar a HQ como subsídio nela mesma; no sentido de acreditar que ela por si só perfaz sua aula. A HQ entendida como material subsidiário às aulas, repito, está adequada.
- B. Mostrar equações é uma forma de despertar o interesse para um futuro aprofundamento. A matemática da física quântica não é mesmo trabalhada no ensino médio.
- C. Alguns deles podem ser compreendidos, entretanto outros, como a função de onda, não vão representar nada ao estudante, podendo não alcançar o objetivo esperado.
- D. Está bem apresentado e bem explicado. À exceção da Equação de Schrödinger (que o autor alerta não ser adequado para o ensino médio), o restante é razoável de ser tratado em nível médio (não creio que os alunos terão mais dificuldades com estas equações do que o teriam com equações de óptica geométrica ou MRUV).
- E. Acredito serem importantes, pois na Física geralmente há uma modelagem matemática para descrever os fenômenos e não podemos desprezá-la.
- F. A abordagem matemática está adequado para o nível de Ensino Médio, não está avançado demais e com a indicação do que cada variável representa.
- G. Como a cada ano que passa nossos alunos parecem ficar mais defasados na matemática, acredito que a forma como ela foi abordada na HQ me pareceu adequada.
- H. Da forma "leve" como foram abordados, não vejo grandes problemas, é possível sim ser trabalhados.

8) Que tópicos de Física Quântica você acrescentaria ou removeria no material apresentado?

- A. A princípio eu não mudaria nada. Entendo que de " pano de fundo" existe a importante preocupação sobre o charlatanismo quântico, ainda que não seja o cerne do trabalho. Nesse sentido, se o foco principal fosse esse, eu adicionaria algo em relação ao charlatanismo. Mas, a HQ no que é a proposta do trabalho está completa.
- B. Achei que o principal está presente nessa H.Q. gostei muito do seu recorte, não acrescentaria ou retiraria qualquer assunto, achei muito bom, mesmo. Um ótimo material, parabéns!
- C. Talvez seja interessante apresentar efeito Compton. A função de onda e distribuição de probabilidade me parecem bem difíceis de abordar nessa linguagem.

- D. Creio que essa opção é do autor do material. Tudo pode ser tratado, vai sempre depender da mediação e do nível de profundidade. Quando se trata de maneira adequada, mais informativa, até Relatividade Geral tá valendo.
- E. Me pareceu que o material está bem encadeado na história contada. Deixaria como está. Ficaria para outras histórias o aprofundamentos de conceitos/fenômenos ou os desdobramentos deles.
- F. Deixaria os tópicos desta forma.
- G. Nenhum, acho que está adequado.
- H. Estou de acordo com todos abordados.

9) Como você avalia a potencialidade dessa HQ em suas aulas, ou seja, você utilizaria esse material como lhe foi apresentado? Comente.

- A. Utilizaria, com certeza, principalmente considerando este como subsídio para abordar a desonestidade intelectual do charlatanismo quântico, discutindo com os estudantes tanto o “que é” quanto o que “não é” Física Quântica.
- B. Sem dúvida, usaria sim. Para introduzir o assunto é aprofundaria com discussões e simulações.
- C. Sim. Como disse antes, me parece com potencial para introduzir os assuntos e despertar o interesse. Contudo, não acredito que funcione para todos os estudantes.
- D. Sim, utilizaria. Mas me sinto preparado para uma compreensão mais profunda da HQ e, assim, tenho condições de mediar conflitos e curiosidades extras que apareçam em sala de aula. Como já argumentei, penso que as HQs, muitas vezes por serem um caminho ilustrativo mais simplificado, precisam de grande preparo e mediação dos professores.
- E. Acredito que sim. Mas minha tendência seria de deixá-lo como leitura auxiliar (antecipada) ou complementar (posterior).
- F. O material está organizado de forma clara e concisa, certamente poderia ser utilizado como introdução ao conteúdo de Física Quântica ou ainda para concluir e revisar o conteúdo.
- G. Utilizaria o material da forma que foi apresentado.
- H. Certamente utilizaria, traz uma visão lúdica, com apresentação teórica e matemática acessível ao EM.

10) Apresente suas possíveis sugestões para a melhoria do material e/ou para seu uso em sala de aula.

- A. Sinceramente não tenho nenhuma sugestão para melhoria pois considero que a HQ está “pronta” para ser utilizada, considerando os objetivos adequados para uma aula, certamente. No entanto, reforço que, caso o autor queira – e realmente, reitero, é uma questão de querer, não de necessidade – expandi-la, eu adicionaria alguns quadros sobre o charlatanismo quântico.
- B. Colocaria, mas acho que você já o fez, umas referências para aprofundamento do assunto, contendo, livros, textos eletrônicos e simulações.
- C. Conforme já relatado, vejo bastante potencial no material, mas entendo que trata-se de um material complementar ao estudo, que não substitui outras

- abordagens pedagógicas. Talvez seja mais efetivo para estudantes que já consomem esse tipo de mídia.
- D. Numa olhada rápida e descompromissada de primeiras impressões, eu sugeriria: - Cuidado com o tratamento dos alunos como "pequenos matemáticos" para tratar das equações, pode reforçar a ideia de que precisamos ser matemáticos para entender a matemática do ensino médio. - Você vai falar de dualidade no final do seu material, mas nos primeiros quadros coloca as partículas subatômicas apenas como bolinhas (como resolver isso? É preciso pensar estratégias, talvez uma nota de rodapé ou talvez evitar o desenho explícito delas) - Cuidado com a tentativa de explicar classicamente o princípio de incerteza (alguns livros didáticos do superior fazem isso). Nada contra a tentativa em si, mas é preciso ter noção de que isso é apenas uma analogia explicativa, pois pode parecer que, de alguma maneira, seria possível contar esse "incômodo" experimental e fazer sumir a incerteza, o que não é o caso. Mas vamos deixar a banca trabalhar também com mais sugestões. :) Parabéns pelo material e pela dedicação. Sucesso na empreitada e na carreira!
- E. Eu acho que a analogia de corpo negro não está correta, sempre compreendi que é a cavidade que absorve a energia... Mas dê uma conferida, pode ser que eu esteja equivocado. As explicações sobre dupla fenda estão muito enxutas - e aí eu também não sei o quanto você quer aprofundar isso. Também sugiro uma revisão gramatical por um profissional de linguagens. Na página 13 no primeiro quadro acho que tem uma redação incorreta: "... representados pelos dos estados.." acho que era para ser "dois estados" E você acha relevante colocar o texto final? Ele é um texto de opinião muito forte. Eu concordo com ela mas será que caberia para o trabalho? Parece que tira o foco de um trabalho acadêmico. No mais está um ótimo trabalho.
- F. Creio que os desenhos poderiam ser coloridos.
- G. As páginas 8 e 13 me pareceram pouco atrativas, não me pareceu HQ.
- H. Sugiro rever as raias espectrais na HQ 5, fico pouco compreensível de um modo geral, e tbém a HQ 3, com $E = nhf$. A fórmula apareceu diferente no HQ 8. O n não faz sentido até mesmo pelo texto apresentado na HQ 3.