

AFINAL O QUE É FÍSICA QUÂNTICA? UMA HISTÓRIA EM QUADRINHOS PARA USO NO ENSINO MÉDIO

AFTER ALL WHAT IS QUANTUM PHYSICS? A HISTORY IN COMICS FOR MEDIUM TEACHING USE

A. R. CORRÊA¹, L. H. M. ARTHURY¹

¹Instituto Federal de Santa Catarina

Resumo

Apresentamos uma História em Quadrinhos fundamentada sobre Física Quântica, para uso em aulas de física no Ensino Médio. Além de apresentar alguns dos principais conceitos da Física Quântica, a História em Quadrinhos propõe expor o que de fato é estudado pela teoria, afastando interpretações equivocadas, quando não deliberadamente mal intencionadas, usualmente observadas nos diversos canais de comunicação. Apresentamos também uma avaliação do material realizada por professores de física atuantes no Ensino Médio, os quais apontaram para a possibilidade de se trabalhar efetivamente com esse tipo de material, com o objetivo de complementar materiais didáticos tradicionais, representando uma opção potencialmente enriquecedora para a prática do professor.

***palavras chave:** Ensino de Física. Física Quântica. Física Moderna no Ensino Médio. História em Quadrinhos no Ensino.*

Abstract

We present a comic strip based on Quantum Physics for teaching high school Physics. Additionally to the main concepts of Quantum Physics, we describe what is actually studied in this theory by removing deliberate misinterpretations and misleading impression which have no claim to science, but is, nonetheless, supported by various forms of communication. The didact material was evaluated by high school Physics teachers, who have pointed out the possibility of using the material as a complement for traditional teaching materials. According to them the approach has great potential for enriching teaching practice.

Keywords: *Physics Teaching. Quantum Physics. High School Physics. Comic Strip for Teaching Science.*

I. INTRODUÇÃO

A Física Quântica é uma das teorias de maior sucesso de toda a ciência. Além de permitir uma visão sofisticada e altamente corroborada da natureza a nível atômico, a quântica¹ se mostra presente em diversas áreas do conhecimento científico, da constituição de estrelas distantes e as próprias condições iniciais de nosso universo, passando por todo o nosso entendimento do átomo e dos fenômenos diretamente a ele relacionados (SEGRÈ, 1987), como a radioatividade com seus usos pacíficos e bélicos (o que só atesta a eficácia da teoria), e permitindo avanços em diversos contextos da eletrônica moderna.

Apesar de encontrarmos incontáveis fontes descrevendo fenômenos e objetos envolvendo a mecânica quântica ou simplesmente a palavra quântica(o), é notável o fenômeno da disseminação de um uso indevido dos conceitos da quântica em contextos totalmente às margens da produção séria nessa área, conforme apontado por Dionísio, 2004, e Cruz e Cruz, 2009. Culturalmente a quântica também se tornou uma terra de ninguém, onde podemos encontrar a terminologia quântica em diversas obras, no mínimo, duvidosas (DIONÍSIO, 2004, p. 28). Isso acaba por se tornar um ruído (por vezes um estrondo) na educação básica, foco do presente trabalho.

Ao mesmo tempo, a quântica, pelo menos a Física Quântica, aquela que é prerrogativa da ciência, é uma das áreas mais importantes para se trabalhar na educação básica, contemplando um relativo consenso entre os pesquisadores da área, a saber, a inserção da física moderna e contemporânea no Ensino Médio (SILVA e ALMEIDA, 2011). A quântica está presente em boa parte de tudo o que se faz em física moderna e contemporânea e, se não for pelo valor do conhecimento em si para entender a natureza em suas menores escalas, sua abordagem na educação básica se mostra indispensável para o aluno se colocar em uma sociedade onde as tecnologias que o cercam são determinadas por esse conhecimento (TERRAZZAN, 1992, p. 213).

¹Assim também denominaremos a Física Quântica ao longo desse trabalho, por simplicidade.

Felizmente existem trabalhos que objetivam trazer esse campo de conhecimento para o Ensino Médio (PAULO e MOREIRA, 2004, PEDUZZI e BASSO, 2005, ANDRADE et al., 2007, COSTA et al., 2007, SALES et al., 2008, CARVALHO NETO et al., 2009, OSTERMANN e PEREIRA, 2009, OSTERMANN et al., 2009, FEITOSA et al., 2020), e a esses se soma nossa presente proposta. Nosso foco foi estruturar um material para subsidiar um primeiro contato formal com a quântica, de modo a apresentar noções centrais da teoria em um nível adequado a esse primeiro contato. Para isso, e justamente pretendendo usar um recurso potencialmente didático e próximo da realidade cultural do aluno, buscamos produzir uma História em Quadrinhos (HQ) que permitisse uma aproximação interessante com alguns dos principais conceitos da quântica. Para uma primeira avaliação do material produzido, conduzimos uma pesquisa qualitativa com oito professores de física com diferentes perfis, conforme discutiremos na sequência. Essa pesquisa objetivou obtermos um retorno em relação à potencialidade didática do material, permitindo que identificássemos possíveis otimizações para seu efetivo uso com alunos do Ensino Médio. Discorreremos a seguir sobre o contexto de trabalhos com física moderna na educação básica, e na sequência apresentaremos a HQ produzida. Para uma melhor fluidez textual, discutiremos sobre os conteúdos da quântica mobilizados, e os objetivos com cada seção da HQ proposta, ao longo da própria apresentação do material. Finalizaremos com as considerações dos professores participantes da pesquisa, buscando avaliar a potencialidade da HQ para uso em uma segunda etapa, de implementação em aulas de física no Ensino Médio.

II. CRITICIDADE E FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO

A inserção da física moderna no Ensino Médio é discutida ao menos desde o final do século passado (TERRAZZAN, 1992), e hoje podemos tratar esse tópico como sendo consensual. Ao menos entre os pesquisadores que se dedicam a pensar essa questão, há bastante consenso sobre a necessidade de inserção de temas de [física moderna e contemporânea] no [Ensino Médio] (SILVA e ALMEIDA, 2011, p. 626). De fato, seria um tanto incompreensível não tratarmos desse tema na educação básica, não apenas porque as diretrizes educacionais contemplam essa presença, mas porque é simplesmente desarrazoado não nos adentrarmos nas teorias e descobertas modernas da ciência.

Dentre um dos possíveis elementos para esse trabalho com a educação básica, podemos sugerir que a existência de materiais facilmente disponíveis (e devidamente atestados, de alguma forma) é um importante facilitador para o trabalho do professor. Materiais não nos garantem seu bom uso, mas a ausência desses certamente ajudará muito menos.

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 que, em princípio, poderiam estar presentes no Ensino Médio. Entre esses, destacam-se: 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 e CRUZ, 2009). E apesar da recomendação desses profissionais, que desde o século retrasado recomendam a inserção da física moderna no Ensino Médio, ainda precisamos avançar com propostas que tornem esses tópicos cada

vez menos estranhos ao contexto escolar (STUDART, 2003, p. 258). Conforme mencionamos na introdução, felizmente tem ocorrido avanços nesse sentido, mas defendemos que há muito mais a ser feito.

Naturalmente sabemos que a quântica é intrinsecamente abstrata, além de ser operacionalmente muito distante das habilidades do aluno do Ensino Médio. O trabalho com esse tema certamente não é algo simples de ser feito, como sugerem alguns trabalhos (MONTEIRO et al., 2009, PAULO e MOREIRA, 2011). Mas se desistirmos de uma transposição minimamente compromissada com o essencial de seus conceitos, estaremos deixando o terreno livre para as inevitáveis abordagens descompromissadas (quando não totalmente charlatãs) dos diversos canais sociais de informação, particularmente a internet. Entretanto, nas orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, já era 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). Logo, não será produtivo pensarmos naquela lista anterior como um acréscimo puro e simples ao currículo escolar (CUSTÓDIO PINTO e ZANETIC, p. 7). Mas certamente precisamos pensar em reorganizações de modo a contemplar esses assuntos. Apesar de não termos, nas orientações educacionais supracitadas, uma referência explícita à quântica, 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). Ora, isso passa diretamente pela quântica.

Junto à necessidade de se abordar esses temas, os parâmetros também apontam para uma visão da física de modo que esteja voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, crítico e atuante, com instrumentos para compreender, intervir e interagir com a realidade. Isso sugere que uma criticidade deva ser oportunizada aos alunos, para compreender que informação vem em todos os sabores e qualidades, e que devemos, de algum modo, discernir saberes científicos constituídos de folclore pseudocientífico. Para tal, podemos nos referir a uma aprendizagem significativa crítica:

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).

Essa criticidade já seria valorosa em si, mas diante de um contexto onde se está usando a quântica para efetivamente ludibriar as pessoas (MACHADO e CRUZ, 2016), acaba por se tornar nada menos que indispensável. Para além de ser apenas uma apropriação indébita de conceitos da ciência, a pseudociência pode ser verdadeiramente dolosa:

[...] 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 (KNOBEL, 2008, p. 6).

A superstição e a pseudociência buscam suas vítimas pela credulidade, fornecem respostas fáceis e evitam o exame crítico. Como Carl Sagan sugeriu, 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 (2009, p. 25). Atentando-nos de bom grado ao alerta de Sagan, parte de nossas intenções com a produção da HQ foi justamente ocupar um espaço para se falar sobre ciência, de modo a diminuir as chances de ser ocupado por discursos pseudocientíficos. Conforme Feitosa et al. sugerem, aproximar os estudantes do fazer e viver ciência implica afastá-los da pseudociência, da negação completa de conhecimentos estabelecidos, é dar-lhes condições para criticar proposições terraplanistas, antivacinas e congêneres (2020, p. 666). Definitivamente estamos precisando disso.

III. QUADRINHOS COMO MATERIAL DIDÁTICO

As histórias em quadrinhos HQs ou simplesmente quadrinhos se caracterizam basicamente por uma exposição gráfica que combina texto e imagem em disposições que produzem um dinamismo à história contada. Utiliza-se de imagens pictóricas e outras justapostas em sequência deliberada destinadas a transmitir informações e/ou a produzir uma resposta no espectador (McCLOUD, 2005, p. 9). Podemos considerar as HQs como uma linguagem específica, que nos permite uma comunicação que alia elementos visuais e textuais. Apesar de ser um formato bastante vinculado ao simples entretenimento, as HQs têm 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 e 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 e RAMOS, 2009). Assim, essa linguagem se torna um possível recurso didático para o professor (JORGE e PEDUZZI, 2016, p. 11), utilizando obras variadas ou mesmo criando as suas, como na nossa presente proposta. Mais especificamente em relação à área de Ensino de Física, Caruso e Freitas sugerem que:

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, para 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 uma delas é usadas separadamente e, para tanto, é preciso estar atento à clareza e à comunicação da mensagem que pretendemos passar (McCLOUD, 2008). Apesar de estarmos atentos a esses pontos, é natural que uma transposição de assuntos tão específicos quanto os da quântica incorra em simplificações inevitáveis. Por isso enfatizaremos, de modo reiterado nesse trabalho, a importância da atenção do professor interessado em sua implementação.

Uma interessante proposta didática correlata às nossas intenções, e que também propõe uma HQ para tratar assuntos da quântica no Ensino Médio, inspirou-se em versos de cordel para atrair o estudante. Segundo os autores,

o aspecto lúdico da recitação das narrativas dos versos rimados foi determinante para a empolgação da turma com essa dinâmica e favoreceu para o envolvimento dos mesmos nas etapas seguintes da sequência didática (FEITOSA et al., 2020, p. 677).

Esse trabalho articulou a HQ com situações-problema a partir de situações históricas envolvendo o contexto clássico e o contexto da teoria quântica, sendo que todas as soluções propostas para as questões estudadas demonstram que houve avanços no entendimento conceitual trabalhado (FEITOSA et al., 2020, p. 690).

Nossa proposta naturalmente também visa o interesse do aluno a partir do formato escolhido, com os principais cientistas da quântica aparecendo como os apresentadores de seus principais conceitos, como apresentaremos a seguir.

IV. A HQ PRODUZIDA

A história em quadrinhos produzida tem como proposta a abordagem da Física Quântica através de uma narrativa conceitual e histórica, sendo dividida em seções que elencam 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 e CRUZ, 2016, p. 4).

Em razão da inexperiência do autor principal com ilustrações, os desenhos de pessoas e expressões faciais utilizadas na HQ foram inspirados em emojis², devido à facilidade e variedade de expressões e situações diversas. Apresentamos nas próximas seções todo o material, com cada figura³ representando sequencialmente a HQ elaborada. Conjuntamente, apresentaremos os objetivos de cada seção e considerações a respeito dos conteúdos mobi-

²Emojis são símbolos gráficos, ideogramas ou sequências de caracteres (ex.: ":-)", ":-(", "_ ^") que expressam uma emoção, uma atitude ou um estado de espírito. São geralmente usados na comunicação eletrônica informal. in Dicionário Priberam da Língua Portuguesa [online], 2008-2020, <https://dicionario.priberam.org/emoji> [consultado em 24-09-2020].

³Todas as figuras são de autoria do autor principal desse artigo.

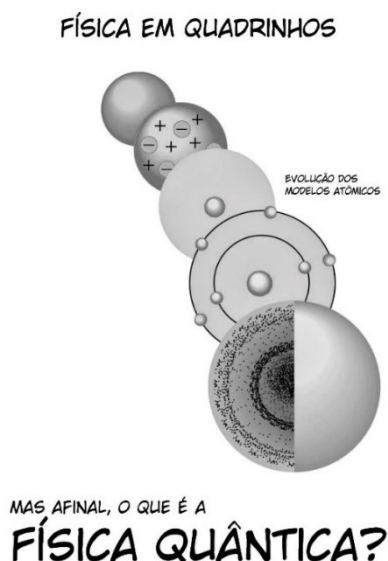


Figura 1: Capa da HQ, ilustrando a evolução dos modelos atômicos, representando a escala a que se refere a quântica e o aspecto de desenvolvimento histórico da teoria.

lizados. Além de justificar nossas escolhas, essas considerações são de valia ao professor interessado em trabalhar com o material.

IV.1. SEÇÃO I - ELEMENTOS INICIAIS

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.

A imagem escolhida para a capa (figura 1) ilustra a evolução⁴ dos modelos atômicos, um tópico que é abordado no corpo da HQ e demonstra duas características essenciais do roteiro: as dimensões a níveis atômicos e mesmo subatômicos de que a Física Quântica trata, e também o aspecto histórico do desenvolvimento científico acerca do assunto. No formato de texto, o Física em Quadrinhos aparece como um jogo de palavras com o próprio termo História em Quadrinhos, e o título principal é apresentado dentro de uma pergunta, indicando que seu esclarecimento será 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 crise de representação que o próprio termo quântica sofre atualmente na sociedade. 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 e CRUZ, 2016, p. 6).

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



Figura 2: Título.

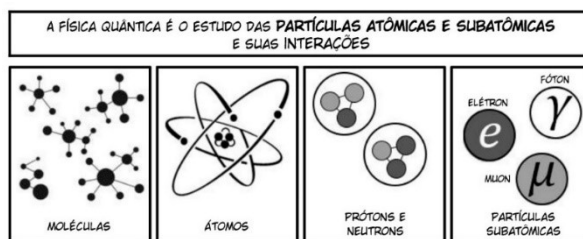


Figura 3: Partículas atômicas e subatômicas

Figuras 2 e 3: Título e Partículas atômicas e subatômicas

O desenho da figura 2 mostra a confusão e o descontentamento de um sujeito que, ao pesquisar sobre quântica, encontra resultados dúbios, demonstrados pela lista de embustes quânticos, em formato de texto e de cor mais clara que preenche o quadrinho. Na continuidade, com destaque para o título da HQ, também se repete a pergunta da capa, que é respondida de modo geral no quadro seguinte (figura 3). Evidentemente é uma resposta limitada e generalista, que naturalmente oculta diversos elementos que serão comentados na sequência da HQ, mas que pode servir ao aluno leitor como uma primeira impressão do que se trata o assunto. Essa definição é uma releitura do conceito apresentado por Pessoa Jr., que menciona que a Física Quântica é a teoria física que descreve o mundo dos átomos e da radiação (2006, p. 90), e em conformidade com Dionísio, que afirma que a mesma é a teoria adequada para a descrição dos sistemas atômicos (2004, p. 23). Os quadrinhos com desenhos de moléculas, átomos e partículas subatômicas 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 as teorias da época poderiam explicar todos os fenômenos naturais.

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, e complementando a citação acima sobre a situação paradoxal, dois tipos de fenômenos escapavam das explicações da física clássica. Um deles, associado com o movimento de corpos em velocidades elevadas, apontava para uma incompatibilidade entre o eletromagnetismo e a mecânica newtoniana. E, outro, relacionado com o comportamento de corpos muito pequenos (átomos e moléculas) e sua interação com a radiação eletromagnética. O primeiro problema deu origem à Teoria da Relatividade e, o segundo, levou à estruturação da Física Quântica (CHESMAN, ANDRÉ e MACEDO, 2004).

Os pilares da física clássica são ilustrados na figura 4 pelos desenhos dos dois cientistas citados: Isaac Newton, que aparece com uma maçã bichada na cabeça, em alusão à anedota



Figura 4: Física clássica.

de que ele teria descoberto a gravitação quando uma maçã caiu em sua cabeça, e James Clerk Maxwell, conhecido como o pai do eletromagnetismo⁵, mostrado com pequenas faíscas saindo de sua cabeça. Vale lembrar que os desenhos, em todos os quadrinhos propostos, têm caráter lúdico e visam facilitar a associação da imagem ao conceito para o aluno, devendo o professor esclarecer esses aspectos quando trabalhar com o 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 pensando sobre problemas que ainda precisavam ser resolvidos. Isso é referenciado no texto abaixo, 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 de então foram justamente o divisor de águas entre a física clássica e a quântica.

IV.2. SEÇÃO II - O PROBLEMA DA RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Um dos marcos iniciais da Física Quântica, ainda no final séc. XIX, foi a explicação para a radiação eletromagnética emitida por corpos aquecidos. As teorias existentes, que tratavam a luz como uma onda, não explicavam adequadamente os dados obtidos experimentalmente, e esse fato ficou conhecido como o problema da radiação de corpo negro. Um corpo negro, no contexto físico do eletromagnetismo, é um objeto idealizado que absorve a totalidade da energia que incide sobre ele não refletindo luz ou energia térmica, e, portanto, indetectável e invisível por reflexão e que, simultaneamente, seria o irradiador perfeito (CHESMAN, ANDRÉ e MACEDO, 2004, MAIA, 2009). 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.

⁵Pode ser importante o professor mencionar que Maxwell sintetizou, no séc. XIX, as ideias do eletromagnetismo em um conjunto de equações, mas as ideias básicas que permitiram essa síntese foram estruturadas por diversos outros pesquisadores, como Faraday, Lenz, Volta e Ampère.

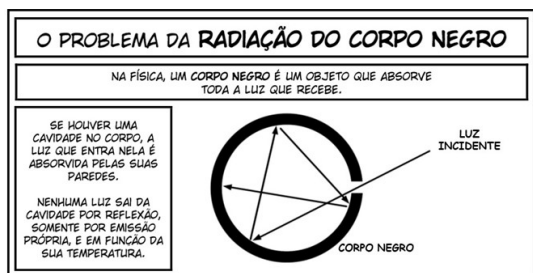


Figura 5: Radiação de corpo negro.

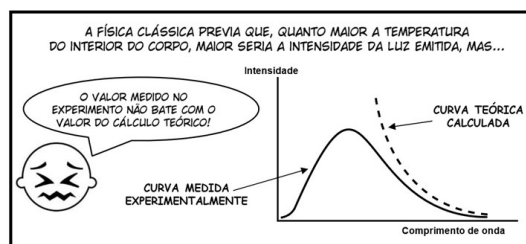


Figura 6: Gráfico teórico vs experimental.

Figuras 5 e 6: Radiação de corpo negro e Gráfico teórico vs experimental.

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).

Faz-se necessário lembrar da função do professor, que precisa intervir e complementar a explicação adequadamente com os alunos, em função de as ilustrações serem representações artísticas simplificadas. O professor deve trazer os conceitos para a realidade dos estudantes, complementando os elementos da HQ (o professor pode mencionar que um bloco de metal aquecido é uma aproximação de um corpo negro, por exemplo).

Os cálculos baseados na teoria eletromagnética clássica previam a emissão, a partir do corpo negro, de uma quantidade infinita de energia nas frequências mais altas e, portanto, não conseguiam reproduzir os valores obtidos experimentalmente (DIONÍSIO, 2005, p. 151). 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.

Para tentar 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 emitiam e absorviam luz em quantidades discretas de energia, e não de forma contínua, como numa onda (PAULA, ALVES e MATEUS, 2011).



Figura 7: Max Planck.



Figura 8: Pacotes de energia.

Figuras 7 e 8: Max Planck e Pacotes de energia.

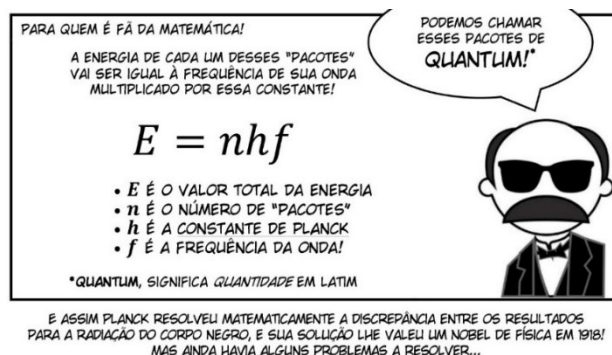


Figura 9: Equação da quantização.

A figura 7 também ilustra o comportamento ondulatório da luz, conhecido e bem aceito na época de Planck, representado como raios ondulantes saindo de uma lâmpada (esse ponto é retomado na sequência da HQ). A figura traz também uma ilustração mostrando o comportamento contínuo e o novo comportamento discreto da radiação, proposto por Planck, termos antagônicos (DIONÍSIO, 2004, p. 5) e ao mesmo tempo necessários para uma representação abrangente da natureza da radiação.

Na sequência, é apresentada uma série de quadrinhos (figura 8) com o personagem de Planck expondo, de maneira muito sucinta, o pensamento que o levou a solucionar matematicamente o problema do corpo negro. O texto dos balões de fala sintetiza a exposição de Pessoa Jr., 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, dada por $\epsilon = h\nu$, 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 (2006, p. 91).

O quadro da figura 9 dá ênfase para a equação da quantização, que resolveu a discrepância dos resultados teóricos e medidos para a radiação do corpo negro.

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). Max Planck foi laureado com o Prêmio Nobel de Física de 1918 em reconhecimento dos serviços que ele prestou para o avanço da Física por sua descoberta da energia quantizada (THE NOBEL PRIZE, 2020). Essa 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 física.

IV.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 da figura 10 traz uma representação simplificada do que ocorre no Efeito Fotoelétrico: um raio de luz colide com uma placa de metal, que emite um elétron, sendo acompanhado de um texto que define o fenômeno e revela sua discrepância em relação à física clássica.



Figura 10: Efeito fotoelétrico.



Figura 11: Albert Einstein.

Figuras 10 e 11: Efeito fotoelétrico e Albert Einstein.

Numa interpretação clássica, o fenômeno ocorria porque os elétrons deveriam estar adquirindo energia dos feixes de luz incidindo no metal, indicando que, com uma iluminação mais intensa, 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, e ainda foi descoberto uma frequência limiar, um limite abaixo do qual não ocorria mais a emissão de elétrons, independentemente da intensidade da luz (MCEVOY e ZARATE, 2012, p. 46).

O físico alemão Albert Einstein é apresentado nesse trecho da história (figura 11) como uma das principais figuras no desenvolvimento da Teoria Quântica, uma vez que generalizou o conceito de quantização, de Planck, para toda a radiação eletromagnética, propondo que um raio luminoso fosse considerado como uma rajada de partículas, mais tarde denominadas fótons (DIONÍSIO, 2005, p. 155). Essa solução apresentada por Einstein 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 cunhar o termo⁶.

A figura 12 ilustra relação da frequência da onda eletromagnética com sua energia, indispensável para explicar a ideia de quantização de Einstein. Como a HQ não é colorida, é necessária a intervenção do professor para elucidar adequadamente a relação das cores com a frequência ou a energia das ondas eletromagnéticas.

Os quadros seguintes (figura 13) trazem, na fala do personagem, um resumo do raciocínio de Einstein para explicar o fenômeno, relacionando a energia do elétron com a frequência da luz, e não com sua intensidade (DIONÍSIO, 2004, p. 11).

Albert Einstein recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1921⁷ por seus serviços em Física

⁶Einstein 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.

⁷No 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,

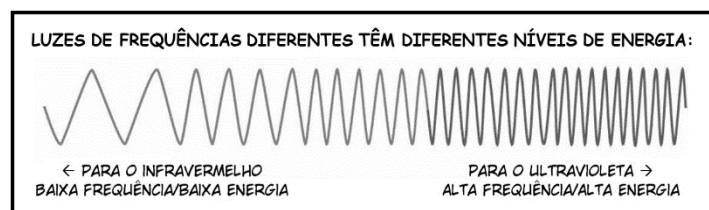


Figura 12: Frequência das cores.



Figura 13: Frequência das cores.

Teórica, e especialmente por sua descoberta da lei do Efeito Fotoelétrico (THE NOBEL PRIZE, 2020). Como mencionado anteriormente, esse tipo de informação visa demonstrar a importância da descoberta para o desenvolvimento da Teoria Quântica.

IV.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 feixe luminoso passa através de um prisma, revelando um padrão de linhas coloridas e brilhantes, que se diferem de acordo com o material que produz a luz (McEVOY e ZARATE, 2012, p. 60). A figura 14 mostra o título da seção, uma breve definição do fenômeno e uma imagem reproduzindo as raias espectrais de absorção de duas fontes diferentes, sendo que tal representação se torna vazia de significado sem a intervenção 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 de sua prática, para enriquecer e complementar suas aulas.

Historicamente, para explicar o fenômeno foi necessário entender mais sobre o átomo, cujo conceito ainda guardava diferentes possibilidades, conforme ilustrado na figura 15. Cada quadro dessa figura mostra os principais modelos atômicos, a título de ilustração, tendo o feito em 1923.

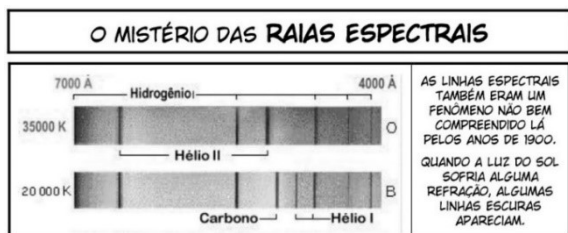


Figura 14: Raias espectrais.

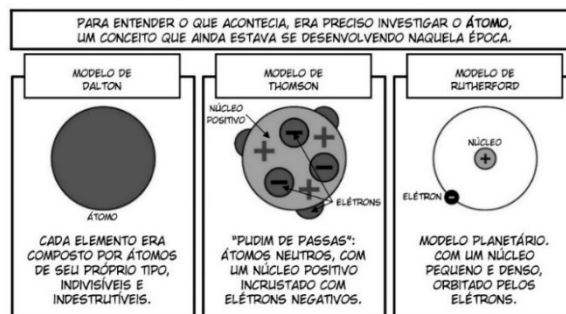


Figura 15: Modelos atômicos.

Figuras 14 e 15: Raias espectrais e modelos atômicos.



Figura 16: Niels Bohr.

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. 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 e 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. A pesquisa sobre o átomo e suas características estava se desenvolvendo, e o físico dinamarquês Niels Bohr foi o responsável pela próxima grande proposta. Para resolver problemas conceituais com o átomo de Rutherford⁸, Bohr então resolveu aplicar as ideias de Planck para este modelo atômico (PESSOA Jr., 2006, p. 92), como mostra a figura 16.

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).

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.

⁸O problema de cargas elétricas aceleradas (os elétrons supostamente girando em torno do núcleo atômico), que irradiariam energia e colapsariam no núcleo.

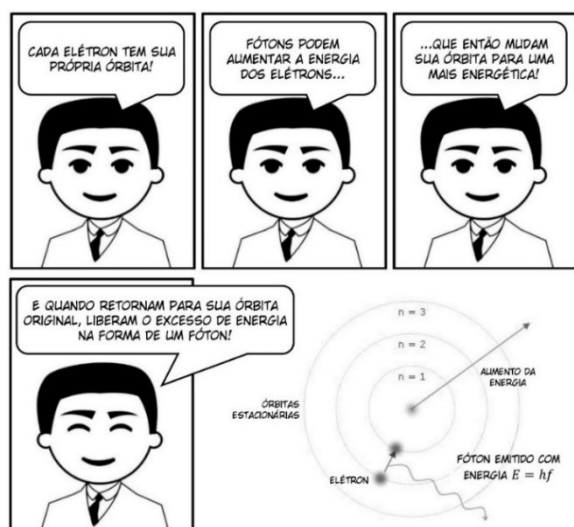


Figura 17: Orbitais quantizados.



Figura 18: Salto quântico.

Figuras 17 e 18: Orbitais quantizados e Salto quântico.

Além de elucidar o comportamento dos elétrons e das suas órbitas no átomo de hidrogênio, essa proposta estabeleceu o fenômeno da quantização na estrutura atômica, e foi fundamental para explicar as raias espectrais. McEvoy e Zarate 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 (2012, p. 89). A figura 18 reflete, através de texto e de um gráfico, a concepção de Bohr para as raias espectrais. Como a representação gráfica dessa figura também trata de cores, cabe ao professor a tarefa de elucidá-la aos alunos. O reconhecimento das contribuições de Bohr por seus serviços na investigação da estrutura dos átomos e da radiação que emanam (THE NOBEL PRIZE, 2020) veio com o Prêmio Nobel de Física de 1922, como referenciado na figura 18.

IV.5. SEÇÃO V - A DESCOBERTA DAS ONDAS DE MATÉRIA

A existência das ondas de matéria foi sugerida por Louis de Broglie em 1924, quando ele propôs estender a ideia de dualidade, atribuindo características ondulatórias (frequência e comprimento de onda) também para micropartículas, como elétrons. Suas hipóteses foram confirmadas em 1927 com a descoberta da difração de elétrons.

À pergunta o que é a Teoria Quântica?, Pessoa Jr. respondeu também que, em poucas 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 da radiação 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).

O texto da figura 19 indica que a natureza ondulatória da luz foi verificada pelo físico inglês Thomas Young através da experiência da fenda dupla. Thomas Young observou franjas de interferência para a luz que passava por duas fendas finas, e explicou esse padrão

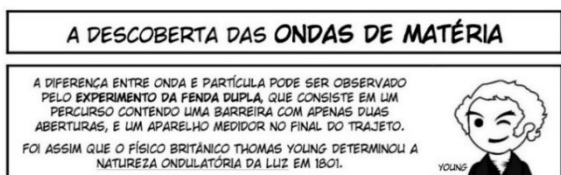


Figura 19: Natureza ondulatória da luz.



Figura 20: Comportamento esperado por partículas e Padrão de interferência ondulatória.

Figuras 19 e 20: Natureza ondulatória da luz e Padrão de interferência ondulatória.

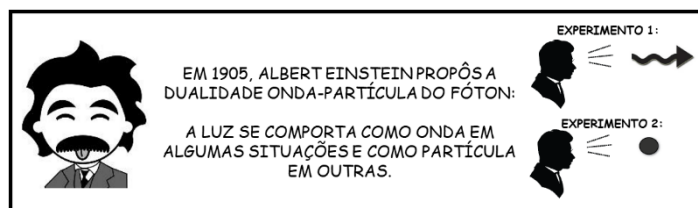


Figura 21: Dualidade onda-partícula.

luminoso com a hipótese de que a luz é na realidade uma onda (PESSOA Jr., 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.

Através do experimento da fenda dupla, a demonstração de Young do padrão de interferência obtido, com linhas claras e escuras alternadas, foi considerada uma evidência que atestava que a luz tinha uma natureza ondulatória (McEVOY e ZARATE, 2012, p. 107). Os quadrinhos da figura 20 ilustram as diferenças entre partículas e ondas no experimento das duas fendas, e novamente a interpretação das imagens requer o auxílio do professor como mediador no processo. O professor deve evidenciar que, apesar de o comportamento clássico de partículas prever o padrão à esquerda do quadrinho 20, o que de fato foi constatado, no caso da luz, foi o padrão de interferência à direita. O professor pode voltar a esse ponto quando falar sobre as ondas de matéria propriamente ditas, no caso dos elétrons, conforme a sequência da HQ.

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, mostrando Einstein e o comportamento dual, representado pelas duas situações à direita da figura, ou seja, a depender do experimento realizado, podemos constatar um comportamento ondulatório ou corpuscular para a luz.

De maneira 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 (Pessoa Jr., 2006, p. 93).

Matematicamente, de Broglie utilizou a equação de Einstein para a relatividade, relaci-



Figura 22: Dualidade onda-partícula.

onada à equação de quantização de Planck/Einstein (McEVOY e ZARATE, 2012, p. 114). A conclusão do desenvolvimento matemático da proposta de de Broglie, assim como uma interpretação mais conceitual, são apresentadas na figura 23. A fala do personagem traduz, de forma sucinta, o que o físico francês pretendia expor com suas deduções. de Broglie atribuía realidade física às suas ondas, as 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).

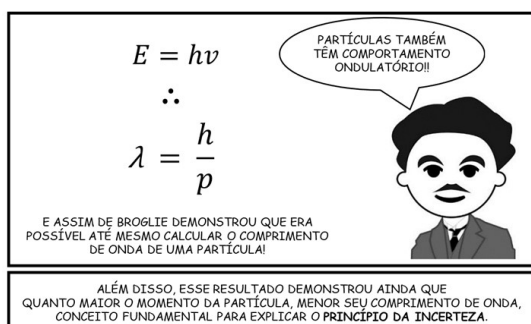


Figura 23: Comprimento de onda de uma partícula.



Figura 24: Padrão de interferência dos elétrons.

Figuras 23 e 24: Comprimento de onda de uma partícula e Padrão de interferência dos elétrons.

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, conforme ilustrado na figura 24. Também foi referenciado nessa figura o Prêmio Nobel de Física de 1929, recebido por Louis de Broglie por sua descoberta da natureza ondulatória dos elétrons (THE NOBEL PRIZE, 2020).

IV.6. SEÇÃO VI - FIM DA CERTEZA, PRINCÍPIO DA INCERTEZA

A física clássica descreve com clareza tanto a posição quanto a velocidade de um corpo em um determinado momento no tempo, permitindo uma medição conjunta dessas

grandezas. 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). A sequência de quadrinhos da figura 25 mostra, além do título da seção e do texto introdutório, o personagem de Heisenberg começando a desenvolver sua ideia.



Figura 25: Fim da certeza, princípio da incerteza.



Figura 26: Medição de partículas.

Figuras 25 e 26: Fim da certeza, princípio da incerteza e Medição de partículas.

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 se tenta 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 26 traz uma sequência de quadrinhos com o personagem de Heisenberg expondo um resumo da sua alegação sobre as medições na escala atômica, e também um gráfico que ilustra a situação. Os conceitos envolvidos, e também uma forma equacionada do princípio da incerteza, são apresentados na figura 27. Novamente, todos os gráficos e equações apresentados nessa seção, assim como todos os demais que aparecem na HQ, vão necessariamente requerer a mediação do professor de física.

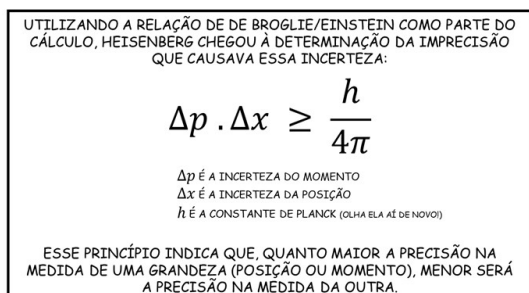


Figura 27: Princípio da incerteza.



Figura 28: Comportamento dual.

Figuras 25 e 26: Princípio da incerteza e Comportamento dual.

Um importante desdobramento dos efeitos da incerteza é apresentado na figura 28, que mostra o personagem apontando que comportamentos distintos (onda e partícula) para uma partícula são detectados em experimentos diferentes.

Maior ainda foi a contribuição de Heisenberg para o desenvolvimento da Teoria Quântica em aspectos matemáticos que fogem do escopo desse trabalho, devido ao nível de aprofundamento necessário na sua abordagem. Heisenberg é um dos principais nomes na estruturação matemática 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 alotrópicas de hidrogênio (THE NOBEL PRIZE, 2020), homenagem mencionada no último quadrinho da figura 30.

IV.7. SEÇÃO VII - A APOSTA NA PROBABILIDADE

O físico austríaco Erwin Schrödinger, após contribuições de Bohr e de Broglie, propôs uma nova representação para o átomo, descrevendo-o matematicamente com uma equação de onda (McEVOY e ZARATE, 2012, p. 117), 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, conforme percebido pelo físico alemão Max Born⁹ (SEGRÈ, 1987).

Além do título da seção, a equação, juntamente com um texto introdutório e o personagem de Schrödinger, são apresentados nas figuras 29 e 30.

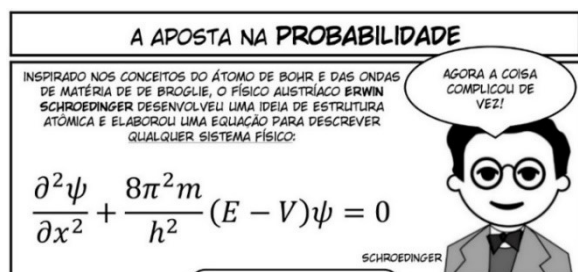


Figura 29: Princípio da incerteza.



Figura 30: Comportamento dual.

Figuras 29 e 30: A aposta na probabilidade e Função de onda.

⁹Matematicamente, é o quadrado do módulo da função de onda que denota a densidade de probabilidade.

A própria forma da equação provoca a fala do personagem de Schrödinger, como exposta na figura 29, que reflete a especificidade (e aridez) matemática do tratamento quantitativo da quântica. Para o leigo, uma dúzia de símbolos incompreensíveis dispostos segundo algum critério hermético (DIONÍSIO, 2004, p. 17). Sendo assim, como a HQ é destinada ao Ensino Médio, foi imperativo escolher os elementos essenciais do conceito para apresentar na história, como é elaborado nos quadrinhos apresentados nas figuras 31 e 32. A apresentação da equação na HQ busca apenas ilustrar que existem elementos mais específicos, e que serão estudados por quem se dedicar ao tema.



Figura 31: Probabilidade.

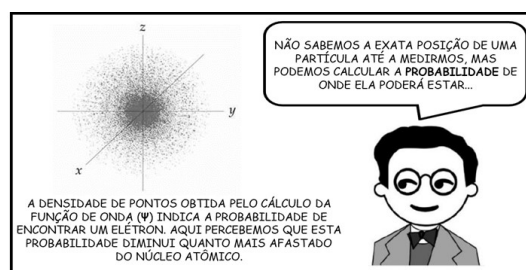


Figura 32: Densidade de probabilidade.

Figuras 31 e 32: Probabilidade e Densidade de probabilidade.

O princípio da incerteza de Heisenberg é retomado na sequência de falas do personagem (figura 31), seguido da interpretação da probabilidade da função de onda, apresentada da forma sintética inerente ao formato da HQ. O quadrinho seguinte repete a ideia com o apoio de um gráfico, como mostrado na figura 32.

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 33 traz alguns dos gráficos que foram gerados a partir da função de onda, ilustrando a nuvem de probabilidade dos orbitais atômicos.

Juntamente com Paul Dirac, Erwin Schrödinger recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1933 pela descoberta de novas formas produtivas da teoria atômica (THE NOBEL PRIZE, 2020), referido no último quadro da seção (figura 33).

IV.8. SEÇÃO VIII - ELEMENTOS FINAIS

A História em Quadrinhos sobre tópicos da Física Quântica encerra com um quadro (figura 34) lembrando que muitos outros cientistas, que não foram citados devido ao espaço sucinto e limitado do formato escolhido, foram responsáveis pelo desenvolvimento da

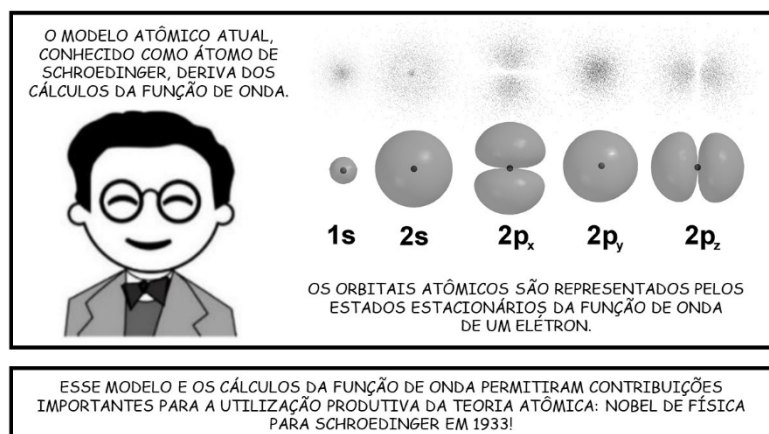


Figura 33: Átomo de Schrödinger.

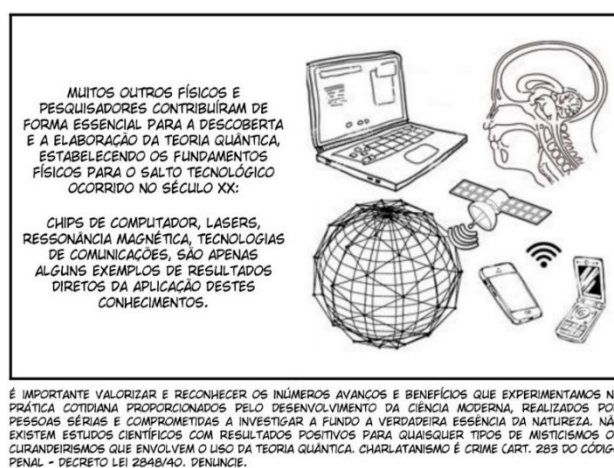


Figura 34: Alguns frutos da teoria quântica.

teoria. O texto do quadro também apresenta algumas consequências práticas dos conceitos da Teoria Quântica, acompanhado de ilustrações a respeito.

Das ideias desenvolvidas por Planck, Einstein, Bohr, de Broglie, Dirac, Heisenberg, 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 todos elementos 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 e ALVES, 2005) e merecem portanto a devida atenção dos professores, para permitir ao aluno uma melhor compreensão do mundo que o cerca.

Finalmente, o texto do último quadro da HQ (figura 34) enfatiza a importância do desenvolvimento científico, nos avanços reais na tecnologia e no cotidiano das pessoas,

e também retoma a advertência inicial sobre o mau uso das interpretações da quântica. Praticamente toda a proposta da HQ se concentra no que a quântica efetivamente estuda. 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).

V. UTILIZAÇÃO DA HQ POR PROFESSORES DO ENSINO MÉDIO

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 inicial mais objetiva do material produzido, analisamos, de forma qualitativa, as potencialidades da HQ em relação à sua possível implementação em sala de aula, na visão de professores de física.

Para coletar o parecer dos professores, 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 possíveis 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 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 1. Esses professores foram previamente selecionados por sua intenção de colaborar com a pesquisa.

Sujeito	Atuação	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

Tabela 1: Professores de física participantes.

Verificamos que 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: 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 ateste que não utiliza esse meio como material didático, em geral consideram que as histórias em quadrinhos são um recurso interessante para a

utilização em sala de aula. Conforme dois professores:

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 HQs ajuda, inclusive, a desmistificar a ideia 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 enfatizaram 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).

É possível perceber a importância dada pelos professores à utilização de materiais variados em sala de aula, e que as histórias em quadrinhos podem fazer parte do rol de recursos a serem empregados durante as aulas, desde que disponíveis e de forma complementar. No entanto, pensamos que 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 diferentes perfis de aprendizagem.

Em relação ao conteúdo da HQ produzida, 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. 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).

Sobre as equações presentes na HQ, 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: algumas delas podem ser compreendidas, entretanto outras, como a função de onda, não vão representar nada ao estudante, podendo não alcançar o objetivo esperado.

Pensamos que ao abordar a Física Quântica em qualquer meio é preciso fazer uma adequação do conteúdo utilizado ao mesmo, muitas vezes com omissões que o torna insuficiente por si só, mas que poderá ser complementado com o trabalho do professor. Quando perguntados sobre os tópicos abordados no 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, e que a função de onda e distribuição de probabilidade me parecem bem difíceis de abordar nessa linguagem.

O material produzido inicialmente pretendia também 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).

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 trabalhos que indicam a necessidade de divulgar para a sociedade o caráter nocivo da abordagem pseudocientífica da Física Quântica, conforme justificado em nossa fundamentação.

Houve sugestões em relação à 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. De todo modo, consideramos essas colocações como bastante importantes para a otimização do material. Certamente serão de valia para uma segunda versão da HQ e para um efetivo uso no Ensino Médio.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O retorno dos professores em relação ao material produzido revelou que é possível utilizar as Histórias em Quadrinhos como material didático, reconhecendo suas potencialidades e limitações, como forma de linguagem atrativa, informal e prazerosa, com poder lúdico e capaz de chamar a atenção dos alunos. Naturalmente, vemos o uso desse material como um complemento às aulas de física, com ênfase ao papel basilar do professor no processo educativo. Variar a prática do professor através do uso de uma HQ, como a proposta neste trabalho, pode contribuir para produzir uma modificação positiva no cotidiano em sala de aula, tanto na transmissão do conhecimento abordado quanto na relação entre professor, aluno e material didático.

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. Naturalmente não pretendemos sugerir que devemos arrefecer nossas preocupações com a rigorosidade dos materiais didáticos, mas propomos que, principalmente em se tratando de educação básica, essa rigorosidade em relação aos conteúdos trabalhados possa ser também complementada por materiais do tipo que propomos nesse trabalho.

Diante do retorno dos professores, pretendemos reformular o material e implementá-lo em aulas de física, para que o mesmo possa representar uma opção a mais para o professor complementar as suas aulas.

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. 2017.
- ANDRADE, R. R. D.; NASCIMENTO, R. S.; GERMANO, M. G. Influências da física moderna na obra de Salvador Dalí. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 24, n. 3, 2007.
- CARUSO, F.; FREITAS, N. Física moderna no Ensino Médio: o espaço-tempo de Einstein em tirinhas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 26, n. 2, p. 355-366, ago. 2009.
- CARVALHO NETO, R. A.; FREIRE JÚNIOR, O.; SILVA, J. L. P. B. Improving students meaningful learning on the predictive nature of quantum mechanics. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 14, n. 1, 2009.
- CHESMAN, C.; ANDRÉ, C.; MACÊDO, A. *Física moderna: experimental e aplicada*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.
- COSTA, R. R. D.; NASCIMENTO, R. S.; GERMANO, M. G. Salvador Dalí e a mecânica quântica. *A física na escola*, v. 8, n. 2, 2007.
- CRUZ, F. F. S.; CRUZ, S. M. S. Pode o ambiente cultural e social definir o conteúdo escolar de física: o caso da mecânica quântica. In: *VII ENPEC, Encontro Nacional em Pesquisa em Educação em Ciências, Florianópolis*, 2009. Atas [...]. Florianópolis: UFSC, 2009.
- CUSTÓDIO PINTO, A.; ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio? *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 16, n. 1, p. 7-34, abr. 1999.
- DIONÍSIO, P. H. Albert Einstein e a Física Quântica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 22, n. 2, p. 147-164, ago. 2005.
- DIONÍSIO, P. H. Física Quântica: da sua pré-história à discussão sobre o seu conteúdo essencial. *Cadernos IHU Ideias*, ano 2, n. 22, 2004.
- FEITOSA, S. S.; ARAÚJO, K. M. G.; SILVA, M. S.; NOBRE, F. A. S. Uma sequência didática utilizando a literatura de cordel e a arte das histórias em quadrinhos para inserção de tópicos de Física Quântica no Ensino Médio. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 37, n. 2, p. 662-694, ago. 2020.
- HAWKING, S. *O universo numa casca de noz*. São Paulo: Arx, 2002.
- JORGE, L.; PEDUZZI, L. 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, M. Ciência e pseudociência. *A Física na Escola*, v. 9, n. 1, p. 6-9, 2008.
- MACHADO, S. S. L.; CRUZ, F. F. S. A Teoria Quântica e a apropriação do conhecimento científico: o uso da história e filosofia da ciência pelos misticismos. *Anais eletrônicos do 15º Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia*, Florianópolis, nov. 2016.
- MAIA, N. B. *O caminho para a Física Quântica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2009.
- McCLOUD, S. *Desenhando quadrinhos*. São Paulo: M. Books, 2008.
- McCLOUD, S. *Desvendando os quadrinhos*. São Paulo: M. Books, 2005.
- McEVOY, J. P.; ZARATE, O. *Entendendo Teoria Quântica: um guia ilustrado*. São Paulo: Leya, 2012.
- MONTEIRO, M. A.; NARDI, R.; BASTOS FILHO, J. B. A sistemática incompreensão da teoria

- quântica e as dificuldades dos professores na introdução da física moderna e contemporânea no ensino médio. *Ciência & Educação*, v. 15, n. 3, p. 557-580, 2009.
- MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa crítica. In: *III Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa*, Lisboa, p. 33-45, 2000.
- OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H.; PRADO, S. D.; RICCI, T. S. F. Fundamentos da física quântica à luz de um interferômetro de Mach-Zehnder. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 8, n. 3, 2009.
- OSTERMANN, F.; PEREIRA, A. P. Introduzindo conceitos de física quântica no ensino médio a partir de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. In: *XVIII Simpósio Nacional de Ensino de Física*, Vitória, ES, 2009.
- PAULA, H. F.; ALVES, E. G.; MATEUS, A. L. *Quântica para iniciantes: investigações e projetos*. Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- PAULO, I. J. C.; MOREIRA, M. A. O problema da linguagem e o ensino da mecânica quântica no nível médio. *Ciência & Educação*, v. 17, n. 2, p. 421-434, 2011.
- PAULO, I. J. C.; MOREIRA, M. A. Abordando conceitos fundamentais da mecânica quântica no nível médio. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 4, n. 2, 2004.
- PEDUZZI, L. O. Q.; BASSO, A. C. Para o ensino do átomo de Bohr no nível médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 4, p. 545 - 557, 2005.
- PESSOA Jr., O. 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.
- SAGAN, C. *O mundo assombrado pelos demônios*. São Paulo: Companhia da Letras, 2009.
- SALES, G. L.; VASCONCELOS, F. H. L.; CASTRO FILHO, J. A.; PEQUENO, M. C. Atividades de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 3, 3501, 2008.
- SANTOS NETO, E.; SILVA, M. R. P. *Histórias em quadrinhos e práticas educacionais: o trabalho com universos ficcionais e fanzines*. São Paulo: Criativo, 2013.
- SEGRÈ, E. *Dos Raios X aos Quarks: físicos modernos e suas descobertas*. Brasília: Universidade de Brasília, 1987.
- SILVA, A. C.; ALMEIDA, M. J. P. M. Física quântica no ensino médio: o que dizem as pesquisas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, n. 3: p. 624-652, dez. 2011.
- STUDART, N. Um novo projeto da SBF: física para o Brasil pensando o futuro do ensino de física no País. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 25, n. 3, sept. 2003.
- TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez. 1992.
- THE NOBEL PRIZE. *All Nobel Prizes in Physics*. Disponível em: <<https://www.nobel-prize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes-in-physics>>. Acesso em: 23 ago. 2020.
- VALADARES, E. C.; CHAVES, A.; ALVES, E. G. *Aplicações da Física Quântica: do transistor à nanotecnologia*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.
- VERGUEIRO, W.; RAMOS, P. *Quadrinhos na educação: da rejeição à prática*. São Paulo: Contexto, 2009.