

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE
FÍSICA
MNPEF – POLO 36 - UFAL

ALBERI LOPES DE LIMA

UMA PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DE UM TEXTO PARADIDÁTICO NO ENSINO
DE FÍSICA SOBRE O NASCIMENTO DA TEORIA QUÂNTICA

MACEIÓ
2017

ALBERI LOPES DE LIMA

**UMA PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DE UM TEXTO PARADIDÁTICO NO ENSINO
DE FÍSICA SOBRE O NASCIMENTO DA TEORIA QUÂNTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF – POLO 36 - UFAL como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Jenner Barretto Bastos Filho

MACEIÓ

2017

Catlogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecário Responsável: Janis Christine Angelina Cavalcante

L732p Lima, Alberi Lopes de.
Uma proposta de utilização de um texto paradidático no ensino de física sobre o nascimento da física quântica / Alberi Lopes de Lima. – 2017.
83f. : il.

Orientador: Jenner Barretto Bastos Filho.
Dissertação (Mestrado Profissional em Física) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Física. Programa de Pós Graduação de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, 2017.

Bibliografia: f. 42-46.
Apêndices: f. 47-83.

1. Física - ensino. 2. Educação. 3. Processo de ensino-aprendizagem.
4. Material Complementar para leitura - Texto. 5. Física quântica- fundamentos.
I. Título.

CDU: 53:372



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE FÍSICA
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – Polo 36 - UFAL
Campus A. C. Simões - Av. Lourival de Melo Mota, S/Nº.
Tabuleiro dos Martins - 57.072-970 - Maceió - AL - Brasil
Tels.: Direção: (82) 3214-1645; Coordenação Graduação: (82) 3214.1421;
Coordenação Pós-Graduação: (82) 3214-1423 / 3214 – 1267



**PARECER DA BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**“Uma Proposta de Utilização de um Texto Paradidático no
Ensino de Física sobre o Nascimento da Teoria Quântica”.**

por

Alberi Lopes de Lima

A Banca Examinadora composta pelos professores, Dr. Jenner Barretto Bastos Filho (orientador), do Instituto de Física da Universidade Federal de Alagoas, Dr. Elton Malta Nascimento, do Instituto de Física da Universidade Federal de Alagoas e Dr^a Hilda Helena Sovierzoski, do Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal de Alagoas, consideram o candidato **aprovado**.

Maceió, 22 de setembro de 2017.


Prof. Dr. Jenner Barretto Bastos Filho


Prof. Dr. Elton Malta Nascimento


Prof. Dr^a. Hilda Helena Sovierzoski

Dedico este trabalho aos meus pais, aos meus irmãos, à minha esposa, Sabrina, e a meus filhos, Renato, Vinícius e Yasmin.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a **Deus Pai Todo-Poderoso**, que nos concede a graça da vida.

Agradeço à minha esposa, Sabrina, e a meus filhos, Renato, Vinícius e Yasmin, à minha mãe, meu pai e meus irmãos, que sempre me apoiaram em meus sonhos e conquistas.

Gostaria também de tornar pública minha gratidão aos professores do Programa de Pós-graduação em rede coordenado pela Sociedade Brasileira de Física (SBF) e denominado Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) do qual constituímos o Polo 36 - UFAL, em especial ao Professor **Jenner Barretto Bastos Filho**, pela excelente orientação por ocasião da elaboração desta dissertação.

Gostaria também de destacar minha gratidão aos seguintes professores **Pedro Valentim dos Santos, Samuel Silva de Albuquerque, Elton Malta Nascimento, Iram Marcelo Gléria, Kleber Cavalcanti Serra, Wandearley da Silva Dias** e **Antonio José Ornellas Farias**, que não só ministraram aulas de qualidade, mas me apoiaram e fizeram parte da minha história de desenvolvimento ao longo do curso de mestrado.

Agradeço também aos funcionários da Universidade Federal de Alagoas, em especial à Secretária **Valdjane Gomes Matias**, sempre atenta, competente e cordial.

Gostaria de agradecer aos meus colegas de curso que, ao longo de todo o curso, demonstraram companheirismo e solidariedade em um convívio fraterno e sadio.

Finalmente, agradeço aos inúmeros amigos que me ajudaram nesta caminhada seja com seu apoio, sua torcida ou por terem incluído meu nome em suas orações. Sei que são muitos e esta página não comportaria tantos nomes. Mas, desejo deixar a todos o meu **MUITO OBRIGADO!**

*“Penso noventa e nove vezes e nada descubro;
deixo de pensar, mergulho em profundo silêncio e
eis que a verdade se me revela.”*

Albert Einstein (1879-1955)

RESUMO

A presente pesquisa traz como questão central a seguinte situação-problema: a utilização de um texto de apoio (paradidático) suplementa ou complementa o trabalho do professor? Em torno dessa questão, discutimos também outros aspectos, como: qual a percepção do aluno sobre o papel do recurso didático utilizado e como avaliar o impacto do uso do recurso no incentivo do aluno pela leitura e pela Física. O objetivo geral da presente pesquisa foi analisar a importância da utilização de um elemento provedor de aprendizagem (paradidático) no processo educacional em Física. Como objetivos específicos, pretendemos analisar a percepção do aluno sobre o uso do recurso didático, compreender se esse uso suplementa ou complementa o papel do professor no processo de ensino-aprendizagem e identificar os aspectos motivacionais envolvidos na interação aluno-paradidático. Neste trabalho de pesquisa, foram entrevistados 10 professores de Física de escolas da rede pública estadual de Pernambuco. Esta pesquisa foi realizada de maio a junho de 2017 em escolas pertencentes à rede pública do estado de Pernambuco. Entre as perguntas formuladas, destacam-se questionamentos sobre a opinião dos professores acerca da utilização de textos paradidáticos no processo de ensino-aprendizagem de Física e sobre a maneira pela qual os alunos respondem ao uso do paradidático. Em seguida, trabalhamos em sala de aula um texto paradidático versando sobre fundamentos de Física Quântica. Uma vez concluído, analisamos como a utilização do mesmo influenciou no processo ensino-aprendizagem. Diante das pesquisas realizadas e da prática vivenciada com o texto paradidático utilizado, foi possível concluir que o seu uso tanto complementa como suplementa o trabalho do professor. Sendo assim, fica evidenciada em nossa pesquisa que a utilização do paradidático é uma importante parte no processo de ensino-aprendizagem.

Palavras-chave: Ensino de Física; Educação; Epistemologia do professor.

ABSTRACT

The present research has as central question the following problem situation: does the use of a supporting text supplement or complement the work of the teacher? Around this question, we also discuss other aspects, such as: what is the student's perception of the role of the didactic resource used and how to evaluate the impact of the use of the resource on the student's reading and physical stimulation. The general objective of this research is to analyze the importance of the use of a learning element in the teaching-learning process in Physics. As specific objectives, we intend to analyze the student's perception about the use of the didactic resource, to understand if this use supplements or complements the role of the teacher in the teaching-learning process and to identify the motivational aspects involved in the student-parent interaction. In this research, 10 physics teachers from public schools in the state of Pernambuco were interviewed. Among the questions asked, we highlight questions about teachers' opinions about the use of paradidate texts in the teaching-learning process of Physics and about how students respond to the use of the paradidate. Next, we work in the classroom a paradidate text on fundamentals of Quantum Physics. Once completed, we analyzed how the use of it influenced the teaching-learning process. In view of the possible to conclude that its use both complements and supplements the teacher's work. Thus, it is evident in our research that the use of the paradidate is an important part in the teaching-learning process.

Keywords: Physics Teaching; Education; Teacher's epistemology.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
1. O LÚDICO COMO ELEMENTO PROVEDOR DO APRENDIZADO	16
1.1 A IMPORTÂNCIA DO LÚDICO NA EDUCAÇÃO	16
1.2 AS LINGUAGENS LÚDICAS EM SALA DE AULA: HISTÓRIAS EM QUADRINHOS E PARADIDÁTICOS	19
2. RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
3. NOTAS SOBRE O PRODUTO EDUCACIONAL	28
3.1 SOBRE A MANTA QUÂNTICA	28
3.2 AS NUVENZINHAS DE LORD KELVIN	29
3.3 SOBRE O PAPEL DE PLANCK	30
3.4 SOBRE O PAPEL DE EINSTEIN	34
3.5 EINSTEIN ENFRENTOU UMA TEORIA RIVAL	35
3.6 SOBRE O PRINCÍPIO DA INCERTEZA. INCERTEZA? INDETERMINAÇÃO? DISPERSÃO?	36
3.7 SOBRE O PRINCÍPIO DA COMPLEMENTARIDADE	37
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
REFERÊNCIAS	42
APÊNDICE A	47
APÊNDICE B	50

INTRODUÇÃO

Desde a implantação da atual Lei de Diretrizes e Bases da Educação - LDB (BRASIL, 1996) um novo olhar se voltou para a Educação. Em seu artigo 36º, a LDB exige que, entre outras coisas, o currículo do Ensino Médio:

I - destacará a educação tecnológica básica, a compreensão do significado da ciência, das letras e das artes; o processo histórico de transformação da sociedade e da cultura; a língua portuguesa como instrumento de comunicação, acesso ao conhecimento e exercício da cidadania;

II - adotará metodologias de ensino e de avaliação que estimulem a iniciativa dos estudantes; [...].

A LDB afirma ainda, neste mesmo artigo, que os conteúdos, as metodologias e as formas de avaliação serão organizados de forma que, ao final do Ensino Médio, o educando demonstre, entre outros, o domínio dos princípios científicos e tecnológicos que presidem a produção moderna e o conhecimento das formas atuais de linguagem.

Nesse contexto, verifica-se a importância fundamental que se dá à linguagem, à comunicação e ao exercício da cidadania, independentemente da disciplina ministrada. Com relação a isso, muitas pesquisas em Educação têm dirigido sua atenção para o uso de diferentes linguagens associadas ao ensino-aprendizagem.

Rodrigues (2015, p. 247) lembra que as bases legais dos Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2000) comentam que a organização curricular do Ensino Médio deve ser orientada para reconhecer as linguagens como formas de constituição dos conhecimentos e das identidades, portanto, como o elemento-chave para constituir os significados, conceitos, relações, condutas e valores que a escola deseja transmitir. Esta linguagem pode ser a de algoritmos na Matemática e Física, a escrita, a verbal ou, ainda, a não verbal, por meio dos gestos e atitudes (RODRIGUES, *id.*).

Em relação ao uso das diferentes linguagens no ensino das Ciências Naturais, as Orientações Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+) (BRASIL, 2002, p. 24) afirmam que

O domínio de linguagens, para a representação e a comunicação científico-tecnológicas, é um campo comum a toda a ciência e a toda a tecnologia, com sua nomenclatura, seus símbolos e códigos, suas designações de grandezas e unidades, boa parte dos quais já incorporada à linguagem cotidiana moderna. A articulação dessa nomenclatura, desses códigos e símbolos em sentenças, diagramas, gráficos, esquemas e equações, a leitura e interpretação destas linguagens, seu uso em análises e sistematizações de sentido prático ou cultural, são construções

características dessa área de conhecimento, mas hoje integram um instrumental igualmente necessário para atividades econômicas e para o pensamento social (BRASIL, 2002, p. 24).

Esse documento ressalta a importância dos códigos e linguagens no estudo das Ciências da Natureza e Matemática. Desse modo, tem-se como um dos objetivos educacionais no Ensino Médio, a *Representação e comunicação*, o que nos motiva a associar a utilização de textos paradidáticos no desenvolvimento de códigos e linguagens para uma aprendizagem mais eficaz do educando.

Um problema que a comunidade dos professores e pesquisadores levanta de maneira reiterada e recorrente constitui-se no abismo entre, por um lado, o ensino presentemente lecionado nas escolas e que corresponde à ciência produzida durante os séculos XVII, XVIII e XIX e, por outro lado, a ciência produzida durante o século XX e isso sem se falar nas contribuições que já aparecem nessas quase duas décadas de século XXI.

De fato, e quase que exclusivamente, embora haja exceção, o conteúdo ministrado no Ensino Médio e até mesmo nos anos iniciais das licenciaturas e bacharelados das próprias ciências restringe-se quase que unicamente àquela Ciência que foi produzida nos séculos de XVII a XIX e mesmo assim, de uma maneira que peca por inadequação, para se dizer o mínimo.

Constatamos que o ensino habitual de Física no nível médio, em especial nas escolas públicas, ainda se restringe à Física Clássica. A Teoria Quântica não chega a ser ensinada na maioria das escolas. Assim, podemos perceber que há necessidade de diminuir esse abismo, apesar de que o conteúdo da Ciência do passado também seja respeitável e necessário de ser ensinado, mas devemos convir que precisamos nos referir à ciência presente, inclusive como requisito para que venhamos a compreender os tempos de agora, assim como as suas complexas relações intervenientes, inclusive, e talvez mesmo principalmente, aquelas relações exigidas para o pleno exercício da cidadania.

Tudo isso se constitui em recomendação presente na LDB tal como já fizemos alusão. Ela carrega várias diretrizes para que o nosso ensino passe de um nível de insuficiência, pelo baixo nível de questionamento crítico dos sujeitos que o praticam, e venha a atingir um patamar compatível com as esperadas autonomias intelectual e política por parte dos sujeitos envolvidos no processo, a fim de que se transformem em cidadãos a pleno título.

No que diz respeito à introdução da História e da Filosofia da Ciência no Ensino Médio, as considerações aqui feitas são semelhantes, guardando as devidas proporções. A comunidade que trabalha na área de pesquisa em Ensino de Ciências envida sérios esforços que possam significar passos à frente no Ensino de Física, bem como nos ensinamentos de outras ciências. Neste sentido, os pesquisadores conjecturam e experimentam quais sejam as situações de ensino que possam entrelaçar os conteúdos específicos com elementos históricos e epistemológicos de suas disciplinas específicas (BASTOS FILHO, 2011, 2012; PEDUZZI; MARTINS; HIDALGO FERREIRA, 2012; GATTI; NARDI, 2016).

Há trabalhos realizados por pesquisadores que oferecem excelentes peças didáticas que visam à união harmoniosa de requisitos baseados em conteúdos, inclusive de conteúdos da Ciência hodierna e de elementos de História e de Filosofia das Ciências (ver MOREIRA, 2011, 2016; CARUSO; OGURI; SANTORO, 2012). Mais recentemente, Bastos Filho (2017) apresentou no Rio de Janeiro, em um workshop organizado por Francisco Caruso para comemorar os 80 anos de idade de Roberto Moreira uma tese defendendo uma abordagem que seja centrada em reconstruções racionais com viés epistemológico.

Diante dessa situação, o tema abordado na presente dissertação está associado a preocupações referentes ao cotidiano da pesquisa e da prática pedagógica. Neste contexto, a presente pesquisa traz como questão central a seguinte situação-problema: a utilização de um texto de apoio (paradidático) suplementa ou complementa o trabalho do professor? Para efeito de conceituação, na presente dissertação, “complementar” significa acrescentar o que está insuficiente e “suplementar” significa acrescentar além do suficiente (LIMA, FONTES e SANTANA, 2017, p. 1). Em torno dessa questão, discutimos também outros aspectos, como: qual a percepção do aluno sobre o papel do recurso didático utilizado e como avaliar o impacto do uso do recurso no incentivo do aluno pela leitura e pela Física.

O objetivo geral da presente pesquisa foi analisar a importância da utilização de recursos de apoio (paradidático) no processo de ensino-aprendizagem em Física. Como objetivos específicos, pretendemos analisar a percepção do aluno sobre o uso do recurso didático, compreender se esse uso suplementa ou complementa o papel do professor no processo de ensino-aprendizagem e identificar os aspectos motivacionais envolvidos na interação aluno-paradidático.

O presente estudo de pesquisa fundamentou-se em uma pesquisa qualitativa e bibliográfica. De acordo com Gil (1991) a pesquisa quantitativa considera que tudo pode ser quantificável o que significa traduzir em números, opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Sendo assim requer o uso de técnicas estatísticas. Com a pesquisa quantitativa pretendemos traduzir em números, as opiniões e informações que foram classificadas e analisadas através de técnicas estatísticas. Dentro dessa perspectiva, Silva e Menezes (2001, p. 19) afirmam que:

A pesquisa quantitativa considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas (percentagem, média, moda, mediana, desvio-padrão, coeficiente de correlação, análise de regressão, etc.).

Já a pesquisa qualitativa visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito. Tal pesquisa, envolvendo levantamento bibliográfico; entrevistas com profissionais que tiveram experiências práticas com o referido problema pesquisado; permite realizar uma análise de exemplos que estimulam a compreensão.

A pesquisa qualitativa nos deu a possibilidade, através da sua forma descritiva, de aproveitarmos bem as informações obtidas que não podem ser quantificadas, ou seja, através de uma análise indutiva decodificamos os dados obtidos. Neste tipo de pesquisa, a interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são condições básicas, conforme argumentam Silva e Menezes (*ibid.*):

Na pesquisa qualitativa considera-se que há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, isto é, um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser traduzido em números. A interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são básicas no processo de pesquisa qualitativa. Não requer o uso de métodos e técnicas estatísticas. O ambiente natural é a fonte direta para coleta de dados, e o pesquisador é o instrumento-chave. É descritiva.

A pesquisa bibliográfica apareceu como suporte teórico ao universo pesquisado e foi realizada através da leitura de material já publicado (livros, periódicos, artigos científicos, revistas). Köche (1997, p. 122) afirma que

A pesquisa bibliográfica é a que se desenvolve tentando explicar um problema, utilizando o conhecimento disponível a partir das teorias publicadas em livros, ou obras congêneres. Na pesquisa bibliográfica o investigador irá levantar o conhecimento disponível na área, identificando as teorias produzidas, analisando-as e avaliando sua contribuição para auxiliar a compreender ou explicar o problema objeto da investigação. O objetivo da pesquisa bibliográfica, portanto é o de conhecer e analisar as principais

contribuições teóricas existentes sobre um determinado tema ou problema, tornando-se um instrumento indispensável para qualquer tipo de pesquisa.

Neste trabalho de pesquisa, foram entrevistados 10 professores de Física de escolas da rede pública estadual de Pernambuco.

A entrevista aplicada aos professores encontra-se no Apêndice A da presente dissertação. Entre as perguntas, destacam-se questionamentos sobre a opinião dos professores acerca da utilização de textos paradidáticos no processo de ensino-aprendizagem de Física (pergunta 1) e sobre como os alunos respondem ao uso do paradidático (pergunta 5).

Na entrevista, investigou-se também como é desenvolvido pelos docentes o uso do paradidático em sala de aula (pergunta 4).

Finalmente, foi deixado um espaço nas entrevistas para que os professores pudessem descrever mais à vontade sua experiência sobre situações de aprendizagem por eles vivenciadas em seu trabalho com a utilização do paradidático.

Em seguida, trabalhamos em sala de aula um texto paradidático (Apêndice B) versando sobre fundamentos de Física Quântica. Uma vez concluído o estudo do texto, analisamos como a utilização do mesmo influenciou no processo ensino-aprendizagem. Buscamos respostas para a seguinte pergunta: a utilização de um texto de apoio (paradidático) suplementa ou complementa o trabalho do professor? Em torno dessa questão, discutimos também outros aspectos, como: qual a percepção do aluno sobre o papel do recurso didático utilizado e como avaliar o impacto do uso do elemento provedor de aprendizagem no incentivo do aluno pela leitura e pela Física.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: a presente introdução, na qual destacamos a necessidade de utilização de recursos pedagógicos que estimulem a leitura e a compreensão do mundo a partir dela, e, após a mesma, o desenvolvimento da dissertação em quatro capítulos. No primeiro deles, fazemos uma breve motivação teórica sobre diversas utilizações de diferentes linguagens no ensino e, particularmente, no Ensino de Física. No segundo, apresentamos resultados e discussões acerca de entrevista realizada com professores da rede pública do Estado de Pernambuco sobre suas percepções sobre o trabalho com textos paradidáticos. No terceiro, apresentamos algumas notas sobre o Produto

Educacional que desenvolvemos. Finalmente, no quarto apresentamos nossas considerações finais e perspectivas futuras.

1. O LÚDICO COMO ELEMENTO PROVIDOR DO APRENDIZADO

1.1 A importância do lúdico na educação

Sobre a importância do lúdico na educação muito já se falou. Pode-se mesmo dizer que não é nova essa discussão. Há algumas décadas, pesquisadores como Kishimoto (1992, 2003, 2011), Wajskop (1995), Freire (2002) e Crepaldi (2010) têm se debruçado sobre o tema. No entanto, pode-se perceber que não é uma tarefa fácil elucidar, como esclarece Lima (2016), o conceito formal de lúdico. Diversos teóricos, porém, oferecem suas concepções. Jacques Henriot, por exemplo, considera que “o brincar constitui um fato social e refere-se à determinada imagem de criança e brincadeira de uma comunidade ou grupo de pessoas específicas” (*apud* WAJSKOP, 1994, p. 65). Desse modo, compreende-se que a noção de lúdico está relacionada a uma atitude mental ligada diretamente a uma linguagem que toma como base a atribuição de significados dados aos objetos e à linguagem, diferentes daqueles expressos formalmente.

Nessa mesma visão, conforme cita Wajskop (1995, p. 65-66), "Brougère afirma que, as concepções da filosofia da educação, da pedagogia e ciências afins, foram importantes para tirar da relação entre brincar e educação a ideia de algo frívolo ou gratuito".

Pode-se observar ainda que, nos tempos atuais, na maior parte das sociedades, a prática do lúdico se “constitui numa prática cultural típica da infância, mesmo se for considerado o caso no qual algumas destas sociedades ainda convivem com o problema do trabalho infantil” (LIMA; VIRÃES, 2016, p. 2).

Desse modo, não se pode negar à criança e ao adolescente uma aprendizagem que vivencie o lúdico. Através dessa prática, o jovem descobre a si mesmo, torna-se capaz de compreender a realidade e de desenvolver seu potencial criativo. Por isso, a maioria dos grupos sociais entende o lúdico como atividade essencial ao desenvolvimento da criança.

Porém, cumpre destacar que, segundo Wajskop (1995, p. 63): “a concepção de Educação da criança que a vincula a uma determinada forma de brincar tem origem nas concepções românticas de homem e Educação”, sendo assim algo

capaz de distinguir adultos e crianças como categorias sociais associadas a diferentes direitos e deveres.

Uma prática lúdica que tem sido muito utilizada atualmente pelos professores é a adoção de jogos educativos. Esses jogos são estimulantes para o aprendizado, ao mesmo tempo em que deixam os estudantes mais á vontade para compreender determinados aspectos do conteúdo que se pretende abordar. Nesse ponto, é importante destacar o que afirma Lima (2016):

Com o advento do Renascimento, passou-se a utilizar o jogo na divulgação de princípios de moral e ética e de transmissão de conteúdos escolares, como história, geografia, etc. Assim, a brincadeira passou a ser vista como uma conduta livre que tanto favorece o desenvolvimento da inteligência como serve como facilitadora do estudo. Nessa linha concordam Quintiliano, Erasmo, Rabelais e Baesow. O Renascimento enxerga o jogo como algo positivo, um meio pelo qual a criança pode naturalmente se expressar com toda espontaneidade (LIMA, 2016, p. 22).

Logo, se percebe que essa prática já vem sendo utilizada por educadores há bastante tempo. Porém, deve-se destacar seu avanço quando, já no século XIX, ganhou certo respaldo com o surgimento da Psicologia da criança, com uma forte influência da Biologia. Quanto a esse tema, Lima (2016) esclarece que:

Como teoria emergente, surge a de Groos, que considera o jogo como pré-exercício de instintos herdados, ou seja, uma necessidade biológica, instintiva e psicológica. É nesse momento histórico que Groos antecipa a relação do jogo com a Educação, quando ele retoma o jogo enquanto ação espontânea, natural (influência biológica), prazerosa e livre (influência psicológica) (LIMA, 2016, p. 23).

As pesquisas acerca do tema do brincar também foram destaque em diversas pesquisas psicológicas. Podem ser destacadas as teorias psicológicas de desenvolvimento (Piaget, Wallon e Vygotsky) que contribuíram fortemente para enfatizar o papel da ludicidade na Educação como algo fundamental no desenvolvimento humano, promovendo o desenvolvimento global da criança e do adolescente, incentivando a interação entre os pares, a resolução de conflitos e contribuindo para formar um cidadão crítico e reflexivo (QUEIROZ; MACIEL; BRANCO, 2006, p. 170).

Piaget, por exemplo, estudou o jogo sob uma orientação cognitiva integrando-o à vida mental e caracterizando-o por uma orientação de comportamento, a qual ele denominou assimilação. Em seu entendimento, Piaget considerava que cada ato da inteligência é definido através do equilíbrio entre duas tendências: assimilação e acomodação. Na primeira, “o sujeito incorpora eventos, objetos ou situações dentro de formas de pensamento, que constituem as estruturas mentais organizadas”

(KISHIMOTO, 2003, p. 39). Na segunda, as estruturas mentais já existentes reorganizam-se no intuito de incorporar novos aspectos do ambiente externo. Nesse contexto, Piaget adotou, pelo menos parcialmente, o aspecto escolanovista, tal como a Escola Nova adotou depois, pois compreende que o desenvolvimento natural da criança ocorre pela brincadeira e pela imitação, de modo que relega o jogo infantil a um segundo plano, restrito ao domínio da assimilação sobre a acomodação. Mas, Lima (2016) destaca que se deve perceber que, apesar da consistência da teoria piagetiana, este não discute a brincadeira em si, posto que ele entende a brincadeira no campo do conteúdo e não da estrutura cognitiva, Piaget demonstra não valorizar suficientemente sua importância. A autora, baseada em Kishimoto (1992), esclarece que

Piaget considera que, na manifestação da conduta lúdica, a criança demonstra simplesmente seus estágios cognitivos. Assim, a criança usaria o jogo simbólico, por exemplo, apenas para encontrar um prazer fantasioso a partir de compensação, superação de conflitos, etc. Com o passar do tempo, a criança se aproxima da realidade (LIMA, 2016, p. 23).

De modo semelhante a Piaget, o filósofo e psicólogo francês Wallon considera como fonte de surgimento de representações mentais e brincadeiras os modos como a criança, em suas brincadeiras, imita o mundo real (CREPALDI, 2010, p. 18). Continuando, a autora indica que

Wallon considera que uma atividade lúdica tem em si mesma sua finalidade. Em sua concepção, se uma atividade for considerada simplesmente como um meio para se chegar a determinado fim, ela perde completamente suas características lúdicas” (CREPALDI, 2010, p. 18).

Pode-se destacar ainda outro expoente no campo psicológico que abordou o tema da ludicidade. Trata-se do russo Vygotsky. Baseado em paradigmas marxistas-leninistas, ele considera que, como toda conduta do ser humano, a brincadeira reflete o resultado de processos sociais. Assim, sua teoria acredita que o jogo é o elemento que impulsiona o desenvolvimento (CREPALDI, 2010, 2010, p. 18).

Segundo Lima (2016, p. 27), Vygotsky considera, em sua teoria, dois elementos fundamentais: a situação imaginária e as regras. Nos primeiros anos de vida predomina a brincadeira e tem como função criar Zonas de Desenvolvimento Proximal (ZDP). Criando uma situação imaginária, “a criança desenvolve a iniciativa, expressa seus desejos e internaliza as regras sociais” (KISHIMOTO, 2003, p. 43). Interagindo socialmente através da brincadeira, a criança amplia gradualmente seu conhecimento.

Diante de tantas pesquisas acerca do tema da ludicidade, tem sido constante a prática de pesquisas sobre a utilização de jogos em sala de aula. Pereira, Fusinato e Neves (2009), por exemplo, diante do pensamento de que os métodos tradicionais de ensino estão cada vez menos atraentes para os estudantes e da necessidade de motivar e despertar o interesse dos alunos, tornando o processo de ensino-aprendizagem menos árduo, buscaram resgatar a ludicidade, montando um jogo de tabuleiro para ser utilizado no ensino de Física. Sobre esse jogo, eles afirmam que

Quando desenvolvidos visando à aprendizagem de conteúdos, ele tem potencial para tornar-se uma importante e poderosa ferramenta de aprendizagem, apresentando grande potencial para despertar o interesse dos alunos pelos conteúdos, principalmente porque abordam esses conteúdos dentro de um ambiente lúdico, propício a uma melhor aprendizagem, muito diferente das salas de aula nas escolas, que geralmente são expositivas (PEREIRA; FUSINATO; NEVES, 2009, p.12).

Deve-se destacar que um jogo educativo é mais um material didático de apoio que o professor pode ter à sua disposição. Caso seja utilizado sozinho pode até perder seu valor educativo, por estar desassociado do contexto, porém, quando aliado a outras práticas pedagógicas (aulas expositivas, trabalhos em grupos, monitorias), seu potencial verdadeiro é revelado (PEREIRA; FUSINATO; NEVES, 2009, p. 17).

1.2 As linguagens lúdicas em sala de aula: histórias em quadrinhos e paradidáticos

Dentre as diversas linguagens utilizadas para propiciar aos alunos a oportunidade de aprender Física e outras Ciências encontram-se as histórias em quadrinhos. Diversos têm sido os trabalhos investigativos sobre o tema. RITTES (2006), por exemplo, analisou a relação mídia-educação mediante pesquisa que captava as percepções de docentes do ensino fundamental sobre o uso pedagógico das histórias em quadrinhos.

Nascimento Junior (2013) também defende a utilização de histórias em quadrinhos tanto na divulgação científica como nas aulas de Ciências, particularmente em Física. A utilização dessa linguagem bastante popular para os jovens está inserida na proposição de realizar uma leitura do mundo proposta nos PCN+ (BRASIL, 2002). Considerando as histórias em quadrinhos de ficção científica e o momento histórico, social e econômico no qual elas foram construídas permitem

ao professor promover o diálogo entre a Física e outras Ciências, inclusive as Sociais. Contextos como 2ª. Guerra Mundial (Capitão América), corrida armamentista (Homem de Ferro), guerra fria (Watchmen), por exemplo, emergem espontaneamente nos debates.

Caruso, Carvalho e Silveira (2002, 2005), considerando também a nuance da divulgação científica, criou com colaboradores uma Oficina, com sede na UERJ, de produção de material didático através dos quadrinhos. Nesse projeto, os alunos construíram tirinhas numa temática que versava desde conteúdos específicos da disciplina, até cidadania, ordem de grandeza ou contextualização histórica. Em outro trabalho, Caruso (2003) explica que

participam desse projeto cerca de 40 alunos da rede pública que aprendem conceitos básicos de várias áreas de Ciências, como Física, Astronomia, Biologia, Paleontologia, dentre outras, e criam suas tirinhas, orientados por dez pesquisadores, traduzindo novos conhecimentos e conceitos numa linguagem universal, a da história em quadrinhos, que se adequa muito bem a projetos de alfabetização científica presencial ou a distância (CARUSO, 2003).

Em seu discurso, Caruso enfatiza que busca a alfabetização científica que dependa o mínimo da Matemática. Desse modo, quanto mais lúdico for o modelo, como no caso das histórias em quadrinhos, melhor se adéqua a proposta de divulgação científica e conseqüentemente de auxiliar no ensino de Ciências.

Considerando uma linguagem talvez um pouco diferente, mas que se aproxima da ludicidade das histórias em quadrinhos, encontramos os livros paradidáticos. Alguns deles têm o estilo biográfico. Zanotello e Almeida (2007) fizeram um estudo acerca do uso de um livro dessa natureza, que abordava a obra e vida de Newton. Nas palavras deles, o livro “Isaac Newton e sua maçã”, de autoria de Poskitt.

consiste essencialmente em um texto narrativo biográfico sobre Newton, que aborda também suas descobertas e contribuições à Física e à Matemática. Escrito em linguagem comum que dialoga com o leitor, o livro contém ilustrações e histórias em quadrinhos mescladas ao texto composto basicamente por capítulos curtos. O autor segue a sequência cronológica dos acontecimentos, relatando passagens do nascimento, da infância, da trajetória acadêmica, e da vida pessoal de Newton, de modo sempre bem humorado. Trata-se, certamente, de um recurso distinto dos livros didáticos comumente utilizados no ensino médio. No entanto, apesar do aspecto caricatural atribuído muitas vezes aos personagens e da informalidade narrativa, os conceitos físicos apresentados no livro são bastante precisos, o que leva a crer que o autor procurou aliar um certo rigor conceitual a uma linguagem acessível principalmente a um público jovem e pouco conhecedor dos assuntos tratados. Esta característica se constituiu no incentivo principal para a adoção do livro para o trabalho com os alunos do ensino médio (ZANOTELLO; ALMEIDA, 2007).

Os autores concluíram que um ponto forte na interação dos alunos com o paradidático foi a linguagem utilizada pelo autor que se revelou um atrativo para a leitura. Eles perceberam também que muitos temas tratados na obra interessaram ou ao menos estimularam a curiosidade dos alunos, temas estes que geralmente não são trabalhados no cotidiano da sala de aula (ZANATELLO; ALMEIDA, 2007, p. 446).

Outra conclusão deste trabalho foi que o uso do recurso pedagógico da leitura do paradidático envolveu mais os alunos no processo ensino-aprendizagem. Possibilitou uma efetiva mediação dialógica, que permitiu uma melhor compreensão por parte dos alunos dos assuntos tratados, fazendo com que eles pudessem construir o conhecimento de uma forma mais lúdica.

No início do presente século, Benjamin e Teixeira (2001) desenvolveram uma pesquisa na qual avaliaram a contribuição da leitura de um livro paradidático no ensino do conteúdo de Energia nas aulas de Física. Elas buscaram avaliar os efeitos da leitura do texto escolhido sobre a mudança na postura dos alunos no que diz respeito a aspectos construtores no processo de cidadania. Elas concluíram que o uso do paradidático foi primordial no complemento do tema abordado, proporcionando uma contextualização e visão mais ampla do conteúdo abordado. Igualmente, a leitura viabiliza a formação de um cidadão crítico, capaz de relacionar o que foi estudado em sala de aula com os aspectos tecnológicos, econômicos, sociais e culturais.

Mais tarde, em 2005, Assis aborda a análise profunda da utilização de outro texto paradidático nas aulas de Física, só que feita em turmas de Educação de Jovens e Adultos (EJA). Seu trabalho buscou avaliar as relações dialógicas entre professor e alunos mediadas pela utilização do referido texto. Em suas palavras, a autora afirma que

foram elaboradas duas categorias de análise visando à classificação das argumentações discentes e da intervenção docente provenientes desse contexto específico de sala de aula. A partir dessa classificação foi analisada a dinâmica estabelecida no decorrer da atividade enfocando-se a relação triádica professor/texto/aluno. Os resultados desta pesquisa demonstraram que a relação triádica viabilizou que fossem trabalhados muitos conteúdos de forma contextualizada, bem como a interação entre diversos conceitos científicos, o que propiciou a aprendizagem significativa crítica por parte dos alunos. A atividade mediou ainda a articulação entre os aspectos científicos, tecnológicos, ambientais e sociais, oferecendo condições para que o aluno possa atuar de forma crítica e reflexiva em seu meio social (ASSIS, 2005, p. 5).

Nota-se, portanto, que a criticidade e a construção da cidadania sempre andam de mãos dadas com a leitura. Por isso, a formação do leitor é tão importante no contexto da aprendizagem.

Um aspecto muito importante que precisa ser abordado é como o professor está sendo preparado para trabalhar com textos paradidáticos. Rodrigues (2015a, 2015b) chamou a atenção para isso, descrevendo a experiência que o mesmo teve com a utilização de textos paradidáticos na formação dos licenciandos em Física, na Universidade Federal do Piauí. Além da leitura e discussão de textos paradidáticos de Física, propôs um segundo momento, no qual os estudantes teriam de escrever a continuação de uma estória já iniciada, inserindo nesta conceitos de Física. Estas atividades mostraram-se extremamente positivas e desafiadoras, especialmente na escrita, uma vez que foi observado que os alunos não apresentaram um domínio adequado nem da escrita formal nem dos conceitos de Física, que foram apresentados, algumas vezes, erroneamente. Concluiu ainda que a proposta foi válida, pois buscou sanar essas dificuldades apresentadas pelos alunos. Além do mais, por se tratar de um recurso que alia baixo custo e amplia as possibilidades metodológicas no ambiente escolar, serviu para abordar conceitos da Física no cotidiano, diminuindo a distância entre a Física lecionada na escola e a realidade dos alunos.

Como uma experiência pedagógica que atende tanto à classificação de recurso paradidático para o Ensino de Ciências quanto atende à classificação de peça de divulgação científica, um exemplo emblemático e bem sucedido constitui-se na dissertação de Rodrigo Baldow (SOUZA, 2014) apresentada e defendida em 2014 junto ao Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Federal de Alagoas (PPGECIM/UFAL) (SOUZA, 2014).

O trabalho de Baldow está conectado a uma peça teatral por ele escrita e que se constitui em seu Produto Educacional. A peça teatral intitulada *A Matuta e o Caso Galileu*, composta em 18 cenas, trata fundamentalmente das relações conflituosas entre Galileu e a Igreja quando em duas ocasiões diferentes o mestre florentino defende o sistema heliocêntrico de Copérnico em detrimento do sistema geocêntrico de Ptolomeu. Um trabalho contendo os resultados principais de sua pesquisa foi publicado em revista (BALDOW; BASTOS FILHO, 2016) e uma hermenêutica das cenas de sua peça foi contextualizada em vista dos problemas da época em que viveu Galileu, em um contraponto entre as histórias interna e externa em um viés

epistemológico de interpretação (ver BALDOW; BASTOS FILHO, 2014). Além disso, Baldow apresentou as suas ideias em um congresso internacional (BALDOW; ARAÚJO DOS SANTOS; BASTOS FILHO, 2014) e em seguida transformou a peça teatral em uma história em quadrinhos (SOUZA, 2015) dando bem mais amplitude ao seu trabalho, além deste último também representar um segundo Produto Educacional.

2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho de pesquisa, foram entrevistados 10 professores de Física de escolas da rede pública estadual de Pernambuco. Nos quadros a seguir, são apresentados os resultados da coleta de dados.

Inicialmente, os professores pesquisados declararam sua opinião sobre a utilização de textos paradidáticos no processo de ensino-aprendizagem de Física. O quadro 1 apresenta a opinião dos professores:

Quadro 1 – Opinião dos entrevistados sobre a utilização de textos paradidáticos no processo de ensino-aprendizagem de Física

Professor	Resposta	Professor	Resposta
1	Acho muito importante, pois possibilita aos alunos mais uma ferramenta de aprendizagem.	6	Sou a favor da utilização deste recurso. É uma alternativa bastante adequada à contextualização e cotidianização da ciência.
2	Importante, pois de acordo com o planejamento pedagógico de cada um, os livros paradidáticos auxiliam no processo de ensino-aprendizagem e funcionam como um material complementar que enriquece a sequência didática e os planos de aula elaborados pelo professor.	7	Considero a utilização de textos paradidáticos nas atividades de Física como algo bastante motivador. Seu uso estimula o aluno a se interessar pelo assunto, pois o paradidático é mais atraente para o estudante do que o livro didático.
3	Os paradidáticos são um importante subsídio no processo de ensino e aprendizagem. Exercem funções pedagógicas de melhoria da atenção e despertar para os conhecimentos que serão experienciados.	8	Acredito ser válido, visto que cumprem o papel de aprofundamento teórico que o livro didático não alcança.
4	Muito importante para o desenvolvimento pedagógico do indivíduo, pois exemplifica melhor a teoria e a prática.	9	Acredito que seja mais interessante seu uso para abordar aspectos da história da Física.
5	Acredito que seja útil, porém nunca tive oportunidade de trabalhar com eles.	10	Importantíssima. A leitura e utilização de textos paradidáticos enriquece o estudo de qualquer disciplina, apenas este aspecto já justifica sua utilização.

Dentre os professores entrevistados 70% declararam trabalhar ou já ter trabalhado com textos paradidáticos, enquanto que 30% não tiveram oportunidade de fazê-lo. Mas, mesmo assim, convém frisar, de acordo com as entrevistas, que todos acham importante a utilização do texto paradidático. Independentemente de ter trabalhado ou não com esse elemento provedor de aprendizagem, as opiniões

são sempre favoráveis. Destacamos a fala dos professores 3, 7 e 10, nas quais são enfatizados pareceres de que tal utilização de textos paradidáticos exerce funções pedagógicas de melhoria da atenção, além de despertar para os conhecimentos dos alunos; ademais, seu uso estimula o aluno a se interessar pelo assunto, pois o paradidático é mais atraente para o estudante do que o livro didático e que a leitura e utilização de textos paradidáticos enriquece o estudo de qualquer disciplina, e apenas isso já justifica sua utilização.

Outro questionamento importante da pesquisa foi buscar saber qual a percepção dos professores sobre a resposta dos alunos quanto ao uso do paradidático. O quadro 2 apresenta as respostas.

Quadro 2 - Como os alunos respondem ao uso do paradidático.

Professor	Resposta	Professor	Resposta
1	A princípio, há uma certa resistência pois nosso aluno não é estimulado à prática da leitura desde cedo. Depois eles descobrem o prazer da leitura.	6	Muitos estranham a adoção do recurso e alguns nem adquiriram o livro. Entendo que, de maneira geral, consideraram apenas mais alguns textos para lerem e muitos reagiram contrários às obrigações que levavam o livro como material de estudo.
2	Não utilizou paradidático.	7	Boa parte deles se encanta de imediato. No entanto, há determinada parcela que tem preguiça de ler e encara aquilo como obrigação. Mas, a maioria gosta do livro e se motiva para o estudo do assunto.
3	A maioria respondeu bem ao uso do paradidático. Despertou o interesse de uma considerável parcela dos discentes.	8	É notório que não se consegue uma unanimidade nesta percepção dos alunos. Todavia, eles se mostram mais dinâmicos, pelo menos em saber a diferença entre o livro didático e o paradidático. Este interesse inicial já é um bom indicador no processo ensino-aprendizagem.
4	Alguns ainda apresentam resistência pelo fato de ter que ler um livro para complementar o aprendizado, mas na maioria dos casos a resposta é positiva.	9	Não utilizou paradidático.
5	Não utilizou paradidático.	10	A aceitação é boa, principalmente se o texto for interessante.

Os professores indicaram que há diferentes reações por parte dos alunos. Alguns apresentam certa resistência no início, conforme explicam, por exemplo, os professores 1 e 4, outros estranham o uso (fala do professor 6), outros se encantam

desde o principio (professor 7). Então, não se chega a unanimidade (professor 8). Mas, o fato é que, ao final do trabalho, a maioria dos estudantes tem uma percepção positiva do uso do texto paradidático.

Quando perguntados se tiveram preparação em seu curso de formação, para trabalhar com paradidáticos em sala de aula, apenas 30% responderam que sim. Mas, mesmo assim, não julgaram essa preparação suficiente para desenvolver as atividades com qualidade em sala de aula.

Na parte final da entrevista deixamos os professores à vontade para descrever suas impressões sobre situações de aprendizagem que tenham vivenciado em seu trabalho com a utilização de paradidáticos. O quadro 3 apresenta suas respostas.

Quadro 3 - Impressões dos professores sobre situações de aprendizagem que tenham vivenciado em seu trabalho com a utilização de paradidáticos

Professor	Resposta	Professor	Resposta
1	Minha experiência foi satisfatória pois os alunos passaram a gostar de ler livros que trazem um universo de conhecimentos.	6	Percebo que ainda estamos passando pela transição do estilo da física como “ciência dura” e a “física para todo mundo”. As pessoas, alunos e responsáveis esperam o ensino de física tradicional, com resolução de problemas, muitas vezes totalmente descontextualizados e com utilização de fórmulas “decoradas”. Qualquer alternativa pensada para trazer a física, e outras ciências, para o cotidiano das pessoas deve ser valorizado. Até porque o Ensino por Competências e Habilidades (PCN+) permite esta abordagem. Sou a favor da utilização dos paradidáticos.
2	Muitas vezes temos livros didáticos que não representam a realidade do ensino local ou mesmo pouco explanativo, sendo esse lapso corrigido ou amenizado com os livros paradidáticos, que atuam como auxiliares e servem de apoio ao trabalho do professor.	7	Vivemos numa época em que o ensino se moderniza. Trabalhando com habilidades e competências, o ensino deve ser mais instigante. Nesse sentido, diferentes linguagens devem fazer parte de seu contexto e os paradidáticos caem como uma luva nessa perspectiva de modernização do ensino.
3	No desenvolvimento das atividades paradidáticas a maioria exerceu e desempenhou as atividades propostas com suas dimensões interdisciplinares e pedagógicas.	8	A impressão é que os alunos ficam mais motivados diante do “novo”. O livro paradidático traz uma outra abordagem sobre o tema proposto. A participação em sala apresenta uma melhora

			significativa. Ressalta-se a importância de explorar pontos de vista distintos, o que proporciona um crescimento conjunto (professor-aluno).
4	Na maioria dos casos depois da leitura do paradidático, o desempenho dos alunos aumenta e a compreensão fica mais fácil.	9	Não fez nenhum comentário.
5	Como nunca trabalhei com eles, não tenho muito o que falar sobre isso.	10	Sem maiores sobressaltos, porque os meus alunos já estão acostumados com essa prática, inclusive faz parte do planejamento anual.

A impressão dos professores que utilizaram textos paradidáticos foi sempre favorável, observaram que houve motivação por parte dos alunos para a aprendizagem. Destaca-se a impressão do professor 8 que explicou que os alunos “ficam mais motivados diante do “novo”.

Também convém perceber a profundidade da análise do professor 6. Ele percebeu que “ainda estamos passando pela transição do estilo da física como “ciência dura” e a “física para todo mundo”.

Diante desse resultado, apresentamos um Produto Educacional, um texto paradidático versando sobre fundamentos de Física Quântica. Uma vez concluído o estudo do texto, analisamos como a utilização do mesmo influencia no processo ensino-aprendizagem.

Deve-se destacar que nosso objetivo principal trata-se de buscar respostas para a seguinte pergunta: a utilização de um texto de apoio (paradidático) suplementa ou complementa o trabalho do professor?

3. NOTAS SOBRE O PRODUTO EDUCACIONAL

Como sabemos, o Produto Educacional constitui-se em uma peça didática a ser aplicada em situações de ensino. Cabe ao professor que o utiliza com seus estudantes coordenar eventuais discussões sobre questões que possam surgir durante a aplicação do Produto Educacional em tela.

Deste modo, as presentes notas funcionam como um possível Guia do Professor, ou como uma orientação geral sobre a explicação e/ou intervenção por ocasião da discussão, da leitura, das perguntas previamente formuladas, das perguntas formuladas após a leitura e enfim, para várias situações que eventualmente possam surgir a depender da metodologia de aplicação do Produto Educacional por parte do professor e a recepção ativa ou passiva por parte dos estudantes. Evidentemente, a recepção passiva deve ser evitada e o expediente lúdico, tanto quanto possível, deve ser enfaticamente encorajado, até mesmo para que os estudantes se sintam à vontade para participar do processo de discussão do Produto Educacional enquanto recurso paradidático.

Dito isso, sejam algumas questões sobre o Produto Educacional apresentado:

3.1 Sobre a manta quântica

No capítulo 1 do Produto Educacional as crianças ouvem falar da "Manta Quântica" na televisão e perguntam para o Vovô Zeca sobre os poderes mágicos que tal manta possa exercer nas pessoas. Temos uma situação concreta de uma teoria de grande poder explicativo, na qual muito se discute sobre os seus aspectos pouco intuitivos. Se nos reportarmos às intuições às quais nos habituamos na Física Clássica, as intuições quânticas se apresentam com uma sutileza toda especial. Embora as intuições tenham que ser aperfeiçoadas, há uma mistificação muito grande, como se a Teoria Quântica fosse algo mágico. No entanto, apesar de suas sutilezas conceituais, não trata de nenhuma realidade transcendental. A Teoria Quântica não deve, a nosso ver, ser mistificada como algo mágico e o professor deve estar preparado para mediar a discussão em sala de aula se questões do gênero venham a surgir.

Caso a discussão se dirija para aspectos religiosos, deve-se evidentemente respeitar as posições plurais, pois todos tem o direito de adotar os seus pontos de

vista. Mas o professor deve, a nosso ver, ressaltar que a Teoria Quântica, apesar de se constituir em um caso muito especial entre as teorias sobre a realidade física, deve se limitar aos objetos da realidade natural e não da realidade sobrenatural.

Aliás, a mídia não mistifica apenas aquilo que concerne a uma realidade transcendental e sim sobre mitos políticos, preconceitos, lavagens cerebrais e tudo isso mesmo com relação à realidade do dia a dia.

3.2 As nuvenzinhas de Lord Kelvin

Muito se fala acerca da interessantíssima observação de Lord Kelvin antes do advento da Física Quântica de que a Física Clássica na virada do século XIX para o século XX constituía um edifício bem construído e que quase nada restava para ser feito, pois a Física Clássica havia esgotado quase todos os problemas que estavam ao seu alcance. Algumas pouquíssimas exceções existiam e essas 'certamente' deveriam encontrar soluções perfeitamente adequadas e razoáveis à luz mesmo do referencial teórico tão bem construído da física clássica. A Física havia chegado ao fim e tais exceções eram consideradas como meras 'nuvenzinhas'. No entanto, essas 'nuvenzinhas' se desdobraram em outros edifícios poderosos (a Física Quântica e a Teoria da Relatividade) que, mesmo conservando ainda algumas continuidades com o edifício anterior, introduziam profundas rupturas conceituais.

O problema do corpo negro, ou seja, o problema do equilíbrio térmico da radiação eletromagnética com a matéria a uma temperatura absoluta T foi um desses importantes problemas. Por se constituir em um problema complexo no qual a Física Clássica foi toda revirada de ponta à cabeça a fim de que se pudesse vislumbrar no seu meio uma solução, consideramos que isso constitui um desafio para o Ensino de Física no nível médio. Em outras palavras, diríamos que com relação à sua solução, transpô-la didaticamente com uma Matemática suave e compatível para o Ensino Médio é uma questão importante e o recurso paradidático pode ajudar em muito neste necessário encorajamento. Acreditamos que o professor deve envidar esforços para compreender essas dificuldades e para ter condições de transpor didaticamente caminhos no sentido de esclarecer a solução em termos mais simples, sem contudo distorcer o conteúdo.

Um outro aspecto importante é que a questão do 'fim da Física' ou ainda, dito de outro modo, "o esgotamento da Física" voltou a entrar em cena também na virada do século XX para o presente e ainda inicial século XXI. Muitos consideram que novos conceitos como matéria escura, energia escura, buracos negros e outras teorias profundas virão além da Teoria Quântica, enquanto outros consideram que a época das teorias gloriosas chegou ao fim, ou seja, a época das grandes teorias acabou.

Neste sentido uma discussão aberta em sala de aula acerca do esgotamento ou não da Física constitui-se em um expediente que pode incentivar novas vocações jovens para a atividade científica como professores e pesquisadores desta disciplina.

3.3 Sobre o papel de Planck

No texto do Produto Educacional foi dito que Planck parecia um estudante que sabia como chegar ao resultado, ou seja, sabia qual era a forma matemática correta da função espectral, mas não sabia como explicar esta forma matemática adequadamente, pois tudo aquilo contradizia uma teoria bem estabelecida à época que era o eletromagnetismo de Maxwell. Em outras palavras, acreditava que tudo aquilo era um artifício.

A maneira de Planck foi a grosso modo a seguinte: tendo em vista o resultado conhecido para o domínio de baixas frequências (denotado hoje como lei de Rayleigh-Jeans), bem como o resultado válido para altas frequências (denotado por lei de Wien), Planck usou os seus conhecimentos aprofundados da Termodinâmica para calcular a derivada segunda da entropia em relação à energia interna nos dois casos: tanto quando ele se balizava pela lei de Rayleigh-Jeans quanto no caso em que ele se balizava pela lei de Wien.

A fim de interpolar toda a curva, ele propôs uma expressão matemática de uma estranha "média" da derivada segunda da entropia em relação à energia interna do sistema que atendia aos dois domínios: tanto ao domínio de baixas frequências (Rayleigh-Jeans) quanto no domínio de altas frequências (Wien) e, tendo em vista a definição termodinâmica geral do inverso da temperatura como a derivada primeira da entropia em relação à energia interna, passar a integrar a curva em relação à

energia interna e enfim obter a lei completa da radiação do corpo negro denominada lei de Planck.

Este procedimento embora instrumentalmente bem sucedido, era considerado algo muito bruto e o próprio Planck assim considerava. Essa "média" era algo estupefaciente para quem amasse minimamente os rigores da matemática (PLANCK, 1993; SELLERI, 1995).

Outra maneira de se entender o problema é aquela exposta magistralmente no livro Física Atômica de Max Born (1966) no capítulo de Estatística Quântica. A lei de Rayleigh-Jeans estabelece

$$u(f) = \frac{8\pi f^2}{c^3} \langle \varepsilon \rangle \quad (1)$$

Na expressão acima, $u(f)$ denota a energia por unidade de volume e por unidade de frequência da radiação eletromagnética, f denota frequência, c denota a velocidade da luz no vácuo e $\langle \varepsilon \rangle$ a energia média dos osciladores em um banho de osciladores a uma temperatura absoluta T

Se calcularmos a energia média do banho de osciladores a uma temperatura absoluta T , conforme uma distribuição contínua da energia, obtemos o resultado

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon e^{-\frac{\varepsilon}{kT}} d\varepsilon}{\int_0^{\infty} e^{-\frac{\varepsilon}{kT}} d\varepsilon} = kT \quad (2)$$

onde k denota a chamada constante de Boltzmann. Se substituirmos (2) em (1) obtemos o resultado

$$u(f) = \frac{8\pi f^2}{c^3} kT \quad (3)$$

O resultado (3) se constitui na lei de Rayleigh-Jeans; quando integramos $u(f)$ sobre todo o domínio das frequências, então isso nos leva a um resultado inaceitável posto que infinito, em discordância com as evidências experimentais que indicam

que o resultado obtido deveria ser finito e diferente de zero. Logo, o resultado teórico e a evidência experimental apresentavam resultados completamente díspares.

$$\frac{8\pi kT}{c^3} \int_0^{\infty} f^2 df = \frac{8\pi kT}{c^3} \left[\frac{f^3}{3} \right]_0^{\infty} \rightarrow \infty$$

Isso se constitui no que Paul Ehrenfest veio a se referir como expressando metaforicamente a “catástrofe do ultravioleta”.

Para resolver este impasse, podemos apelar para a lei de Stefan Boltzmann que enumeraremos como (4)

$$u \sim T^4$$

$$u = \sigma T^4 \quad (\text{Stefan Boltzmann}) \quad (4)$$

É bastante simples provar que se a função espectral correta assumir a forma

$$u \sim f^3 f\left(\frac{f}{T}\right)$$

então ela se compatibiliza com a lei de Stefan-Boltzmann (4). Para mostrar isso, vamos integrar $u(f)$ sobre todo o domínio das frequências, usando a expressão acima. Isto é, calcularemos o valor da integral

$$\int_0^{\infty} u(f) df = \int_0^{\infty} f^3 f\left(\frac{f}{T}\right) df,$$

Façamos a seguinte mudança de variável

$$\frac{f}{T} = y \quad \therefore \quad f = Ty$$

e

$$df = T dy$$

Deste modo, o valor da integral é

$$\int_0^{\infty} T^3 y^3 f(y) T dy$$

Ou seja, a densidade volumétrica de energia assumirá o valor

$$T^4 \int_0^{\infty} y^3 f(y) T dy \quad ,$$

Em relação ao qual podemos ver que tudo o que se exige para a validação da equação de Stefan Boltzmann é que a integral acima seja convergente e diferente de zero, isto é, finita e não-nula. Logo, vemos que assim se explica que

$$u \sim T^4 \quad (5)$$

Em outras palavras, então podemos dizer que ela satisfaz a lei de Stefan-Boltzmann desde que, evidentemente, a integral que aparece nos cálculos seja convergente, ou seja, que ela seja finita e, além disso, diferente de zero. Mostraremos a seguir que esse será o caso, mas aí, como veremos, vamos introduzir algo muito estranho ao corpo da Física Clássica.

Assim, calculamos a média ponderada $\langle \varepsilon \rangle$ admitindo que as trocas de energia entre o campo de radiação e a matéria sejam múltiplos de uma dada quantidade mínima ε_0 , ou seja, que as quantidades intervenientes são $n\varepsilon_0$ onde n assume valores inteiros $n = 1, 2, 3, \dots$. Assim, este cálculo redonda em

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n\varepsilon_0 e^{-\frac{n\varepsilon_0}{KT}}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{n\varepsilon_0}{KT}}} = \frac{\varepsilon_0}{e^{\frac{\varepsilon_0}{KT}} - 1} \quad , \quad n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots \quad (6)$$

Substituindo (6) em (1), obtemos

$$u(f) = \frac{8\pi f^2}{c^3} \frac{\varepsilon_0}{e^{\frac{\varepsilon_0}{kT}} - 1} \quad (7)$$

A partir da inspeção cuidadosa da expressão (7) podemos concluir que a função espectral $u \sim f^3 F(f/T)$ que satisfaz a equação de Stefan-Boltzmann fica contemplada se

$$\varepsilon_0 = hf \quad (8)$$

Em (8), h denota a constante de Planck. Este é um passo bastante revolucionário, pois contradiz o eletromagnetismo na medida em que no eletromagnetismo de Maxwell a energia depende do quadrado das amplitudes dos campos, respectivamente elétrico e magnético, mas não da frequência. No entanto, ao substituirmos (8) em (7) obteremos a lei de Planck para todo o espectro de frequências.

$$u(f) = \frac{8\pi hf^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \quad (9)$$

Logo, a integral anterior à equação (5) converge e o resultado é consistente com a lei de Stefan Boltzmann. Desse modo, a hipótese introduzida por Planck resolve o problema da catástrofe do ultravioleta.

3.4 Sobre o papel de Einstein

Em 1905, Einstein introduziu muitas ideias revolucionárias na Física, mas aqui vamos nos ater ao resultado da enorme contribuição que ele deu para o esclarecimento de muitos dos pontos aqui levantados.

Ora, Einstein tinha plena consciência de que a Teoria de Maxwell explicava muitíssimo bem fenômenos como interferência, difração, polarização e era uma teoria bastante sólida. No entanto, Einstein tinha restrições à vigente Teoria de Maxwell como referencial teórico adequado para explicar fenômenos que implicassem emissão e absorção da luz. O efeito fotoelétrico constituiu-se em um fenômeno que ele explicou usando ideias consideradas não ortodoxas.

O efeito fotoelétrico não dependia da intensidade luminosa. Dito em outras palavras, não adiantava termos uma grande energia se os constituintes menores desta energia não tivessem a energia suficiente para produzir o efeito. O efeito se dava a partir da luz de uma dada frequência.

Einstein então considerou que um grânulo de luz de uma dada frequência (que mais tarde veio a receber a notação de fóton), quando incidia na superfície metálica (catodo) de uma célula fotoelétrica se destruía integralmente fornecendo

toda a sua energia para que uma primeira parcela dessa energia viesse a cortar a ligação do elétron com a superfície metálica fazendo-o chegar à superfície da mesma e, além disso, que uma segunda parcela dessa fosse capaz de fornecer energia cinética ao elétron emergente para que ele pudesse passar do catodo ao anodo fechando, por conseguinte, a corrente fotoelétrica.

A fórmula que expressava isso era simplicíssima, mas ressaltava a importância dos *quanta* de energia.

A fórmula é:

$$hf = \Phi + E_{c_{m\acute{a}x}} \quad (10)$$

na qual hf representa a energia do fóton, Φ representa parte da energia do fóton que é utilizada para arrancar o elétron da superfície do metal e $E_{c_{m\acute{a}x}}$ representa a energia cinética máxima que o elétron pode ter fora da superfície metálica.

Não resta a menor dúvida que se trata de uma análise embrionária da dualidade onda-partícula que veio se reforçar a partir dos trabalhos de de Broglie.

3.5 Einstein enfrentou uma teoria rival

É interessante asseverar que havia à época uma teoria que dava uma explicação para o efeito fotoelétrico diferente da explicação de Einstein e que era uma teoria cronologicamente anterior àquela de Einstein.

Trata-se da teoria do gatilho de Lenard. Lenard considerava que a energia já se encontrava na placa metálica e que a luz incidente de pequena intensidade, mas de frequência suficiente para produzir o efeito, funcionasse apenas como um gatilho para que o efeito ocorresse.

Einstein discordou de Lenard de maneira radical. Para Einstein a energia era carregada pelo grânulo de luz que hoje denotamos por fóton. Era esta a energia que era utilizada para produzir o efeito; parte desta energia era para levar o elétron até a superfície (função trabalho) e parte para o elétron emergente adquirir energia cinética para fechar a corrente fotoelétrica (SOARES, 2016).

Segundo Einstein (1965, p. 368), as observações associadas à radiação do corpo negro, como a fluorescência, a produção de raios catódicos por luz ultravioleta e outros fenômenos relacionados com a emissão ou transformação de luz são melhor explicadas se supusermos que a energia da luz seja distribuída de forma

descontínua no espaço. Assim, a energia de um raio de luz não é distribuída continuamente no espaço, mas consiste de um número finito de *quanta* de energia que estão localizados em pontos no espaço, que se movem sem dividir, e que só podem ser produzidos e absorvidos como unidades completas.

3.6 Sobre o princípio da incerteza. incerteza? indeterminação? dispersão?

No capítulo 8 do Produto Educacional intitulado *Heisenberg*, o Vovô Zeca afirma que *tais incertezas não se encontram nos aparelhos de medida e sim na natureza*. Convém aqui fazer alusão que desde 1927 - quando a nova Mecânica Quântica foi formulada como um poderoso edifício conceitual - o assim chamado Princípio da Incerteza de Heisenberg vem sendo discutido por físicos, por filósofos e enfim, por muitas pessoas de formações as mais diversificadas quanto ao seu conteúdo no sentido de oferecer uma resposta que possa vir a esclarecer o seu significado.

Diríamos que a própria notação já é algo que enseja polêmicas. Embora o Princípio de Heisenberg seja bem mais conhecido como Princípio da Incerteza, há autores (físicos, filósofos e estudiosos diversos) que preferem a notação de Princípio da Indeterminação; outros, inclusive, preferem denotá-lo por Princípio da Dispersão de Heisenberg.

Isso se dá, parcialmente pelas razões apontadas pelo Vovô Zeca, de que uma lei objetiva da natureza não refletiria uma incerteza humana resultante de algum caráter subjetivo e nem mesmo seria um resultado decorrente da precisão dos aparelhos de medida. Isso porque no próprio aparato matemático da Teoria Quântica, o Princípio de Heisenberg pode ser apresentado como um Teorema da Dispersão que é válido até mesmo para a partícula livre que não está sujeita a qualquer interação.

Esta discussão, contudo, é um verdadeiro “pântano conceitual” e envolve considerações acerca das complexas relações sujeito/objeto.

A assertiva de Vovô Zeca segundo a qual *tais incertezas não se encontram nos aparelhos de medida e sim na natureza* pode ser interpretada metaforicamente como “incertezas da natureza”. Precisamente neste ponto é que surgem questões epistemológicas que dão, como se diz na linguagem coloquial popular, *muito pano para manga*. Entre elas:

- A natureza teria incertezas?

- A natureza não teria incertezas, pois essas se constituem em características humanas e não da natureza?

Tratar-se-ia apenas de uma notação e nada mais?

Acreditamos que o desafio que um professor possa oferecer aos seus estudantes seja este: pensem, discutam, consultem os pareceres dos demais colegas, consultem os pareceres dos especialistas em Teoria Quântica, mas vocês não podem esquecer que todos terão as mesmas dúvidas.

Lembremos que esta é uma das razões, entre várias outras razões correlatas, do porquê da LDB tanto insistir no desenvolvimento de habilidades e competências a fim de que os sujeitos da Educação se exercitem na crítica a fim de que possam alcançar as suas autonomias intelectuais.

3.7 Sobre o princípio da complementaridade

O Princípio da Complementaridade de Bohr foi outro princípio que ensejou muita discussão e muita polêmica. Discussões desse tipo são eternamente recorrentes e muito provavelmente não tem data para que venham a se esgotar, embora haja uma interpretação dominante (ver BASTOS FILHO, 2003).

A depender da concepção filosófica adotada, este princípio deveria ser interpretado como algo profundo ou como algo obscuro e vago.

Os dois amigos Bohr e Einstein não entraram em acordo.

Bohr argumentava que a única realidade compreensível era a da Física Clássica. Bohr concebia como genuinamente compreensíveis apenas descrições e explicações que lançassem mão, a um só tempo, de categorias espaço temporais e de categorias causais. Trocado em miúdos, as descrições e explicações espaço temporais da Física Clássica significavam o seguinte: o movimento de uma partícula, por exemplo, com coordenada x e momento linear p_x , é concebido como exibindo valores precisos (sem dispersão) tanto de x quanto de p_x em quaisquer instantes e, além do mais, tal movimento se acordava completamente com leis causais (conservação do momento linear, conservação da energia,...).

Subjacente a esta concepção, o conceito de trajetória se sustenta concomitantemente com as leis causais. Em outras palavras, categorias conceituais que envolvem espaço-tempo e causalidade intervêm ambas e ao mesmo tempo no

contexto da descrição e da explicação em Física Clássica: esta era a realidade física considerada compreensível.

Bohr considerava que no contexto da Física Quântica isso não seria possível, pois em situações experimentais nas quais fosse implementada uma descrição/explicação espaço temporal estaria excluída a possibilidade de uma descrição/explicação causal e vice versa, em situações experimentais nas quais fosse implementado uma descrição/explicação causal estaria excluída a descrição/explicação espaço temporal.

Em suma, segundo Bohr as descrições/explicações espaço temporais e causais são mutuamente excludentes, mas são complementares no contexto do formalismo matemático.

Ainda em outras palavras, segundo Bohr, deveremos lançar mão das descrições/explicações espaço temporais e causais, pois somente a física clássica é compreensível, mas deveremos excluí-las mutuamente e somente complementá-las (daí o porquê de se chama Princípio da Complementaridade) no contexto do formalismo matemático da Teoria Quântica.

Esta mútua exclusão foi interpretada no contexto da assim chamada dualidade onda-corpúsculo. De acordo com Bohr, experimentos nos quais fosse implementado o aspecto corpuscular, então estaria excluído o aspecto ondulatório e, vice versa, experimentos nos quais fosse implementado o aspecto ondulatório, então estaria excluído o aspecto corpuscular. Assim, onda e corpúsculo eram mutuamente excludentes e apenas complementares no corpo do formalismo matemático da Teoria Quântica.

Einstein não gostou do Princípio da Complementaridade baseado em mútua exclusão.

Há a possibilidade de se conceber a dualidade onda-corpúsculo em uma complementaridade de coexistência em nível ontológico dos aspectos, ambos, de onda e de partícula (corpúsculo) em vez de concebê-los segundo uma complementaridade de mútua exclusão como a de Bohr. Neste sentido, Einstein, de Broglie, Popper e Selleri, para dar alguns exemplos de autores que se debruçaram neste difícil tema, se inclinaram na direção de uma crítica aprofundada do Princípio da Complementaridade de Bohr (POPPER, 1986; SELLERI, 1986, 1990, 2001).

Vejamos agora um aspecto importante para a educação científica e para a educação dos cidadãos. Bohr e Einstein eram adversários em concepções

epistemológicas, mas não eram inimigos. Muito pelo contrário, pelo relato de Pais que conheceu a ambos e com ambos conviveu, Einstein e Bohr se amavam e se respeitavam profundamente (PAIS, 1995).

Em suma, Einstein e Bohr praticaram um belo *fair play* científico. Em tempos de tanto ódio, de tanto preconceito e de tanta polarização política movida muitas vezes por meros instintos irracionais, este é um belo exemplo para a educação em geral, e para a educação científica, em particular.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de um texto de apoio (paradidático) suplementa ou complementa o trabalho do professor? Essa foi a questão central investigada na presente dissertação. Diante das pesquisas realizadas e da prática vivenciada com o texto paradidático utilizado (Apêndice B), foi possível concluir que o seu uso tanto complementa como suplementa o trabalho do professor. Isto porque tanto o paradidático motiva o aluno para o aprendizado daquele conteúdo específico ali tratado, como fortalece no aluno o hábito da leitura. Após aquela leitura, o aluno procura outras, interessa-se pelos assuntos discutidos e, dessa forma, passa a dominar uma linguagem que aprimora seus conhecimentos não apenas na disciplina abordada no paradidático.

A utilização do paradidático complementa o trabalho docente, pois com ele, cresce nos alunos o interesse em aplicar saberes que o docente possa vir a utilizar de forma insuficiente, dado o pouco período de tempo que tem para trabalhar a disciplina e os limites comuns a qualquer prática educativa. Os saberes mais utilizados e requisitados no processo se relacionam com o encanto da leitura e o tempo de aprendizagem do aluno em relação a seu desenvolvimento. Sendo assim, fica evidenciado em nossa pesquisa que a utilização do paradidático é uma importante parte no processo de ensino e aprendizagem.

Em torno da questão acima discutida, percebemos também que os paradidáticos exercem funções pedagógicas importantes, melhorando a atenção dos estudantes para a disciplina estudada, aguçando a curiosidade deles e despertando-os para a construção mais efetiva de conhecimentos. Seu uso faz ainda com que o aluno se sinta estimulado pelo assunto estudado, pois o paradidático é mais atraente para o estudante do que o livro didático.

Esperamos que a realização desse estudo tenha contribuído para a compreensão de algumas questões acerca da importância da contextualização da Educação no mundo contemporâneo e que incentive o surgimento de novos questionamentos e novas pesquisas nesse âmbito, principalmente com relação às práticas pedagógicas. Almejamos, ainda, que professores e alunos de uma maneira geral possam compreender melhor o sentido de encarar a leitura como estratégia capaz de colaborar no processo ensino-aprendizagem de Física.

Naturalmente, não foi possível em nosso trabalho de pesquisa, nem era nossa intenção, por razões óbvias, esgotar o tema. Sendo assim, abrem-se no horizonte perspectivas para no futuro continuarmos a pesquisar, aprofundando essa discussão tão interessante e buscando contribuir com a melhoria na qualidade de ensino, em especial na escola pública.

REFERÊNCIAS

ASSIS, Alice. **Leitura, argumentação e ensino de Física: análise da utilização de um texto paradidático em sala de aula**. 2005. 280 f. Tese de Doutorado (Programa de pós-graduação em Educação para a Ciência) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) – Campus Bauru, 2005.

LIMA, Iracema Luzitânia de Freitas Lima; VIRÃES, Maria Betânia Amaral Rodrigues de Almeida. Reconhecendo a importância do brinquedo como Instrumento de ensino-aprendizagem. In: III Congresso Nacional de Educação, 2016. Natal: **Anais do III Congresso Nacional de Educação**. Natal: Centro de Convenções de Natal, nov./2016, p. 1-6.

BALDOW, Rodrigo; BASTOS FILHO, Jenner Barretto. Hermenêutica Galileana: Teorias que subjazem à peça de Baldow 'A Matuta e o Caso Galileu'. In: III Encontro Alagoano de Ensino de Ciências e Matemática, 2014. Maceió: **Atas do III Encontro Alagoano de Ensino de Ciências e Matemática**. Maceió, UFAL, dez./2014, p. 1-19.

_____. A peça didática de Brecht como instrumento de divulgação científica: O Caso Galileu, **Exp. Ens. Ciênc.** Vol. 11, nº 3, p. 86-117, 2016. Disponível em http://if.ufmt.br/eenci/artigos/Artigo_ID325/v11_n3_a2016.pdf. Acesso em: 12 jul. 2017.

BALDOW, Rodrigo; ARAÚJO DOS SANTOS; Javan Sami; BASTOS FILHO, Jenner Barretto. 'O Caso Galileu em uma atividade teatral apresentando como base a Peça Didática de Brecht'. In: **VIII Colóquio Internacional Educação e Contemporaneidade**. São Cristóvão (SE), 2014.

BASTOS FILHO, Jenner Barretto. Os Problemas Epistemológicos da Realidade, da Compreensibilidade e da Causalidade na Teoria Quântica, **Rev. Bras. Ens. Fís.** Vol. 25, nº 2, junho de 2003, p. 125-147. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v25n2/a02v25n2.pdf> . Acesso em 12 jul. 2017.

_____. A História da Ciência e a Filosofia da Ciência ajudam, atrapalham, ou são irrelevantes para o Ensino de Física? **Norte Ciência**, v. 2, n. 2, p. 111-125, 2011. Disponível em: http://aparaciencias.org/vol-2.2/15_Jenner_p.111-125.pdf. Acesso em 17 jul. 2017.

_____. Qual História e qual Filosofia da Ciência são capazes de melhorar o Ensino de Física? In: PEDUZZI, L. O. Q.; MARTINS, A. F. P.; HIDALGO FERREIRA, J. M. (Orgs.) **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino**. Natal: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (EDUFRN), 2012, cap. 3, p. 65-83, disponível em <http://ppgect.ufsc.br/files/2012/11/Temas-de-Historia-e-Filosofia-da-Ciencia-no-Ensino1.pdf> . Acesso em 17 jul. 2017.

_____. Reconstruções Racionais de Episódios da História da Ciência sob um viés Epistemológico: fundamentação. In: **Roberto o amigo: Roberto Moreira e a História e Filosofia da Ciência**, Caruso, F. (Org.), São Paulo: Livraria da Física, p. 75-115, 2017.

BRASIL. **Lei de Diretrizes e Bases da Educação Brasileira (LDB)** (1996). Lei nº 9.293, de 20 de dezembro de 1996. Brasília, DF, Senado, 1996.

_____. **Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio: bases legais.** Brasília, 2000. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/blegais.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2017.

_____. **PCN + ensino médio: orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais.** Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. Brasília, [2002]. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2017.

BORN, Max. **Física Atômica.** 2ª. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1966.

BENJAMIN, Alice Assis; TEIXEIRA, Odete Pacubi Baierl. Análise do uso de um texto paradidático sobre energia e meio ambiente. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 1, 2001.

CARUSO, Francisco. Desafios da alfabetização científica. **Ciência & Sociedade**, v. 10, 2003.

CARUSO, Francisco; CARVALHO, Miriam; SILVEIRA, Maria Cristina. Uma proposta de ensino e divulgação de ciências através dos quadrinhos. **Ciência & Sociedade**, v. 8, 2002.

_____. Ensino não-formal no campo das ciências através dos quadrinhos. **Ciência e Cultura**, v. 57, n. 4, p. 33-35, 2005.

CARUSO, F.; OGURI, V.; SANTORO, A. **O que são quarks, glúons, bósons de Higg, buracos negros e outras coisas estranhas?**, São Paulo: Livraria da Física, 2012.

CREPALDI, Roselene. **Jogos, brinquedos e brincadeiras.** Curitiba: IESDE Brasil S. A., 2010.

EINSTEIN, Albert. Concerning an heuristic point of view toward the emission and transformation of light. **American Journal of Physics**, vol. 33. n. 5, p. 367-374, 1965.

FREIRE, João Batista. **O jogo: entre o riso e o choro.** Campinas: Autores Associados, 2002.

GATTI, Sandra R. Teodoro; NARDI, Roberto (Orgs.) **A História e a Filosofia da Ciência no Ensino de Ciências**, São Paulo: Escrituras, 2016.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 3ª. ed. São Paulo: Atlas, 1991.

KISHIMOTO, Tizuko Morchida. O jogo e a Educação Infantil. **Perspectiva**, Florianópolis, UFSC/CED, NUP, n. 22, p. 105-128, jul. 1992.

_____. **O jogo e a Educação Infantil**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

_____. **Jogo, brinquedo, brincadeira e a Educação**. 14^a. ed. São Paulo: Cortez, 2011.

KÖCHE, José Carlos. **Fundamentos de Metodologia Científica: Teoria da ciência e prática da pesquisa**. 15^a ed. Petrópolis: Vozes, 1997.

LIMA, Iracema Luzitânia de Freitas. **O brincar na educação infantil**. 2016. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Pedagogia) – Universidade Estadual Vale do Acaraú, 2016.

LIMA, Iracema Luzitânia de Freitas; VIRÃES, Maria Betânia Amaral Rodrigues de Almeida. Reconhecendo a importância do brinquedo como Instrumento de ensino-aprendizagem. In: III Congresso Nacional de Educação, 2016. Natal: **Anais do III Congresso Nacional de Educação**. Natal: Centro de Convenções de Natal, nov./2016, p. 1-6.

LIMA, Mayara Lopes de Freitas; FONTES, Adriana; SANTANA, Otacílio Antunes. Monitoria suplementa ou complementa a docência? Experiências na disciplina introdução a Física. **Blucher Biophysics Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 1-3, 2017.

MOREIRA, Marco Antônio. **Física de Partículas: uma abordagem conceitual e epistemológica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011.

_____. **Subsídios Epistemológicos para o Professor em Ensino de Ciências (Epistemologias do Século XX)**. 2^a ed. rev. Porto Alegre: Instituto de Física – UFRS, 2016.

NASCIMENTO JUNIOR, Francisco de Assis. **Quarteto fantástico: ensino de física, histórias em quadrinhos e satisfação cultural**. 2013. 115 f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Ensino de Ciências – Ensino de Física). São Paulo: Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências da USP, 2013.

PAIS, A. **“Sutil é o Senhor...” A Ciência e a Vida de Albert Einstein**, Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1995.

PEDUZZI, Luiz O. Q.; MARTINS, André Ferrer P.; HIDALGO FERREIRA, Juliana Mesquita. (Orgs.) **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino**, Natal: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (EDUFRN), 2012. Disponível em: <http://ppgect.ufsc.br/files/2012/11/Temas-de-Historia-e-Filosofia-da-Ciencia-no-Ensino1.pdf>. Acesso em 21 jul. 2017.

PEREIRA, Ricardo Francisco; FUSINATO, Polônia Altoé; NEVES, Marcos Cesar Danhoni. Desenvolvendo um jogo de tabuleiro para o ensino de física . Atas do **VII**

Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências - ENPEC. Florianópolis, SC, 2009, p. 12-23.

PLANCK, Max. **A Survey of Physical Theory**, New York: Dover Publications, 1993.

POPPER, Karl R. Prefácio ao livro de Selleri *Le Grand Débat de La Théorie Quantique*, Paris: Flammarion, 1986.

QUEIROZ, Norma Lúcia Neris de; MACIEL, Diva Albuquerque; BRANCO, Angela Uchôa. Brincadeira e desenvolvimento infantil: um olhar sociocultural construtivista. **Paideia**, São Paulo, n. 16(34), p. 169-179, 2006.

RITTES, André. As histórias em quadrinhos nas escolas: a percepção de professores do ensino fundamental sobre o uso pedagógico de quadrinhos. Dissertação de mestrado. Universidade Católica de Santos, 2006, 134 f.

RODRIGUES. Micaías Andrade. A escrita de textos literários na formação dos futuros professores de Física. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**. v. 14, n. 2, p. 246-269, 2015a.

RODRIGUES. Micaías Andrade. A leitura e a escrita de textos paradidáticos na formação do futuro professor de Física. **Ciência & Educação**. v. 21, n. 3, p. 765-781, 2015b.

SELLERI, Franco. **Le Grand Débat de La Theorie Quantique**, Paris: Flammarion, 1986.

_____. **Quantum Paradoxes and Quantum Reality**, col. Fundamental Theories in Physics, v. 35. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990.

_____. **Dispense delle lezioni di Istituzioni di Fisica Teorica**. Bari: Istituto di Fisica della Università di Bari, 1995.

_____. **Le Forme della Energia (La Luce e il Calore. Da $E = mc^2$ all'energia nucleare)**, Bari: Edizioni Dedalo, 2001.

SILVA, Edna Lúcia; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 3ª. ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

SOARES, Joana Menara Souza **Análise da História do Efeito Fotoelétrico em Livros Didáticos de Física para a Graduação**. 2016. 86 f. Dissertação de Mestrado (Programa de pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

SOUZA, Rodrigo Baldow de. **Um Teatro sobre o Caso Galileu: A Peça Didática de Brecht como Instrumento de Divulgação Científica**. 2014. 130 f. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática) - Universidade Federal de Alagoas, 2014.

_____. **A Matuta e o Caso Galileu em quadrinhos**. João Pessoa: Editora Imprell, 2015.

WAJSKOP, Gisela. O brincar na Educação Infantil. **Caderno de Pesquisa**, São Paulo, n. 92, p. 62-69, fev./1995.

ZANOTELLO, Marcelo; ALMEIDA, Maria José Pereira Monteiro de. Produção de sentidos e possibilidades de mediação na Física do ensino médio: leitura de um livro sobre Isaac Newton. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 437-446, (2007).

APÊNDICE A- ENTREVISTA APLICADA AOS PROFESSORES

Caro(a) colega:

Inicialmente, gostaria de agradecer pela sua disponibilidade em cooperar com o presente trabalho acadêmico. Gostaria de salientar que sua contribuição será anônima e que o resultado deste questionário será utilizado apenas com fins acadêmicos.

1. Qual a sua opinião sobre a utilização de textos paradidáticos no processo de ensino-aprendizagem de Física?

2. Você já usou (ou usa) paradidáticos em seu trabalho cotidiano?

() SIM

() NÃO

3. Caso sua resposta ao item anterior tenha sido NÃO, qual o motivo?

4. Caso sua resposta ao item 2 tenha sido SIM, quais os resultados que você obteve com a utilização do paradidático em suas aulas?

5. Como os alunos respondem ao uso do paradidático?

6. Em seu curso de formação, você teve uma preparação para trabalhar com paradidáticos em sala de aula?

() SIM () NÃO

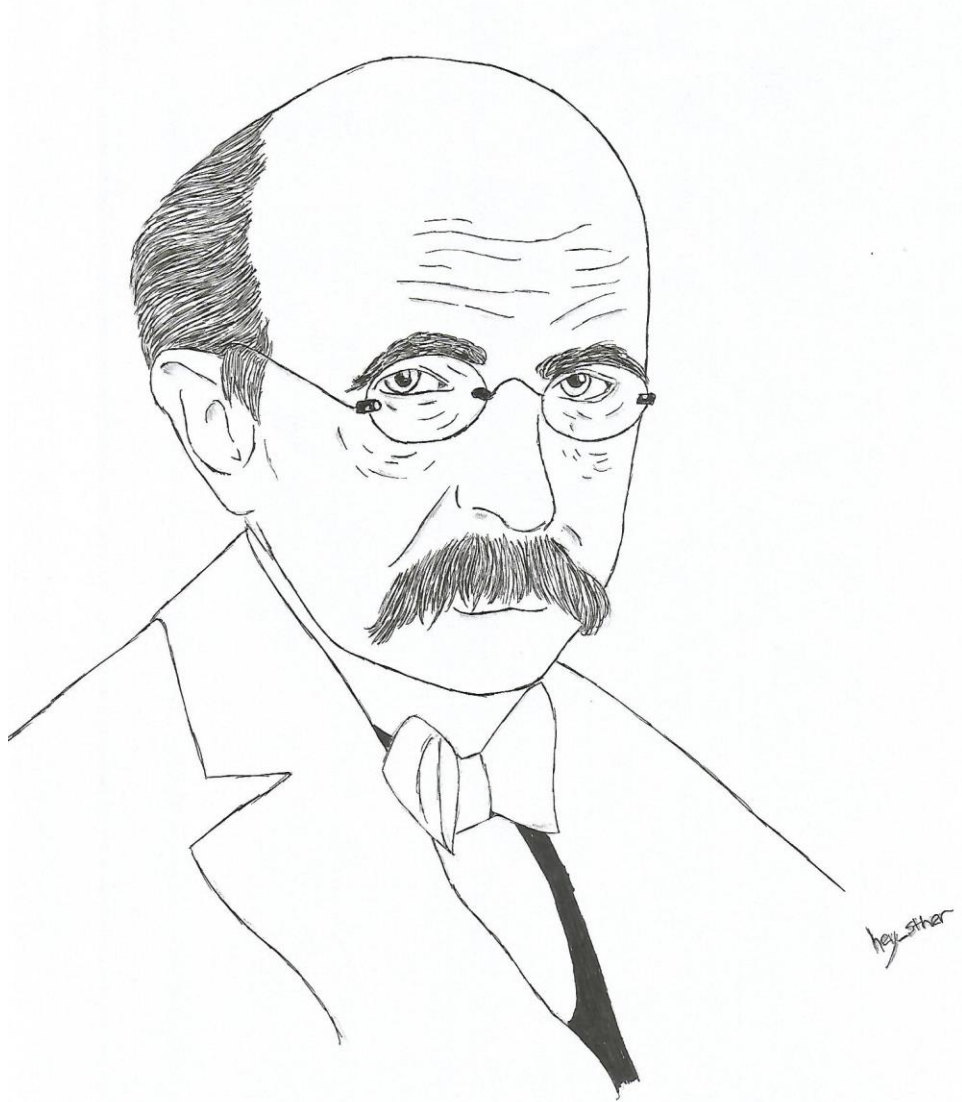
7. Essa preparação foi suficiente para desenvolver as atividades com qualidade em sala de aula? Explique.

8. Fique à vontade para descrever suas impressões sobre situações de aprendizagem que você vivenciou em seu trabalho com a utilização de paradidáticos.

Muito obrigado pela colaboração!

APÊNDICE B – PRODUTO EDUCACIONAL

ALBERI LOPES DE LIMA



Max Planck, formulador da hipótese que deu origem à Física Quântica.

Ilustração: Sthéfany Reis Negromonte

E ASSIM NASCEU A FÍSICA QUÂNTICA

VERSÃO PRELIMINAR

APRESENTAÇÃO DOS PERSONAGENS

Vovô Zeca é o avô das crianças. É um professor de Física aposentado. Formou-se em Engenharia na década de 1960. Foi um estudante bastante entusiasmado e apaixonado pela Física. Posteriormente, no início dos anos 1980, concluiu o curso de Física. Hoje, mora num sítio, com sua neta Alice. Quando seus outros netos entram de férias, ele fica muito feliz em satisfazer a curiosidade científica deles.

Alice é a neta que mora com o Vovô Zeca. Adora os primos e sempre procura mimá-los, principalmente utilizando seus dotes culinários.

Vinícius e Yasmin são os netos do Vovô Zeca que sempre vão passar as férias com ele no sítio. São crianças muito inteligentes e têm muito interesse em Ciências.

Charles é amigo do pai de Vinícius e Yasmin. Como não está de férias, o pai das crianças pede a Charles que leve as crianças ao sítio onde mora Vovô Zeca.

Capítulo 1

A manta quântica

O céu estava nublado. Não tardaria a chover. Vinícius e Yasmim se dirigiam para a casa do avô, Zeca. Charles guiava o carro cuidadosamente por meio de estradas de barro e muita lama.

As crianças adoravam passar um tempo na casa do avô, mas as férias de julho sempre traziam consigo aquele clima de inverno. A chuva ou o que ainda restava de sua passagem sempre causava dificuldades.

Eis que as crianças finalmente chegam à casa de vovó Zeca. Ele e a prima Alice já estavam no portão esperando ansiosamente por eles.

Após tomar um cafezinho e provar do delicioso bolo de cenoura feito por Alice, Charles se despediu de todos e voltou para casa.

Logo após, as crianças correram em direção ao quintal para brincar. Começou uma chuvinha fina, que foi engrossando e daí a pouco caiu um aguaceiro sem tamanho. As crianças adoraram tomar aquele banho de chuva do qual sentiam falta. Mas, quando a chuva tornou-se muito forte, entraram e foram se enxugar.

Depois de vestir roupas enxutas e fazer outro lanche, Vinícius e Yasmim foram assistir à televisão.

Logo que ligaram a TV, viram um programa que falava de uma tal de “manta quântica” que operava milagres. Praticamente qualquer doença poderia ser curada com essa manta milagrosa.

– Desse jeito, todos os médicos vão ficar desempregados! Exclamou Vinícius.

– Mas, será que isso existe mesmo? Questionou Yasmin.

– Vamos perguntar ao Vovô Zeca. Respondeu Vinícius.

Antes de desligar a televisão, ouviram o locutor falar de Física Quântica e de que essa ciência estava por trás das maravilhas que essa manta trazia para a humanidade.



Na biblioteca, Vovô Zeca lia um livro tranquilamente quando as crianças chegaram alvoroçadas. As duas falavam ao mesmo tempo:

– Vovô, Vovô! O que é Física Quântica? Ela faz milagre mesmo?

– Que história é essa, crianças? Onde vocês ouviram isso? Indagou o avô.

Então eles explicaram ao avô o que o programa de televisão tinha mostrado sobre a tal manta fantástica e a Física Quântica.

Como as crianças já tinham alguma noção de Física, o que Vovô Zeca precisava esclarecer para elas era o conceito de Física Quântica e o que era possível ou não desenvolver a partir de seu conhecimento. Ele, então, explicou que:

– Vejam bem. Com os êxitos obtidos pela Física Clássica ao final do séc. XIX existia uma ilusão de que não havia mais o que descobrir. A radiação parecia estar bem explicada com as equações de um cientista escocês chamado Maxwell¹, os fenômenos relacionados à teoria ondulatória da radiação eram interpretados de forma consistente, inclusive com a descoberta das ondas hertzianas confirmando a ligação entre Óptica e Eletromagnetismo, a Teoria Cinética dos Gases era bem aceita, entre outros avanços. Tudo indicava que não havia mais o que resolver em Física.

– E era isso mesmo, Vovô? Perguntaram.

– Muita gente achava que sim. Enquanto muitos cientistas naquela época acreditavam que não havia mais o que se descobrir em Física alguns pensavam que ao menos alguns poucos problemas aguardavam solução para a conclusão da obra. Em um famoso discurso, no final do século XIX, William Thomson², mais conhecido

¹ James Clerk Maxwell (1831-1879), eminente físico e matemático escocês. Pode-se dizer que sua maior contribuição à Física foi ter dado forma à moderna Teoria do Eletromagnetismo, ao unir a Eletricidade, a Óptica e o Magnetismo. As conhecidas Equações de Maxwell demonstram que os campos elétricos e magnéticos se propagam com a velocidade da luz. Desse modo, ele demonstrou que a luz corresponde à propagação de ondas elétricas e magnéticas. Ele também desenvolveu importantes contribuições em Teoria Cinética dos Gases e Mecânica Estatística, particularmente com a chamada lei de distribuição de Maxwell-Boltzmann, que é a base da Mecânica Estatística Clássica.

² William Thomson (1824-1902), o Lord Kelvin (sagrado cavalheiro pela Rainha Vitória), foi um engenheiro, matemático e físico inglês, cujos trabalhos foram fundamentais para o desenvolvimento da Ciência no séc. XIX. Foi um dos responsáveis pelo lançamento do primeiro cabo submarino através do Oceano Atlântico. Criou a escala absoluta de temperatura (escala Kelvin) e produziu mais de 600 trabalhos em vários campos da Ciência.

como Lord Kelvin explicava que o edifício da Física estava com sua estrutura quase completa. Só havia algumas poucas nuvenzinhas que, tão logo fossem esclarecidas, encerrariam todo o arcabouço teórico dessa ciência. Uma dessas nuvenzinhas tratava do problema da radiação do corpo negro. As leis que descreviam o problema, além de não corresponder aos dados obtidos experimentalmente, levavam a uma situação que foi chamada pelo físico austríaco Paul Ehrenfest³ de “catástrofe do ultravioleta”.

– Que nome bonito, Vovô. Catástrofe do ultravioleta! O que é isso? Perguntou Vinícius.

– Era um efeito que aparecia nos cálculos teóricos na região de altas frequências do espectro visível.

– Agora complicou! Disse Yasmin.

– Bem, é muita informação de uma vez só. Mais tarde poderemos continuar esse assunto. Disse o avô.

– Mas, logo agora que estava ficando interessante! Disse Yasmin.

– É, mas por ora, o importante é que vocês saibam que a teoria quântica é uma teoria que chegou para revolucionar a Física e acabar com aquela ideia de que ela estava acabada. Comentou o avô.



Nesse momento, chega Alice chamando todos para o almoço. As crianças saíram alvoroçadas e, pelo menos por um bom tempo, elas tiveram que segurar sua curiosidade.

³ Paul Ehrenfest (1880-1933) foi um físico e matemático austríaco. Realizou contribuições fundamentais na área de Mecânica Estatística e suas relações com a Mecânica Quântica, incluindo a teoria da Transição de fase e o famoso teorema que leva o seu nome.

Capítulo 2

Corpo negro

Após o almoço, as crianças estavam ávidas para correr e brincar, mas a chuva insistia em adiar suas brincadeiras. Assim, elas continuaram pensando naquela história das nuvenzinhas. Quer dizer que alguns cientistas acreditavam que a Física estava condenada e que o homem finalmente havia dominado a natureza? Bem, era mais ou menos desse jeito que as coisas estavam ocorrendo no final do século XIX.

Voltando ao assunto, perguntaram ao avô sobre a inusitada situação. Vovô Zeca respondeu-lhes que aparentemente as coisas estavam complicadas, mas aquelas nuvenzinhas ainda iam dar muito que falar.

— A primeira nuvenzinha ficou conhecida como o problema da radiação de corpo negro.

— Que é corpo negro? Indagaram as crianças.

— Bem, corpo negro é um conceito interessante. Imaginemos o seguinte: um pedaço de ferro está inicialmente frio. Uma de suas extremidades será aquecida no fogo. Porém, esta será periodicamente retirada do fogo apenas o tempo suficiente para que possamos observar o que ocorreu. Enquanto a temperatura não estiver suficientemente alta, isto é, abaixo de cerca de 600°C , o calor emitido pelo ferro pode ser sentido, mas não visto ainda. Isto porque a maior parte da energia emitida estará concentrada em frequências abaixo daquelas da luz visível. Vocês já estudaram isso no colégio?

— Vimos. Sabemos que à medida que a temperatura aumenta, a quantidade de calor emitido pelo ferro vai aumentar muito rapidamente.

— Isso mesmo. Quando a temperatura estiver entre aproximadamente 600°C e 700°C , a radiação fica visível: o ferro começa a brilhar e sua cor se altera. Ele ficará no começo com uma luz de cor vermelha escura, depois um vermelho brilhante, um vermelho mais forte, até atingir uma cor branco-azulada. Finalmente, quando a extremidade do ferro atingir determinada temperatura, ele emitirá calor com um determinado espectro de frequências. Explicou o avô.

– E o corpo negro?

– Trata-se de um corpo que absorve toda a radiação incidente sobre ele. E como todo bom absorvedor é bom emissor, o corpo negro também é o melhor radiador que existe. Porém, cumpre destacar que o corpo negro é um corpo hipotético.

– Mas, o que podemos entender como corpo negro? Perguntou Vinícius ao avô.

– Apesar do corpo negro ser um corpo ideal, na prática podemos considerar um corpo como sendo negro desde que o mesmo satisfaça certas condições. O exemplo que podemos considerar como mais próximo da radiação de corpo negro é uma cavidade com uma única abertura de dimensões muito reduzidas em relação a ela. Quando a cavidade é aquecida, suas paredes emitem radiação eletromagnética. A radiação emitida pelas paredes internas fica presa na cavidade, sofrendo sucessivas reflexões e sendo em parte reabsorvida. No equilíbrio térmico, a quantidade de energia que as paredes emitem é igual à que reabsorvem. Uma forma de estudar a radiação de cavidade, ou radiação de corpo negro, consiste em se concentrar na pequena porção de radiação que escapa pelo orifício. Trata-se de uma amostra dessa radiação, que pode ser analisada, sem alterar o equilíbrio termodinâmico. Diante disso, a probabilidade da absorção da luz incidente na cavidade pelas paredes é suficientemente alta, independentemente de qual seja o comprimento de onda da radiação ou de que material é constituída a cavidade. Desse modo, o espectro da radiação da cavidade, ou seja, a quantidade de luz emitida pela cavidade para cada comprimento de onda será contínuo e independente do material que forma a cavidade.

– Ah, então a radiação de corpo negro é aquela emitida pelas paredes de uma cavidade como esta? Eu pensei que fosse a radiação emitida por um objeto preto. Disse Yasmin.

– Alguns nomes realmente nos confundem. Por isso é importante compreender os conceitos. Comentou Vovô Zeca. O importante é não se esquecer de que os átomos que constituem o material das paredes da cavidade emitem radiação eletromagnética. Além disso, ao mesmo tempo em que eles emitem tal radiação, eles absorvem aquela que é emitida por outros átomos das paredes.

Podemos então falar da existência de um campo de radiação eletromagnética que permeia toda a cavidade. Assim, quando a radiação no interior da cavidade atingir o equilíbrio térmico com os átomos das paredes, a quantidade de energia que os átomos emitem, por unidade de tempo, será igual à que eles absorvem.

— Vovô, por falar em radiação térmica, acho que já está na hora de acender a fogueira. Disse Vinícius.

— Isso mesmo! Completou Yasmin.

— É, crianças. Vamos dar uma paradinha. Já tivemos muita informação por hoje. É hora de festejarmos e nos divertirmos um bocado. Disse o avô.

Capítulo 3

A primeira nuvenzinha

Depois de uma noite de pura diversão, as crianças caíram no sono. Aquela conversa sobre a radiação tinha esclarecido muitas coisas que eles tinham visto no colégio, mas não tinham ainda aguçado a curiosidade para compreender.

A manhã do dia seguinte foi dedicada a brincadeiras e passeios. Apenas no período da tarde é que voltaram a procurar o avô para saber como tinha terminado a história do corpo negro.

O avô informou para elas que, ao final do século XIX, um físico austríaco chamado Josef Stefan⁴, estudando a velocidade com que os corpos se esfriam através das medidas das áreas sob as curvas do espectro de radiação térmica, encontrou uma seguinte relação empírica que comprovava que a intensidade total da radiação, isto é, a energia total por unidade de área e por unidade de tempo emitida por um corpo a uma dada temperatura absoluta (T), era proporcional à quarta potência dessa temperatura, isto é, T^4 . Esse resultado ficou conhecido como lei de Stefan. Posteriormente, em 1884, outro físico também austríaco, Ludwig Boltzmann⁵, demonstrou matematicamente a lei de Stefan. Foi ele quem descobriu o valor da constante na lei. Por isso, desde então a equação fica conhecida por Lei de Stefan-Boltzmann.

— Mas, Vovô, qual era o problema que existia, então, com o corpo negro? Perguntou Vinícius.

— Vejam bem, nessa época, os cientistas buscavam encontrar uma relação que fornecesse uma maneira de calcular a densidade espectral da radiação do corpo negro. Dois cientistas, Lord Rayleigh⁶ e James Jeans⁷, de forma independente

⁴ Joseph Stefan (1835-1893) foi um físico e matemático austro-esloveno. Em 1879 estabeleceu que a radiação total de um corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura. Recebeu o Prêmio Lieben de 1865.

⁵ Ludwig Boltzmann (1844-1906) foi um físico austríaco, conhecido pelo seu trabalho no campo da Mecânica Estatística. É considerado juntamente com Gibbs e Maxwell como o fundador desse campo de estudo. Enfrentou muitas disputas por defender a Teoria Atômica numa época em que a mesma ainda não era bem aceita.

⁶ John William Strutt (1842-1919), também conhecido como o 3º Barão de Rayleigh de Terling Place, Witham, condado de Essex, foi um matemático e físico inglês, conhecido por suas pesquisas em

realizaram trabalhos teóricos nos quais calcularam essa densidade, usando a Física Clássica. Eles usaram um modelo que chegou a uma expressão que dependia da frequência f . Na época, existiam gráficos que mostravam como essa densidade se comportava de acordo com a frequência. Quando a lei de Rayleigh-Jeans foi comparada com os resultados experimentais no limite de baixas frequências estava tudo certo. Mas, no limite de altas frequências, o negócio ficou feio. Enquanto a equação previa uma densidade infinita, os dados empíricos mostravam claramente que a densidade depois de alcançar um máximo, diminuía com o aumento da frequência. Ou seja, como a natureza não poderia estar errada, era a Física usada que estava. Isso foi constrangedor.

– E aí, Vovô? Perguntou Yasmin.

– O enorme desacordo entre a previsão teórica e os dados empíricos foi chamado de “catástrofe do ultravioleta”. O termo colocava em xeque a Física Clássica, pois a situação não se tratava de um erro de construção, era o próprio edifício que estava sem bases para sustentá-lo. Diante da situação criada pela inconveniência da “catástrofe do ultravioleta”, na qual as equações da Física Clássica revelavam-se incapazes de explicar porque isto acontecia, suspeitava-se que o dilema aparentemente não teria solução.

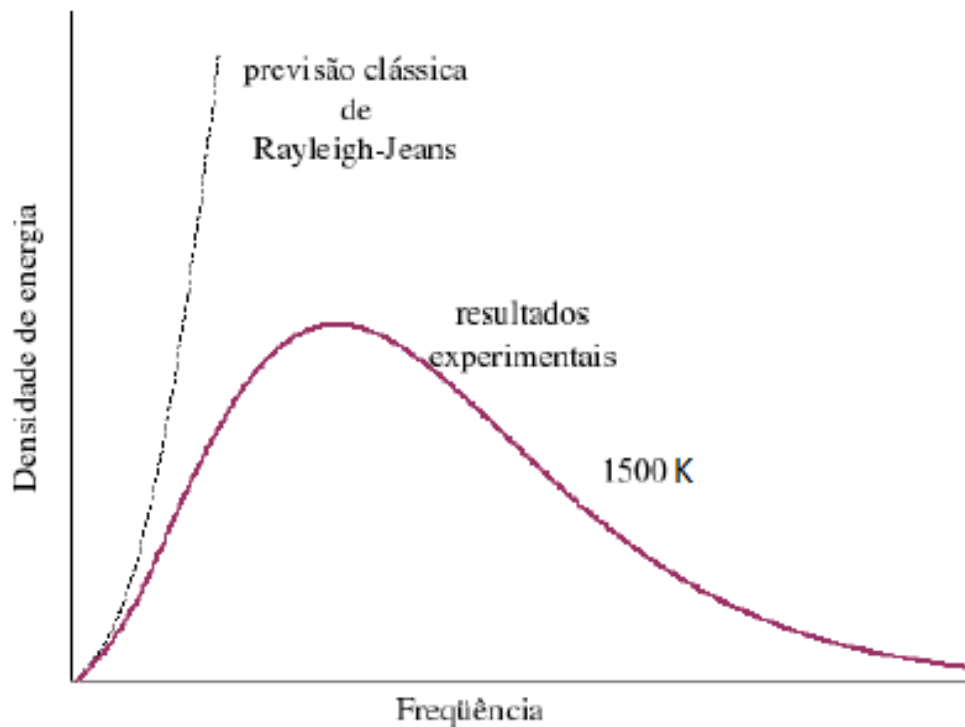
– E ficou sem solução, Vovô? Perguntou Yasmin.

– Claro que não! Mas, precisamos antes de falar sobre isso, conhecer um cientista muito especial nessa história: Max Planck. Falou o avô. Mas, agora vamos descansar um pouco. Por enquanto, pensem nas consequências para a Física que esse dilema causaria.

– Falou-se muito que a Física estava encerrada, mas, desse jeito, a coitada teria um fim melancólico. Argumentou Yasmin.

fenômenos ondulatórios. Foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física de 1904 por ter descoberto o elemento químico argônio.

⁷ James Hopwood Jeans (1877-1946) foi um físico, matemático e astrônomo britânico. Fez contribuições importantes em muitas áreas da física, incluindo a teoria Quântica, a Teoria da radiação e a evolução Estelar.



Comparação do espectro de radiação de corpo negro a 1500 K e a curva clássica de Rayleigh-Jeans, destacando-se assim a "catástrofe ultravioleta". Notemos que, enquanto a densidade de energia, segundo a curva experimental, tende a zero, a previsão teórica indica que a mesma tende a infinito.

Fonte: http://143.54.77.151/blackbody/site/imagens/conhecimento_classico/rJeans_.png

– Mas, a Física não acabou! Então, esse problema foi resolvido! Mas, por que ele demorou tanto tempo para ser resolvido? Perguntou Vinícius.

– É que muitos cientistas na época acreditavam que não havia mais o que se descobrir em Física. Com isso, afastavam seus alunos de pesquisas nesse ramo. Acreditavam que em outras áreas os seus estudantes teriam oportunidade de crescer e, de certo modo, os afastavam da Física. Respondeu Vovô Zeca.

– Mas, todos pensavam assim? Questionou Yasmin.

– Claro que não! Respondeu o avô. Por sorte, alguns cientistas acreditavam que ao menos alguns poucos problemas aguardavam solução para a conclusão da obra. Com isso, ainda havia oportunidade de pesquisa para os jovens físicos. No entanto, nem mesmo esses mais otimistas, esperavam que aquelas conclusões fossem o estopim de grandes revoluções.

– E foram mesmo, Vovô? Perguntou Yasmin.

– Sim, crianças! A solução do problema do corpo negro, obtida por Planck, ao mesmo tempo em que afastava definitivamente o fantasma da “catástrofe do ultravioleta” tornou-se um limite entre o que hoje denominamos de Física Clássica e Física Moderna.

Capítulo 4

Planck

Transcorreram dois dias sem se falar de Física. Apesar da chuva que ainda caía, as férias mereciam atenção especial. O bom disso tudo é que as crianças puderam assimilar os conceitos sem aquela preocupação formal. Afinal, as crianças queriam saber o que era Física Quântica, mas tinha que acontecer aos poucos, visto que a base delas em Física não era suficiente para um estudo aprofundado.

A noite estrelada deu lugar a um céu pesado, com muitas nuvens e aquele friozinho gostoso convidava para tomar um chocolate quente. Desse modo, o clima contribuía para o retorno ao assunto do corpo negro. A pergunta inicial seria: quem foi o responsável por essa revolução? Quem era o tal de Planck?

Vovô Zeca, sentado em uma confortável cadeira, narrava para as crianças um sucinto relato de quem revolucionara a Física no final do século XIX:

– De certa forma, Planck surpreendeu muita gente. Isso pelo fato de que, diferentemente de outros cientistas considerados como gênios da Física, ele veio dar uma grande contribuição a essa Ciência quando já contava com 42 anos de idade. Além do mais, segundo os historiadores, sua carreira foi mais baseada em sua qualidade como gestor. Foi considerado um estimado e respeitado administrador acadêmico.

– Qual era o problema de ele ter 42 anos, Vovô? Perguntou Yasmin.

– Bom, não havia problema algum. Mas, algumas pessoas pensam segundo a ideia que, de acordo com a história da Ciência, muitos cientistas só seriam capazes de criar teorias revolucionárias na idade de vinte e poucos anos ou, até mesmo, menos. Esse preconceito foi oriundo das histórias que se conheciam sobre descobertas feitas por cientistas ainda muito jovens. Isso aconteceu, por exemplo, com gênios como Newton⁸, Einstein⁹, Young¹⁰, Pascal¹¹ e Galois¹². No entanto, isso

⁸ Isaac Newton (1642-1727), astrônomo, físico e matemático inglês, cujas contribuições o tornaram conhecido como um dos maiores nomes da Ciência. Sua famosa obra princípios Naturais da Filosofia Natural, publicada em 1687, descreve as famosas leis de Newton do movimento, que fundamentam a Mecânica Clássica. Ele desenvolveu trabalhos também no campo da Óptica, do Cálculo Infinitesimal, em Teologia e em Alquimia.

não quer dizer que cientistas mais velhos não possam revolucionar teorias científicas. Planck é um exemplo disso.

– Como foi a formação de Planck, Vovô? Perguntou Yasmin.

– Planck nasceu na Alemanha, numa cidade chamada Kiel, no ano de 1858. Estudou Física e Matemática na Universidade de Munique. Posteriormente, seguiu para a Universidade de Berlim. Lá, foi aluno de dois físicos de renome mundial Hermann von Helmholtz¹³ e Gustav Kirchhoff¹⁴. Nessa época, ele teve sua atenção vivamente despertada pelo estudo da termodinâmica. De volta a Munique, onde obteve seu doutorado em 1879, Planck interessou-se pelos tratados de Rudolf Clausius¹⁵. Sua tese versou sobre o segundo princípio da termodinâmica.

– Como ele se tornou professor? Perguntou Vinícius.

– Em 1880, Planck ingressou como professor associado no corpo docente da Universidade de Munique. Voltou para sua cidade natal em 1885, quando foi designado como professor titular da Universidade de Kiel. Foi por volta desse período que ele conheceu um jovem estudante de Física, que se tornou seu

⁹ Albert Einstein (1859-1955), famoso físico teórico alemão, que desenvolveu a Teoria da Relatividade Geral, um dos pilares da Física Moderna, ao lado da Física Quântica. Foi agraciado em 1921 com o Prêmio Nobel de Física por seus trabalhos em Física Teórica, particularmente pela explicação do efeito fotoelétrico. Possui inúmeras contribuições à Física, o que o colocam num *status* diferenciado, como um dos maiores cientistas que a humanidade já conheceu.

¹⁰ Thomas Young (1773-1829), médico e físico inglês, conhecido principalmente por, através de suas primeiras experiências sobre interferência de luz, realizadas em 1800, ter demonstrado de forma conclusiva que a luz é um fenômeno ondulatório.

¹¹ Blaise Pascal (1623-1662), matemático, físico e filósofo francês, que aos 11 anos já se destacava escrevendo um tratado sobre o som e, aos 17, formulou o célebre Teorema que leva o seu nome.

¹² Évariste Galois (1811-1832), eminente matemático francês que, apesar de ter falecido aos 20 anos, vítima de um duelo, deixou importante contribuição à Ciência, particularmente criando uma nova área na álgebra abstrata, a teoria de grupos.

¹³ Hermann von Helmholtz (1821-1894), matemático, médico e físico alemão. Contribuiu na Física com teorias da conservação da energia, em eletrodinâmica, termodinâmica química e na fundamentação mecânica para a termodinâmica. Foi considerado um dos mais eminentes cientistas do século XIX.

¹⁴ Gustav Kirchhoff (1824-1887), físico alemão com contribuições importantes nos campos de circuitos elétricos, espectroscopia, emissão de radiação de corpo negro e teoria da elasticidade.

¹⁵ Rudolf Clausius (1822-1888), físico e matemático alemão, considerado um dos fundadores da Termodinâmica. Seu artigo mais importante, *Sobre a teoria mecânica do calor*, publicado em 1850, expôs pela primeira vez as ideias básicas da segunda lei da Termodinâmica. Foi ele que, em 1865, introduziu o conceito de Entropia.

colaborador por cerca de 40 anos, Wilhelm Wien¹⁶. Em 1889, Planck retornou para a Universidade de Berlim e após dois anos foi nomeado professor de Física Teórica, substituindo Gustav Kirchhoff, que havia falecido em 1887. Desta feita, sua reputação já havia crescido, de modo que o próprio Helmholtz o indicara para a cátedra. De 1905 a 1909, Planck atuou como diretor-chefe da Sociedade Alemã de Física. Em 1913, ele foi nomeado reitor da Universidade de Berlim. Como consequência do seu trabalho que marcou o nascimento da Física Quântica, foi premiado em 1918 com o Nobel de Física. Aposentou-se em 1926 e, de 1930 a 1937, ocupou o cargo de presidente da Sociedade para o Avanço da Ciência do Imperador Guilherme. Planck faleceu em 4 de outubro de 1947 em Göttingen. Em uma justa homenagem, a Sociedade que presidiu por anos foi rebatizada como Sociedade Max Planck para o Progresso da Ciência.

– O que inspirou Planck a resolver o problema da radiação de corpo negro? Perguntou Vinícius.

– A inspiração fundamental para a Teoria Quântica reside na observação do fenômeno de quantização, ou seja, grandezas físicas apresentam-se em estados discretos (os chamados *quanta*). Porém, é importante destacar que, no séc. XIX, já se conhecia o conceito de quantização: Michael Faraday havia demonstrado que as cargas iônicas adquiridas em soluções eletrolíticas eram múltiplas de uma unidade básica indivisível. Era da compreensão dos físicos também que, se a matéria fosse examinada profundamente em sua intimidade, esta exibiria uma composição discreta, supostamente constituída por moléculas e átomos. Esse modelo microscópico foi utilizado na formulação da Teoria Cinética dos Gases. Porém, apesar das quantizações da matéria e da carga elétrica já serem aceitas ao final do séc. XIX isto não direcionava para uma nova teoria fundamental, como a Teoria Quântica. Coube a Planck a honra de instituir de fato uma revolução na Física, ao visualizar a quantização de energia num oscilador harmônico.

– Oscilador harmônico? Perguntou Vinícius.

– No modelo usado, Planck considerou a interação de radiação numa cavidade, lançando mão do modelo do oscilador harmônico carregado, de carga q ,

¹⁶ Wilhelm Wien (1864-1928), físico alemão que deduziu, utilizando as teorias de Termodinâmica e Eletromagnetismo, a lei do deslocamento que leva o seu nome, que permite calcular a emissão de radiação de corpo negro para qualquer temperatura absoluta T .

massa m e de frequência f . Por hoje, já está tarde. Amanhã, poderemos falar mais sobre a solução de Planck. Respondeu Vovô Zeca.

Capítulo 5

A solução de Planck

Chegou finalmente o sábado. Naquele dia, as crianças não queriam mais nada a não ser brincar na água. Só que dessa vez não era água de chuva, mas do riacho. Todos saíram logo cedo, levaram lanche, almoço, todos os apetrechos para passar um dia feliz.

No final da tarde, o Sol se pôs dando aquele aspecto bucólico ao ambiente. Foi inevitável lembrar-se da Praia do Jacaré e daquele espetáculo proporcionado pelo Sol ao som do Bolero de Ravel.

Chegando a casa, o sono bateu. Foi um lindo dia, digno de férias bem curtidas. Apesar da energia das crianças propiciarem desejo de brincadeiras e correria, o sono venciu rapidamente os demais e todos foram para a cama. Não necessariamente dormir. Vinícius e Yasmin estavam bem acordados.

— Yasmin, esse negócio de radiação é muito estranho, não é? Perguntou Vinícius.

— É! Imaginar que a energia pode ser transmitida assim, através de ondas, indo de um lugar a outro, causando efeitos tão diversos. Comentou Yasmin

— E por que esse problema da radiação de corpo negro? A Física parecia descrever tão bem esses fenômenos. Disse Vinícius.

— Vovô falou que a Física pode resolver a questão. A Física clássica é que não conseguia explicar o fenômeno. Amanhã, ele vai dizer o que Planck fez para resolver isso. Completou Yasmin.

As crianças ainda ficaram um bom tempo conversando na cama, pensando em muitas coisas, antes de dormir. Mas, uma das coisas que terminou habitando seus sonhos foi a lembrança da tal manta quântica.



Na manhã seguinte, logo após o café da manhã, Vovô Zeca lia o jornal na biblioteca quando as crianças chegaram ansiosas por, finalmente, entender como terminou aquela história de Planck.

— Vovô! Vovô! O senhor vai dizer agora como Planck resolveu o problema do corpo negro? Perguntou Vinícius.

— Vocês já tomaram café?

— Claro, Vovô! Responderam em coro.

— Bem, então vamos lá. Começou o avô a falar. Planck pretendia encontrar uma função para a densidade de energia que estivesse de acordo com os dados experimentais. Para isso, ele inicialmente procurou uma função empírica que se ajustasse aos dados. Em seguida, procurou uma maneira de modificar o cálculo que era feito para a determinação da densidade de energia de modo a obter teoricamente esta fórmula empírica. É como se vocês vissem a resposta do exercício no fim do livro e fossem modificar os cálculos para chegar àquele resultado. Mas, no caso de Planck, a situação era muito mais complicada.

— Mas, isso está certo, Vovô? Perguntou Yasmin.

— Olha, crianças, pode não ser o método que mereça mais aplausos, mas era o que Planck podia fazer. E, claro, se desse certo, depois teria que haver um embasamento teórico daquele resultado. O que não podia acontecer é ficar de braços fechados sem solucionar o problema.

— Mas, como ele fez isso, Vovô? Perguntou Yasmin.

— Em sua dedução, Planck começou estabelecendo uma relação entre a energia média de uma cavidade ressonante de frequência f e a energia radiante incidente na mesma frequência. Usando a eletrodinâmica, ele obteve a mesma relação encontrada por Lord Rayleigh.

— Mas isso o Lord já tinha encontrado! Resmungou Yasmin.

— Só que, a partir daí, considerando que a energia do oscilador está associada ao quadrado da amplitude das oscilações, podendo ser positiva, negativa ou até nula, Planck introduziu uma modificação no cálculo do valor médio da energia que fez a diferença em relação ao que tinha sido levado em consideração nos cálculos realizados por outros físicos. Ele propôs o seguinte postulado: qualquer

oscilador harmônico simples pode possuir apenas energias totais e que satisfaçam a relação:

$$E_n = nhf, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

na qual f é a frequência de oscilação, e h uma constante universal que hoje é conhecida por constante de Planck e vale $(6,625673 \pm 0,000180) \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$.

– Essa é tal hipótese quântica? Perguntou Vinícius.

– Exatamente. Respondeu o avô. A energia do oscilador que obedece ao postulado de Planck é dita ser quantizada, os estados de energia (discretos) permissíveis são denominados estados quânticos e o inteiro n , o número quântico. E o valor da energia para $n=1$ é chamado de *quantum*. O plural de *quantum* é *quanta*. E a partir daí, surgiu o termo quântico ou quântica: oscilador quântico, energia quântica, Física Quântica.

– E manta quântica? Perguntou Yasmin.

– Vamos com calma, que logo chegaremos nesse ponto.

– Vovô, estou meio confuso. Por que outras pessoas não fizeram isso antes de Planck? Perguntou Vinícius.

– Podemos pensar em muitos motivos. Primeiro, Planck dominava muito bem a Termodinâmica. Segundo, foi preciso coragem formular uma hipótese dessas sem ter ainda uma consistência teórica. O próprio Planck não tinha muita certeza do seu resultado. Ele se mostrava meio cismado achando que a qualquer momento poderia cair por terra seu argumento.

– Mas, o que Planck fez de diferente com essa hipótese? Perguntou Vinícius.

– Como na hipótese de Planck os valores de energia são múltiplos inteiros de uma quantidade elementar (o *quantum*) hf , ele refez o cálculo feito por Lord Rayleigh, só que utilizando agora um novo valor médio para a energia e usando uma distribuição de probabilidade discreta, o que fez a diferença. Ele tratou o sistema não mais como contínuo e sim discreto. Isso influenciou os cálculos e o novo cálculo da energia média levou a uma expressão que descreve a distribuição de energia da radiação do corpo negro de modo eficaz. Essa expressão obtida por Planck

concordava plenamente com os dados experimentais e resolvia a controvérsia da “catástrofe do ultravioleta”.

– Como se sabe disso? Questionou Yasmin.

– Na equação encontrada, tomaram-se os limites assintóticos.

– O que é isso? Perguntou Yasmin.

– São os limites de uma equação para valores extremos. Nesse caso, o que acontece quando a frequência tende a infinito ou a zero. Na expressão obtida por Planck, se tomarmos o limite $f \rightarrow \infty$, verificamos que a densidade de energia tende a zero, o que confirma os dados empíricos e enterra a “catástrofe do ultravioleta”. Também, se calcularmos a densidade de energia total, podemos verificar que o resultado está de acordo com a equação de Stefan-Boltzmann. Respondeu o avô.

– Vovô, como a Física é fantástica! Exultaram as crianças.

– É mesmo, crianças! E foi assim que nasceu a Física Quântica! No seu trabalho, Planck mostrou ainda que quanto mais alta fosse a frequência, menos provável seria a radiação, uma vez que a emissão de radiação de frequência mais alta requer mais energia para formar um pacote de radiação (*quantum*). Um *quantum* de luz violeta (frequência alta), por exemplo, deveria conter duas vezes mais energia que um *quantum* de luz vermelha (frequência baixa). Em consequência disso, quando um corpo negro radia, este não tende a emitir igualmente todas as frequências. Desse modo, embora as frequências altas sejam muitas, suas exigências de energia quântica tornam sua radiação improvável, resultando em que a “catástrofe do ultravioleta” não tem como ocorrer quando consideramos a hipótese quântica. Completou o avô.

– Isso foi muito importante, não é, Vovô? Perguntou Yasmin.

– Sim, Yasmin. Resolvendo o problema da radiação do corpo negro, Planck estabeleceu o conceito fundamental sobre o qual a Teoria Quântica poderia ser construída. Numa reunião, ocorrida a 14 de dezembro de 1900, na Sociedade Alemã de Física, Planck apresentou seu trabalho. Assim, surgiu a chamada Teoria Quântica. Nessa famosa reunião, Planck mostrou que a matéria absorve energia térmica e emite energia luminosa de maneira descontínua. Isto não apenas foi

suficiente para explicar a radiação do corpo negro, mas também para abrir horizontes que nem o mais visionário dos físicos da época poderia imaginar. Graças a esse trabalho, Planck foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física de 1918. A comunidade científica reconhecia, então, Planck como o responsável pela origem da Teoria Quântica. Explicou o avô.

Como tinha sido muita informação para um dia só, o avô aconselhou às crianças que fossem brincar o resto do dia. Mais Física Quântica só no dia seguinte. Afinal de contas, é preciso relaxar um pouco. Um pouco, não! Um bocado! Porque, mesmo aprendendo alguma coisa, férias são férias!

Capítulo 6

Einstein

As crianças acordaram cedo no dia seguinte. Para a felicidade delas, não choveu. Tomaram o café da manhã e partiram para o quintal para brincar.

Enquanto Alice preparava algo delicioso para elas lancharem e um almoço bem gostoso, Vovô Zeca foi ao mercado. Assim, todos estavam bem ocupados naquela manhã.

Mesmo com o passar das horas, as crianças não pareciam se cansar. A brincadeira parecia não ter fim. Lancharam ali mesmo no quintal e continuaram.

Por volta de meio-dia, Vovô Zeca chegou do mercado. Foram feitos os últimos preparativos para o almoço e, a muito contragosto, as crianças tiveram de parar a brincadeira e tomar banho para almoçar.

Depois do almoço, começou a dar aquela preguiça em todos. Foram ver algo na televisão. A meteorologia previa uma tarde de muita chuva. Aquele anúncio lembrou as nuvenzinhas e as crianças logo questionaram o avô:

– Acabou a história das nuvenzinhas? E a Física morreu?

– Que nada! Aí é que ela ganhou impulso. Respondeu o avô.

– Mas, o Lord Kelvin não tinha dito que, resolvendo essas duas nuvenzinhas, a Física estaria encerrada? Indagaram as crianças.

– Felizmente, a coisa não foi bem assim. A solução do problema da radiação de corpo negro foi só o começo de uma revolução no mundo científico. Pode-se até dizer que, se a Física estava moribunda, ela se levantou com mais ânimo disposta a viver por muitos séculos ainda. Enfatizou o avô.

– E como foi isso?

– Olha só! Embora o próprio Planck tivesse receio da sua hipótese, achando que se tratava de um simples truque matemático, outros cientistas, algum tempo depois demonstrariam que existia toda uma teoria consistente baseada em argumentos fortes que daria sustentação ao seu trabalho. Mas, antes disso, alguns cientistas renomados já estavam utilizando a hipótese quântica e, embora ainda

reticentes, obtinham resultados que estavam de acordo com o que a natureza apresentava. Explicou o avô.

– Que cientistas foram esses, Vovô?

– Albert Einstein, Niels Bohr¹⁷, por exemplo. Respondeu o avô.

O avô, então continuou:

– Lembram-se de Einstein?

– Sim, aquele velhinho com a língua de fora!

– Bem, ele ficou famoso por aquela foto, mas já falamos sobre isso. Aquele foi um momento de rebeldia do gênio. Einstein, na verdade, ficou famoso mesmo por suas contribuições científicas. Dentre elas, a teoria da relatividade. Mas isso é assunto para outra história. Vamos voltar para a Teoria Quântica. Disse-lhes o avô.

– O que Einstein fez, Vovô? Indagou Yasmin.

– No início do século XX, existia um problema que intrigava os físicos chamado de efeito fotoelétrico. No final do século anterior, Hertz¹⁸ havia produzido ondas eletromagnéticas em laboratório, o que corroborou com a Teoria Eletrodinâmica de Maxwell e, naquele momento, colocava a luz como radiação e não corpúsculo! Mas, naquele mesmo experimento surgiu uma nuvenzinha: Hertz percebeu que elétrons eram emitidos por placas de metal polido quando eram atingidas por radiação.

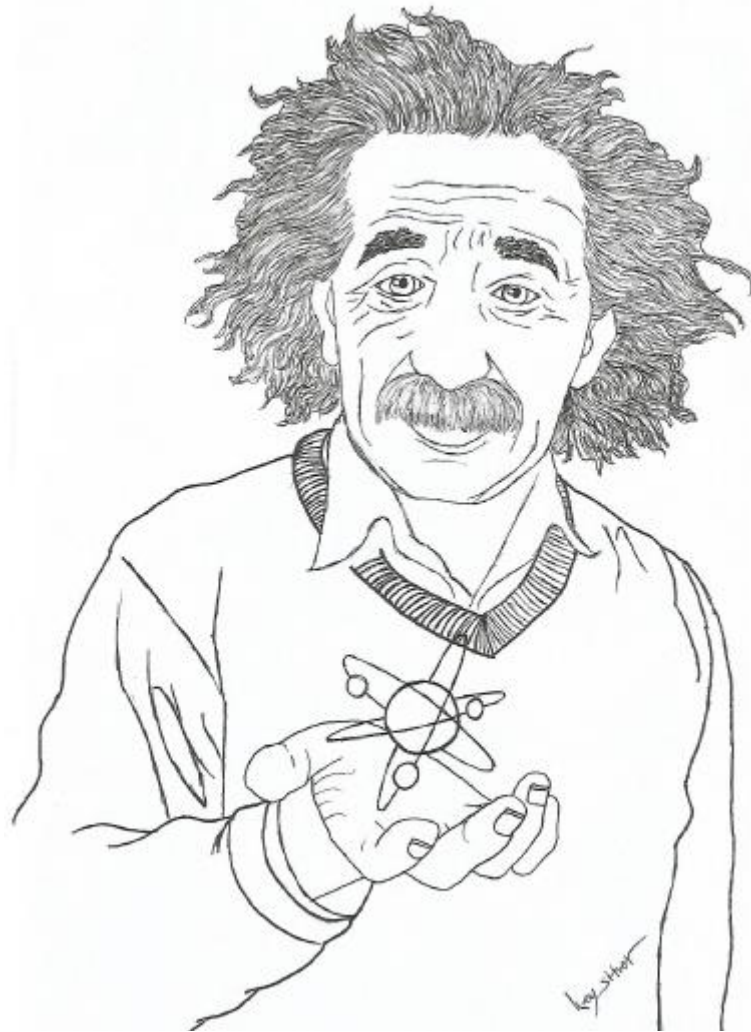
– Como ele sabia que eram elétrons? Indagou Yasmin.

– Ele notou que uma corrente elétrica era produzida. E, considerando os conhecimentos disponíveis na época, percebeu que não havia emissão de íons positivos.

– Qualquer placa sempre faz isso, Vovô? Perguntou Vinícius.

¹⁷ Niels Bohr (1885-1962), físico dinamarquês cujos trabalhos contribuíram significativamente para a compreensão da Física Atômica e da Física Quântica. Travou brilhantes debates com Einstein sobre o tema. Foi agraciado em 1922 com o Prêmio Nobel de Física por suas investigações sobre a estrutura do átomo.

¹⁸ Heinrich Hertz (1857-1894), físico alemão, que demonstrou a existência da radiação eletromagnética, criando aparelhos emissores e detectores de ondas de rádio. Ele comprovou experimentalmente, em 1888, a existência das ondas eletromagnéticas propostas teoricamente por Maxwell em 1873.



Albert Einstein, formulador da Teoria da Relatividade, explicou o efeito fotoelétrico, utilizando a hipótese quântica de Planck.

Ilustração: Sthéfany Reis Negromonte

— Não. O mistério era que a emissão dependia da frequência da radiação incidente. E, mesmo assim, apenas luz com determinada frequência produzia essa emissão. Além do mais, essa determinada frequência é diferente dependendo do material de que é feita a placa. Respondeu o avô.

— Então, quer dizer que se a placa for de zinco ou de alumínio, uma pode emitir elétrons e outra não, para uma dada frequência? Indagou Yasmin.

— Exatamente! Mas, o que mais causava admiração era que a energia desses elétrons emitidos não dependia da intensidade da fonte de radiação, como era

esperado. Na verdade, ela variava linearmente com a frequência dela. Era mais uma nuvenzinha que a Física Clássica não conseguia explicar. Continuou Vovô Zeca.

– E aí, Vovô? Isso foi resolvido como? Indagou Yasmin.

– Inspirado na hipótese de Planck, Einstein considerou a radiação incidente sobre a placa metálica como uma coleção de *quanta* de energia hf . Assim, ele considerava que o elétron absorvia a energia de um *quantum* (hf) e isso aumentava sua energia. Parte dessa energia seria usada para retirar o elétron do metal e, outra parte, ficaria como energia cinética disponível para o elétron. A primeira parte foi chamada por Einstein de função trabalho. Por isso que, para dadas frequências, não havia emissão: tinha que haver energia suficiente para vencer a função trabalho, senão não havia emissão de elétrons. Explicou Vovô Zeca.

– Isso explicou o efeito fotoelétrico? Indagou Yasmin.

– Sim, Einstein igualando a energia cinética dos elétrons emitidos, que são chamados de fotoelétrons, à energia hf menos a função trabalho, obteve a equação que mostra a proporcionalidade entre a energia cinética dos fotoelétrons e a frequência da radiação incidente.

– Isso foi comprovado, Vovô? Indagou Yasmin.

– Sim. Millikan¹⁹, um cientista norte-americano, fez experiências muito meticulosas e comprovou a exatidão da fórmula de Einstein. Inclusive, é bom destacar que foi por essa explicação do efeito fotoelétrico, publicada em 1905, que Einstein ganhou o Prêmio Nobel de Física de 1921. Dos desenvolvimentos posteriores desse e de outros trabalhos de Einstein resultaram a teoria de *lasers*, o que produziu um grande avanço tecnológico no século XX.

– Gozado, Vovô. Eu pensei que Einstein tinha recebido o Prêmio Nobel de Física por causa da Teoria da Relatividade. Comentou Yasmin.

– Muita gente pensa isso. Mas, não foi. Respondeu o avô.

– Que estranho, Vovô! Comentou Vinícius.

¹⁹ Robert Andrews Millikan (1868-1953), eminente físico experimental norte-americano, que recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1923, por seus trabalhos sobre a carga elementar e sobre o efeito fotoelétrico.

– Estranho é. Mas, houve uma questão política aí. Como Einstein e outros cientistas de origem judaica eram perseguidos na época, havia o receio de que, se não fosse comprovada a Teoria da Relatividade, tentassem tirar o Prêmio dele. A primeira comprovação da Relatividade só veio alguns anos após a premiação e, o efeito fotoelétrico, já tinha sido testado, comprovado e garantido, já que o Planck, mesmo reticente quanto à hipótese quântica, já tinha recebido o Prêmio Nobel de Física de 1918 por sua solução do problema da radiação de corpo negro. Respondeu o avô.

A essa altura, chovia torrencialmente. Parecia que as brincadeiras teriam que ficar para outro dia. Mas, todos esses pensamentos sumiram quando surgiu da cozinha aquele maravilhoso cheirinho de sopa. Nada mais acolhedor do que uma sopa quentinha e gostosa num dia frio como aquele.

Todos correram para a cozinha e, mesmo não sendo ainda hora do jantar, fizeram questão de ficar na cozinha se inebriando com aquele cheirinho de sopa e comendo uma bela fatia do bolo de cenoura, enquanto esperavam para se fartar no que prometia ser um banquete dos deuses.

Capítulo 7

Louis de Broglie

O domingo chegou com muita expectativa. Muito sol, o que fez todos se esquecerem de tudo e passarem o dia brincando ao ar livre. Brincadeiras, corridas, banho de sol, de riacho, tudo o que se esperava das férias.

Os raios de sol espalhavam felicidade por todo horizonte. Nada como um belo dia para admirar as maravilhas da natureza.

O resto do dia se seguiu preguiçoso. À noite, uma roda de conversa em torno de uma fogueirinha e um sono tranquilo e reparador para todos.

A segunda-feira também começou preguiçosa. Mas, depois do almoço, a curiosidade das crianças despertou.

– Vovô, no colégio a gente aprendeu que as radiações eletromagnéticas, entre elas a luz, seria um fenômeno exclusivamente de propagação de ondas. Mas, sabemos agora que esse conceito tradicional foi contestado por Planck quando de sua hipótese quântica e depois por Einstein, que a usou na explicação do efeito fotoelétrico. Para eles, a radiação, sob determinadas circunstâncias, apresentava características de partículas, os *quanta*. Afinal de contas, quem está com a razão? Questionou Vinícius.

– Na verdade, os dois lados têm razão. Respondeu o avô.

– Como assim? Questionou Vinícius.

– Vejam bem, não era unanimidade a aceitação da Teoria Corpuscular da Luz. Por isso, algumas vezes, nas escolas e universidades, as duas teorias (Ondulatória e Corpuscular) eram ensinadas ao mesmo tempo. Esse era o quadro de discussão em 1924. A contribuição que pôs fim a essa discussão veio da tese de doutorado de um príncipe, chamado Louis de Broglie²⁰. Respondeu o avô.

– Príncipe? Perguntou Yasmin.

²⁰ Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (1892-1987), físico francês que, em 1924, postulou que partículas também possuíam um comprimento de onda. Estudos experimentais comprovaram sua previsão teórica, estabelecendo a dualidade onda-partícula da matéria. Em 1929, recebeu o Prêmio Nobel de Física pela descoberta da natureza ondulatória do elétron.



Louis de Broglie, em sua tese de doutorado, previu a natureza ondulatória da matéria.

Ilustração: Sthéfany Reis Negromonte

— Louis de Broglie era descendente de uma família nobre (seu tetravô foi executado na guilhotina durante a Revolução Francesa). Começou sua carreira acadêmica se graduando em História, porém o entusiasmo pela Física demonstrado pelo seu irmão, Maurice de Broglie, o fez prestar muita atenção nos trabalhos experimentais da época, em especial, às ideias de Compton. Compton realizou experiências nas quais forneceu a mais direta evidência da natureza corpuscular da luz. Mostrou que radiações de frequências na região dos raios X, enviadas através de uma folha de metal eram espalhadas. Considerou a radiação incidente como sendo constituída de fótons de energia hf . Cada fóton sendo, então, espalhamento elasticamente por um único elétron. Respondeu o avô.

— Mas, se esse Louis de Broglie não era físico, como ele contribuiu com a discussão? Perguntou Yasmin.

– Podia ser que ele inicialmente não fosse físico, mas se dedicou com tanto afinco à Física que se tornou estudante de pós-graduação na área. Em pouco tempo, de Broglie apresentou à Faculdade de Ciências da Universidade de Paris sua tese de doutorado propondo a existência de ondas de matéria. Explicou o avô.

– Ondas de matéria? Agora complicou tudo! Onda é radiação e matéria é matéria! Como podem existir ondas de matéria? Perguntou Vinícius.

– Bem, eu sei que é difícil, à primeira vista, compreender isso. Até mesmo a banca examinadora não entendia a ideia revolucionária de de Broglie. Iam inclusive rejeitar sua tese, só que tiveram a ideia de consultar Einstein sobre o assunto. Um membro da banca enviou a ele uma cópia do trabalho pedindo sua opinião.

– E o que Einstein disse? Perguntou Vinícius.

– Em uma carta, Einstein afirmou que o trabalho não era apenas uma tese aceitável, mas também algo brilhante. Com essa aprovação dele, a banca não teve dúvidas em conceder a aprovação a tese de de Broglie. Não foi só o doutorado que de Broglie conseguiu com o seu trabalho, mas devido à importância do mesmo, recebeu também o Prêmio Nobel de Física de 1929. Concluiu o avô.

– E o que foi exatamente que ele fez, Vovô? Perguntou Yasmin.

– A hipótese de de Broglie sugeria que a natureza dual onda-partícula da radiação deveria ter sua contrapartida em uma natureza dual partícula-onda da matéria. Sendo assim, as partículas materiais deveriam apresentar, sob certas circunstâncias, propriedades ondulatórias. Ele então sugeriu que uma partícula de momento \vec{p} teria associado a si uma onda cujo comprimento de onda λ seria relacionado com a intensidade de p através da relação

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

que é análoga à que existe para o fóton. Na verdade, uma partícula livre de massa m e velocidade v tem um comprimento de onda de de Broglie

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

para o caso especial não-relativístico. O trabalho de de Broglie atraiu grande atenção e muitos físicos acreditavam que sua verificação experimental poderia ser obtida observando-se a difração de elétrons. Estas evidências foram obtidas em

1927 em dois laboratórios diferentes: nos Estados Unidos, C. J. Davisson²¹ e L. H. Germer²² e, e na Escócia, G. P. Thomson²³ (filho de J. J. Thomson²⁴) demonstraram os efeitos da difração de elétrons e obtiveram resultados que estavam em completo acordo com a teoria de de Broglie. Explicou Vovô Zeca.

– Elétron se difrata como se fosse uma onda, Vovô? Perguntou Vinícius.

– Sim. Davisson e Germer estudaram o espalhamento de elétrons pelo níquel utilizando uma técnica semelhante às que Rutherford e Compton empregaram nos espalhamentos de partículas α e de raios X, respectivamente. Eles dirigiram um feixe de elétrons sobre um bloco de níquel e mediram a intensidade do feixe em diversas direções. Tanto a energia do feixe incidente como o ângulo de incidência sobre o alvo e a posição do detector poderiam variar. Classicamente, esperava-se que os elétrons espalhados emergissem em todas as direções com intensidades dependendo apenas moderadamente de ângulo de espalhamento. Inicialmente, foi isso que eles verificaram. Porém, quis o destino que ocorresse um acidente no sistema de vácuo permitindo a entrada de ar no aparelho e a consequente oxidação da superfície do metal. Com o intuito de reduzir o óxido, eles colocaram o bloco em um forno a alta temperatura. Montando o aparelho novamente, os resultados obtidos passaram a ser muito diferentes daqueles de antes do acidente: enquanto o número de elétrons espalhados diminuía continuamente à medida que o ângulo de espalhamento crescia observaram-se máximos e mínimos cujas posições dependiam da energia dos elétrons, ou seja, estes se difratavam! Explicou Vovô Zeca.

– Uau! Que irado! Exclamou Vinícius. Outras partículas também podem difratar.

– Os elétrons não são as únicas partículas cujo comportamento ondulatório pôde ser demonstrado. Observou-se também difração de nêutrons e, até mesmo, de átomos inteiros quando espalhados por cristais adequados.

²¹ Clinton Joseph Davisson (1881-1958), físico norte-americano que ganhou em 1937 o Prêmio Nobel de Física de 1937, juntamente com G. P. Thomson, pelos seus trabalhos sobre a difração de elétrons por cristais.

²² Lester Halbert Germer (1896-1971), físico norte-americano que trabalhou com C. J. Davisson no experimento que comprovou a dualidade onda-partícula.

²³ George Pagar Thomson (1892-1975), físico britânico agraciado, juntamente com C. J. Davisson, com o Prêmio Nobel de Física de 1937, pelos seus trabalhos sobre a difração de elétrons por cristais.

²⁴ Joseph John Thomson (1856-1940), físico britânico, descobridor do elétron. Em 1906, foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física pelos seus trabalhos sobre a condutividade elétrica dos gases.

– Puxa, que legal! Exclamou Yasmin.

– Independentemente, também em 1927, G. P. Thomson mostrou a difração de feixes de elétrons que passaram através de filmes finos e confirmou detalhadamente a relação de de Broglie $\lambda = h/p$. Em 1937, ele e Davisson receberam o Prêmio Nobel de Física por estas experiências. É curioso observar que J. J. Thomson recebeu o Prêmio Nobel por mostrar que o elétron seria uma partícula e G. P. Thomson por mostrar que este seria uma onda.

– Que onda! Pai e filho ganhando Prêmio Nobel! Exclamou Yasmin

– É! E tem mais! Hoje, sabemos que todos os objetos materiais apresentam características ondulatórias em seu movimento, quando estão sob as condições da Óptica. Niels Bohr, com o princípio da complementaridade, esclareceu que os modelos corpuscular e ondulatório se complementam: se uma medida provar o caráter ondulatório da radiação ou da matéria, então será impossível, na mesma medida, provar o caráter corpuscular, e vice-versa. Sendo assim, a radiação e a matéria não são apenas ondas ou apenas partículas. A ligação entre os modelos é feita através de uma interpretação probabilística da dualidade onda-partícula. Foi Einstein que unificou as Teorias Ondulatória e Corpuscular no caso da radiação, enquanto que Max Born o fez para o caso da matéria. Concluiu Vovô Zeca.

Capítulo 8

Heisenberg

Alguns dias depois de saber que a matéria exibia complementarmente propriedades ondulatórias, as crianças conversavam na biblioteca do avô sobre o tema. Vinícius folheando um livro de Física viu o nome de cientistas que trabalharam nos fundamentos da Física Quântica que não haviam sido citados por Vovô Zeca. Logo Vovô Zeca chegou, ele indagou quem era Heisenberg. Seu avô respondeu que:

– Werner Heisenberg²⁵ foi um cientista alemão, nascido em 5 de dezembro de 1901, praticamente 1 ano após a famosa palestra de Planck. Heisenberg tentou ingressar na Universidade de Munique, em 1920, para estudar Matemática, mas não foi aceito. Todavia, o físico Arnold Sommerfeld²⁶ o guiou nos mistérios da Física Teórica. Sorte dele, pois o Instituto de Sommerfeld era o único na Alemanha a enfatizar a Teoria Quântica de Física Atômica. Foi nele que Heisenberg conheceu seu colaborador e, às vezes, crítico Wolfgang Pauli²⁷.

– Então quer dizer que nem todas as universidades ensinavam a Teoria Quântica! Exclamou Yasmin.

– Devemos lembrar que a Física Quântica ainda era uma novidade e que muitos cientistas ainda não concordavam com ela àquela época. Disse o avô.

– E como Heisenberg encarava isso? perguntou Vinícius.

– Heisenberg teve problemas para obter o título de doutor. O físico teórico Wilhelm Wien ficou chocado com a falta de conhecimento sobre tópicos simples de

²⁵ Werner Karl Heisenberg (1901-1976), físico alemão que desempenhou importante papel na formulação da Teoria Quântica. Em 1925, criou uma formulação para a teoria Quântica baseada em matrizes, cujo produto não é comutativo, que lhe valeu o Prêmio Nobel de Física de 1932. Descobriu em 1927 o Princípio da Incerteza, que não permite a determinação simultânea, com grande precisão, de pares de grandezas físicas chamadas de conjugadas.

²⁶ Arnold Sommerfeld (1868-1951), físico teórico alemão. Foi um dos fundadores da Mecânica Quântica. Foi co-autor na descoberta da lei de quantização de Wilson-Sommerfeld, na qual faz, uma generalização do modelo atômico de Niels Bohr. Seu livro *Estrutura atômica e linhas espectrais*, publicado em 1919, tornou-se um clássico.

²⁷ Wolfgang Pauli (1900-1958) foi um renomado físico austríaco, desenvolveu trabalhos no campo da Mecânica Quântica, inclusive no estudo do spin do elétron. Em 1945, foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física, pela descoberta do Princípio da Exclusão.

Física Básica demonstrada por Heisenberg numa arguição oral. Devemos lembrar que ele era mais atraído pela Matemática do que pela Física. Mas, Wien não queria saber disso. Só com muitos apelos de Sommerfeld é que Wien o aprovou. Mas, Heisenberg saiu da Universidade de Munique com a menor nota que lhe possibilitaria alcançar o grau de doutor. Foi algo bastante constrangedor. Explicou o avô.

– E aí, Vovô? Ele desistiu? Perguntou Yasmin.

– Não! Ele deu sorte mais uma vez. Conheceu Bohr numa série de palestras e este o convidou para trabalhar em Copenhague. Claro que Heisenberg não teve dúvidas em mudar-se. Mas, antes disso, ele trabalhou em Göttingen com Max Born²⁸. Depois, em 1926, aceitando o convite de Bohr, transferiu-se para o Instituto de Física Teórica de Copenhague onde passou a ser assistente deste. Continuou o avô.

– Trabalhando com Bohr ele deve ter ido longe, não é, Vovô? Perguntou Vinícius.

– Sim, crianças. Num ambiente propício e tendo a confiança de Bohr, que foi um grande defensor da Teoria Quântica, Heisenberg teve oportunidade de formular o trabalho que o destacou naquele momento de grandes descobertas. Na primavera de 1927, Heisenberg, então com 26 anos, escreveu um texto de 27 páginas e o enviou à revista *Zeitschrift für Physik*, contendo a formulação do famoso princípio da incerteza. Assim, ele conseguiu assegurar para si um lugar na História da Ciência. O princípio da incerteza delimita nossa habilidade de fazer medidas precisas de propriedades observáveis de uma partícula quântica.

– E como é isso? Perguntaram em coro Vinícius e Yasmin.

– A teoria afirma que a posição de um elétron (\vec{r}) e a orientação do momento linear (\vec{p}) não podem ser especificados com precisão em certo instante de tempo. A relação de incerteza mostra que uma coordenada x e seu momento conjugado p_x têm incertezas Δ_x e Δp_x , respectivamente, satisfazendo à desigualdade

²⁸ Max Born (1882-19700, físico e matemático alemão, cujo trabalho foi fundamental para o desenvolvimento da Mecânica Quântica. Também fez contribuições à física do Estado Sólido, e Óptica. Foi supervisor do trabalho de vários físicos notáveis nas décadas de 1920 e 1930. Foi agracado em 1954 com o Prêmio Nobel de Física, pela interpretação estatística da função de onda.

$$\Delta_x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}, \text{ onde } \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Se considerarmos as outras dimensões espaciais (y e z), os pares (y, p_y) e (z, p_z) apresentam relações idênticas. O significado físico disto é que não se pode, simultaneamente, medir ambos, posição e momento, com perfeita exatidão. Se Δ_x for pequena Δp_x será grande e vice-versa. Tais incertezas não se encontram nos aparelhos de medida, mas sim na natureza. Explicou o avô.

– Mais um mistério da Física, Vovô? Perguntaram em coro Vinícius e Yasmin.

– Eu diria que um mistério da natureza, mas que através da Física podemos senão entendê-lo, pelo menos descrevê-lo. Mas, Heisenberg também mostrou que uma medida de energia de uma partícula (ou de qualquer sistema) realizada durante um intervalo de tempo Δt deve ter uma incerteza ΔE satisfazendo

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Heisenberg foi contemplado com o prêmio Nobel de Física de 1932 em reconhecimento por suas muitas contribuições à Física Quântica. O prêmio foi partilhado com Paul Dirac²⁹ e Erwin Schrödinger³⁰. Pela primeira vez 3 físicos haviam sido escolhidos fundamentalmente por suas contribuições à física teórica. Concluiu o avô.

– Isso é tudo, Vovô? Perguntaram em coro Vinícius e Yasmin.

– Tudo não, mas acho que é o suficiente por agora. Quando vocês voltarem às aulas, podem consultar outros livros e até tirar outras dúvidas com o professor de vocês. O importante é vocês perceberem a maravilha que é a Física Quântica.

²⁹ Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), físico teórico britânico. Fez contribuições fundamentais para o desenvolvimento da Mecânica Quântica e da Eletrodinâmica Quântica. Formulou ainda a equação que leva seu nome, a qual descreve o comportamento dos férmions e leva à previsão teórica de existência da antimatéria. Em 1926, em sua tese de doutorado, desenvolveu uma versão da Mecânica Quântica na qual alia a Mecânica Matricial de Heisenberg com a Mecânica Ondulatória de Schrödinger. Foi agraciado, juntamente com este último, em 1933 com o Prêmio Nobel de Física pelos seus trabalhos sobre a teoria Atômica

³⁰ Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961), físico austríaco, responsável por importantes contribuições para a formulação da Teoria Quântica. Construiu uma formulação Ondulatória equivalente à formulação matricial proposta por Heisenberg. Foi agraciado, juntamente com Dirac, em 1933 com o Prêmio Nobel de Física pelos seus trabalhos sobre a teoria Atômica.