

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
- MNPEF

Bruno Maurício Batista de Albuquerque

**UM CONTO, UM QUANTUM: INVESTIGAÇÃO DO
POTENCIAL DE SÉRIES DE NARRATIVAS DISCRETAS
PARA A INTRODUÇÃO DE TÓPICOS DA TEORIA
QUÂNTICA EM SALA DE AULA**

Santo André - SP
2020



Bruno Maurício Batista de Albuquerque

Um conto, um quantum: Investigação do potencial de séries de narrativas discretas para a introdução de tópicos da Teoria Quântica em sala de aula

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do ABC (UFABC) no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadora:
Profa. Dra. Graciella Watanabe

Santo André - SP
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do ABC
Elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da UFABC
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Albuquerque, Bruno Maurício Batista de

Um conto, um quantum : Investigação do potencial de séries de narrativas discretas para a introdução de tópicos da Teoria Quântica em sala de aula / Bruno Maurício Batista de Albuquerque. — 2020.

270 fls. : il.

Orientadora: Graciella Watanabe

Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF, Santo André, 2020.

1. Ensino de Física. 2. Narrativas. 3. Obstáculos Epistemológicos. 4. Gaston Bachelard. 5. Teoria Quântica. I. Watanabe, Graciella. II. Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF, 2020. III. Título.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, de acordo com as observações levantadas pela banca no dia da defesa, sob responsabilidade única do(a) autor(a) e com a anuência do(a) orientador(a).

Santo André/SP

07 de julho de 2020

Assinatura do(a) autor(a):

Bruno Mounício B. Albuquerque

Assinatura do(a) orientador(a):

Graciela Watson

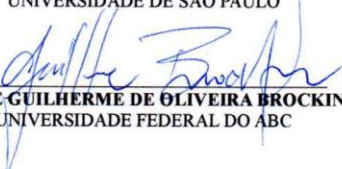


MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Fundação Universidade Federal do ABC
Avenida dos Estados, 5001 – Bairro Santa Terezinha – Santo André – SP
CEP 09210-580 · Fone: (11) 4996-0017

FOLHA DE ASSINATURAS

Assinaturas dos membros da Banca Examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato, BRUNO MAURÍCIO BATISTA DE ALBUQUERQUE realizada em 21 de Fevereiro de 2020:


Prof.(a) CRISTIANE JAHNKE FIORINI DA SILVA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO


Prof.(a) JOSE GUILHERME DE OLIVEIRA BROCKINGTON
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC

Prof.(a) GISELLE WATANABE
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC

Prof.(a) MARCELO GAMEIRO MUNHOZ
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO


Prof.(a) GRACIELLA WATANABE
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC - Presidente

* Por ausência do membro titular, foi substituído pelo membro suplente descrito acima: nome completo, instituição e assinatura

 Universidade Federal do ABC

Aos meus pais Antonio e Janilene e à minha irmã Beatriz.

Agradecimentos

Envolvidos neste trabalho, direta ou indiretamente, há um sem número de pessoas, para as quais ofereço o meu singelo, porém honesto e profundo, “MUITO OBRIGADO”.

Entre os destaques, coloco, em primeiro lugar, os meus pais. Devo a eles tudo o que sou, o que faço e o pouco que conquistei neste tempo de vida. São eles os responsáveis pelos ensinamentos mais marcantes. “Estude! Você não tem outra possibilidade de vencer na vida – em termos amplos, como ser humano – se não for pela educação, pelo estudo, pela constante especialização!” Meu amor por eles, e por minha pequena irmã Beatriz, é descomunal e tento demonstrar isso em cada gesto, atitude, palavra... Enfim, em cada ação que marca essa minha passagem.

Agradeço os amigos que, de diferentes formas e em diferentes estágios da vida, constituíram um apoio essencial para a minha trajetória pessoal, acadêmica e profissional. Ressalto, inicialmente, o meu grande compadre Daniel Ortega da Cruz, companheiro desde 2006 (o nosso primeiro ano de Licenciatura em Física na USP) e responsável por me encorajar a seguir o programa MNPEF da UFABC, e à sua esposa Luana Torres Ortega – uma mulher fantástica que chegou em 2014 para fortalecer ainda mais a nossa amizade. Lembro, em seguida, do prof. João Carlos Dias Costa, o responsável por acreditar precocemente no meu trabalho, oferecendo-me condições para o meu primeiro emprego com carteira assinada: o de plantonista de Física e Matemática em um Curso Pré-Vestibular. Sua amizade e seu exemplo profissional são itens que carregarei comigo para todo o sempre.

Ofereço a minha gratidão ao Curso e Colégio ETAPA que me proporciona, hoje, a oportunidade de atuar profissionalmente por meio do exercício de uma paixão: ensinar Física. Lembro do prof. Edmílson Luís Rodrigues Motta e da prof. Célia Passoni, que me abriram espaço para desenvolver parte importante desta pesquisa no ambiente do colégio. Homenageio, também e principalmente, os tantos companheiros de profissão com os quais tive/tenho a oportunidade de conviver desde julho de 2013. Estejam em sala de aula ou não, eles me ensinam muito e detêm o meu profundo respeito e a mais genuína admiração. Para citar alguns (que representam um corpo de funcionários muito mais expressivo):

Ricardo Leme Szulc e Leandro Tadeu Cazarrotti, a quem conheço por mais tempo e em quem reconheço verdadeiras referências; Alexandre Lopes Moreno e Fred Uesono Basso, meus coordenadores na cadeira de Física que, pacientemente, cuidam de me orientar frente a algumas escorregadas e de me inspirar e sugerir caminhos na prática associada ao ensino da dita disciplina; Marcelo Monte Forte da Fonseca, nosso supremo comandante no Curso Pré-Vestibular, sempre disposto a compartilhar a sua larga experiência com pitadas de humor ácido; Calebe Simões Santos, uma figura genial a quem tive o privilégio de conhecer em 2006 durante o início da graduação em Física e que, aqui, representa todos os professores olímpicos de Física do Colégio ETAPA São Paulo (pelos quais sou responsável) e recebe uma oferta de gratidão que, em verdade, é dedicada a toda essa equipe da qual muito me orgulha fazer parte; Ivan Leonardo Rodrigues de Souza, um grande amigo que ensina pela qualidade de sua atuação profissional e pelo exemplo de vida que constitui; Alexandre Borges Vitoriano Leomil, Héric José Palos e Israel de Souza Almeida, professores lendários em suas respectivas áreas e seres humanos espetaculares que fazem a alegria dos dias durante os almoços e os cafés que os seguem e que, nesta seção, recebem os meus sinceros agradecimentos representando os docentes de outras disciplinas; Márcio Gurjão Pereira e Nilton Canto que, pela proximidade e por sempre estarem dispostos a trabalhar pelo diuturno funcionamento regular da escola e de suas milhares de engrenagens, recebem o profundo reconhecimento que dedico a todos os não-docentes do colégio; finalmente, um tributo aos meus alunos (tanto aos do passado quanto aos atuais), indivíduos que justificam a minha ação profissional e para quem sempre tento oferecer o melhor de mim.

Agradeço ao corpo de docentes do programa MNPEF oferecido no polo UFABC. Lembro de Laura Paulucci, Marcelo Pires e Nelson Studart, pela dedicação que impuseram em seus respectivos cursos e pela explícita atenção que tiveram em relação ao meu caso, com suas sugestões extremamente valiosas – realizadas via gestos carinhosos ou, eventualmente, na forma de verdadeiros puxões de orelha. Em especial, destino um caloroso “obrigado” à minha orientadora Graciella Watanabe, pelo exercício contínuo da paciência diante do meu exercício de conciliação entre trabalho e Mestrado e por me guiar na elaboração de um trabalho que se mostrou extremamente agradável e alinhado com uma

proposta que há muito “martelava” em minha cabeça: a abordagem dos primeiros anos da Mecânica Quântica segundo uma perspectiva histórica não-linear. Sou-lhe profundamente grato por ter aceitado o desafio de me orientar e por ter me apresentado a leituras extremamente enriquecedoras. Aproveito, e estendo as mostras de gratidão aos meus amigos do MNPEF polo UFABC (turma de 2017 - 2019), pessoas de conduta reverenciável e fontes constantes de aprendizado. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Um conto, um quantum: Investigação do potencial de séries de narrativas discretas para a introdução de tópicos da Teoria Quântica em sala de aula

Bruno Maurício Batista de Albuquerque

**Orientadora:
Graciella Watanabe**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do ABC (UFABC) no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física

A inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) em nível médio é advogada por um número cada vez maior de acadêmicos que refletem sobre a prática docente vinculada à dita disciplina (PEREIRA 2009 constitui ótimo exemplo de revisão bibliográfica sobre as diversas aproximações conduzidas). Entretanto, as dificuldades estruturais – que se iniciam na abstração do próprio conteúdo, perpassam pela formação do professor e desembocam nas falhas e/ou faltas constatadas na fundamentação conceitual dos alunos – constituem, enquanto conjunto, forte fator desencorajador ante a opção pela abordagem desta temática.

Visando colaborar para a formação de elementos estruturantes que acomodem, adequadamente, os revolucionários conceitos quânticos nos esquemas essencialmente clássicos de articulação cognitiva de alunos e professores, o presente trabalho pretende organizar, por meio de uma série de narrativas, um introito à Física Quântica que seja capaz de, interagindo diretamente com o leitor destinatário, identificar imperfeições e/ou lacunas conceituais, corrigi-las dinamicamente e oferecer uma visão honesta do processo de construção científica, tipicamente deturpado em sala de aula – pela atuação indireta do programa conteudista de ensino.

Como referencial teórico admitido para sustentar e desenvolver o potencial das narrativas como veículos do processo de ensino-aprendizagem, este trabalho considerará o trabalho do psicólogo estadunidense Jerome Bruner que, na fase final de sua vida, dedicou-se exaustivamente à investigação dos esquemas narrativos e da sua influência no pensamento humano, especialmente como o ser humano neles se apoia para conferir forma às suas experiências e, portanto, para comunicar situações de aprendizagem.

Paralelamente, para inspirar uma análise crítica dos desvios técnicos e conceituais constatados, os textos (contos, em sentido mais estrito, denominados “*Um conto, um quantum – narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica*”) apoiar-se-ão na ideia de *obstáculos epistemológicos*, tais como sugeridas originariamente pelo filósofo e epistemólogo francês Gaston Bachelard e adaptadas, em versão pedagógica, por outros autores (PESSANHA e PIETROCOLA, 2013).

De início, intenciona-se proporcionar, aqui, uma visão condensada dos referenciais teóricos para que se possa prosseguir com uma descrição mais adequada das narrativas e dos resultados advindos de uma primeira aplicação deste material. Estes resultados serão devidamente comentados nas conclusões, acompanhados de uma análise que refaz, criticamente, toda a elaboração e condução da dita proposta.

Palavras-chave: Ensino de Física, narrativas, Jerome Bruner, obstáculos epistemológicos, Gaston Bachelard, Teoria Quântica, quantização.

ABSTRACT

A Tale, a Quantum: Investigating the Potential of Discrete Narrative Series for Introducing Quantum Theory Topics in the Classroom

Bruno Maurício Batista de Albuquerque

**Supervisor:
Graciella Watanabe**

Master's thesis submitted to the Graduate Program of the Federal University of ABC (UFABC) in the National Professional Master Course in Physics Education (MNPEF), in partial fulfillment of the necessary requirements for the degree of Master in Physics Education

The insertion of topics of Modern and Contemporary Physics (FMC) at medium level is advocated by an increasing number of academics who reflect on the teaching practice linked to this discipline (PEREIRA 2009 is a great example of a bibliographical review of the various approaches conducted). However, the structural difficulties - which begin with the abstraction of the content itself, permeate the teacher's formation and lead to the flaws and/or shortcomings found in the students' conceptual foundation - constitute, as a whole, a strong discouraging factor in opting for the approach of this theme.

Aiming to contribute to the formation of structuring elements that adequately accommodate the revolutionary quantum concepts in the essentially classical schemes of cognitive articulation of students and teachers, the present work intends to organize, through a series of narratives, an introite to Quantum Physics that, by interacting directly with the target reader, is able to identify imperfections and/or conceptual gaps, to correct them dynamically and to offer an honest view of the process of scientific construction, typically distorted in the classroom - by the indirect action of the "content teaching program".

As a theoretical framework accepted to support and develop the potential of narratives as vehicles of the teaching-learning process, this thesis will consider the work of the American psychologist Jerome Bruner, who, in the final phase of his life, devoted himself exhaustively to the investigation of narrative schemes and their influence on human thinking, especially how the human being relies on them to shape their experiences and thus to communicate learning situations.

At the same time, to inspire a critical analysis of the technical and conceptual deviations found, the texts (narratives, in the strictest sense, called "A tale, a quantum - discrete narratives about the first steps of Quantum Theory") will be

based on the idea of epistemological obstacles, as originally suggested by the French philosopher and epistemologist Gaston Bachelard and adapted, in pedagogical version, by other authors (PESSANHA and PIETROCOLA, 2013).

At first, it is intended here to provide a condensed view of the theoretical frameworks so that we can proceed with a more adequate description of the narratives and results arising from a first application of this material. These results will be duly commented on in the conclusions, accompanied by an analysis that critically redo the elaboration and conduct of the proposal.

Keywords: Physics Education, narratives, Jerome Bruner, epistemological obstacles, Gaston Bachelard, Quantum Theory, quantization.

Santo André - SP

2020

Sumário

1. Introdução	3
2. Referenciais teóricos.....	10
2.1. Gaston Bachelard: vida e obra.....	10
2.2. A epistemologia de Gaston Bachelard	12
2.3. Os obstáculos epistemológicos	17
2.4. Jerome Bruner: vida e obra.....	30
2.5. O cognitivismo de Bruner: a aprendizagem como uma aventura	32
2.6. As narrativas como veículos do processo de ensino-aprendizagem	38
3. Teoria Quântica: abordagens histórica e matemática das primeiras contribuições	41
3.1. Estudos sobre radiação térmica: antecedentes	41
3.2. A Radiação do Corpo Negro.....	43
3.3. Evocação das ideias de quantização após Planck (1900).....	50
4. Metodologia de Pesquisa	56
4.1. Pesquisa Qualitativa: Uma pequena revisão histórica.....	56
4.2. Características gerais da pesquisa qualitativa	59
4.3. Estudo de Caso: Caracterização e Comentários Gerais	63
4.4. Contexto de Pesquisa.....	67
5. Análise dos dados	70
5.1. Introdução	70
5.2. Análise Textual Discursiva: um breve resumo	70
5.3. Descrição da aplicação e apresentação dos resultados.....	73
5.3.1. Conto de Introdução/Apresentação	74
5.3.2. Primeiro Conto: “Eu, um universo de átomos! Um átomo no universo!”	78
5.3.3. Segundo Conto: “Uma conversa entre (á)tomos e a dinâmica do progresso científico”	82
5.3.4. Terceiro conto: “A luz é uma onda!(?)”	88
5.3.5. Quarto conto: “Crise sombria projetada pela luz de uma lâmpada” ...	90
5.3.6. Quinto conto: “A luz é uma partícula!(?)”	92
5.3.7. Sexto conto: “Abrindo os olhos para uma nova noção de realidade”	94
5.3.8. Atividade Complementar: “Medindo a Constante h de Planck”	100
6. Transformando o Efeito Fotoelétrico em Narrativa	105
7. Conclusões e Considerações Finais	124
8. Bibliografia	127
9. Apêndices	132

9.1. Anexo A – Conto de Introdução	132
9.2. Anexo B – Primeiro conto: Eu, um universo de átomos! Um átomo no universo!.....	135
9.3. Anexo C – Segundo conto: Uma conversa entre (á)tomos e a dinâmica do progresso científico.....	140
9.4. Anexo D – Terceiro conto: A luz é uma onda!(?)	145
9.5. Anexo E – Quarto conto: Crise sombria projetada pela luz de uma lâmpada	150
9.6. Anexo F – Quinto conto: A luz é uma partícula!(?).....	154
9.7. Anexo G – Sexto conto: Abrindo os olhos para uma nova noção de realidade	159
9.8. Anexo H – Atividade complementar: Medindo a constante de Planck h ..	163
9.9. Anexo I – Atividade de Fechamento: Transformando o Efeito Fotoelétrico em Narrativa	169
9.10. Anexo J – Produções acadêmicas dos alunos	172
9.10.1. Aluno 1A	172
9.10.2. Aluno 1B	174
9.10.3. Aluno 1C	175
9.10.4. Aluno 1E.....	176
9.10.5. Aluno 1F.....	182
9.10.6. Aluno 1H	184
9.10.7. Aluno 1I.....	186
9.10.8. Aluno 1J.....	187
9.10.9. Aluno 1K	188
9.10.10. Aluno 1L.....	189
10. Produto Educacional	190

Capítulo 1

1. Introdução

Em uma época em que o acesso à informação se dá de forma extremamente facilitada graças à profunda difusão de pequenos aparatos multiuso repletos de tecnologia, questionar passa a ser uma atitude cada vez mais frequente e disseminada. Em todas as áreas, de todas as formas e nos mais diversos contextos, aliás. No âmbito educacional, por exemplo, levantar alguns “por ques”, “comos”, “quandos” etc. em um universo cada vez maior de pessoas pode contribuir fortemente para a otimização dos resultados que se pretendem atingir ao final da aplicação estruturada de certo conjunto de práticas pedagógicas.

Valendo-se de uma abordagem ainda mais reducionista, o “Por que ensinar/aprender Física?” e o “Como ensinar/aprender Física?” são reflexões cada vez mais recorrentes (inclusive entre um público mais geral, que guarda relação indireta com o ensino/aprendizagem da dita disciplina). E as respostas, quando emitidas, trazem implicitamente os objetivos educacionais estabelecidos pelos rígidos e ortodoxos currículos escolares brasileiros. Hoje, por aqui, vê-se a coexistência majoritária de duas justificativas para o ensino de qualquer disciplina (sendo que, nas áreas de Matemática e de Ciências da Natureza, este aspecto é ainda mais marcante e saliente):

1. Ensina-se porque o currículo básico assim o exige.
2. Ensina-se porque o alcance do Ensino Superior demanda, antes de tudo, a aprovação em vestibulares que exigem todos os conhecimentos básicos de todas as disciplinas elencadas nos currículos, independente da área de especialização do aluno recém-egresso do Ensino Médio.

Diante de qualquer destas perspectivas, os objetivos educacionais, quando existem, estão atrelados a aspectos mercadológicos e, portanto, temporários e intermitentes. Investe-se em quantidade absurda de informações, mune-se o aluno de um conjunto minimamente necessário de conteúdos (estabelecido pelos programas dos vestibulares) e verifica-se a “devolutiva” nestas provas que,

por sua vez, marcarão o fim do contato de muitos alunos com a Física, por exemplo.

Acredita-se que as perspectivas acima citadas, muito bem encaminhadas e direcionadas no que diz respeito às demandas que pretendem atender, acabam por gerar, no ambiente de ensino, uma visão extremamente distorcida do que se entende por “fazer Ciência”, uma vez que privilegia a síntese dos resultados finais em cada um dos assuntos abordados (geralmente apresentados em versão matemática última, excessivamente abstrata e dificilmente digerível pelo público amplo em geral). Mais do que mascarar a Ciência enquanto corpo historicamente construído, tal estratégia se mostra incomensuravelmente excludente, dado que desconsidera a diversidade da sala de aula para optar por um “formulismo” que incentiva a reprodução de uma estrutura conceitual que, no geral, não é plenamente incorporada em seu significado.

No sentido de fornecer à Física um caráter mais humano, nota-se um movimento crescente (SILVA e MARTINS, 2003; FORATO, MARTINS e PIETROCOLA, 2011; GURGEL, 2010; SILVA e MOURA, 2013) que visa introduzir, nas aulas tipicamente direcionadas ao Ensino Médio, elementos de História e Filosofia das Ciências. Desta forma, desmitifica-se o cientista que, aos olhos do leigo, trabalha enclausurado e recluso e dedica a sua vida a uma causa científica pela qual o seu nome será imortalizado; em contrapartida, elabora-se, dele, uma nova imagem que o associa a um ser social como qualquer outro, cujos estudos e análises estão carregados de influências, sejam de crenças pessoais, ou advindas de um contexto sociocultural específico ou de qualquer outra fonte admissível. Entretanto, ainda assim existem problemas consideráveis na condução da grande maioria de aproximações histórico-filosóficas que visam, quase exclusivamente, romper com a “deificação” do cientista.

Limitando-se, essencialmente, à menção de fatos históricos isolados que funcionam como sustentação adicional ao que se pretende ensinar, confere-se à História da Ciência um aspecto linear que não lhe é característico. Transfere-se, implicitamente, as ideias de continuidade e harmonia (tipicamente positivistas) a algo cuja evolução, na verdade, não é bem-comportada. Este erro, sim, é extremamente recorrente entre os professores de Física que abrem

espaço para a introdução de elementos históricos e filosóficos nas suas aulas. Corrigi-lo é um dos grandes propósitos existentes por trás deste trabalho.

Segundo Gaston Bachelard, a Ciência precisa ser vista como uma grande estrutura intrincada cujo progresso é regido por uma dinâmica complexa marcada por rupturas, momentos-chave a partir dos quais a sua atuação ganha sobrevida, sua linguagem se torna mais robusta e abrangente e seu objeto de descrição se torna cada vez mais abstrato e intangível. Neste movimento repleto de não-linearidades, um componente tem papel positivo e decisivo na percepção de que, em certos momentos, mudanças bruscas são necessárias: o erro! Conforme propõe o filósofo francês, é a partir do erro que se tem a dimensão do alcance do limiar de dado esquema científico quanto à explicação de um universo de fenômenos aos quais se propõe. Este foi exatamente o caso das teorias quântica e da relatividade: surgiram a partir da inadequação do viés clássico (Mecânica, Termodinâmica e Eletromagnetismo) aos mundos “do muito pequeno” (objetos da dimensão do átomo) e “dos corpos muito velozes” (que, em relação a dado referencial, mantêm velocidades que remetem a frações consideráveis daquela que a luz tem no vácuo). Seus desenvolvimentos partem de premissas simples quanto à formulação, mas extraordinariamente carregadas em novidade e força, a tal ponto de constituírem verdadeiros rompimentos com o quadro anteriormente em vigor. Faz-se necessário recordar, entretanto, que todo o arcabouço teórico que delas decorre não representa a completa negação dos antecedentes, mas sim uma extensão para outros domínios anteriormente não avaliados. Afinal, a Física Clássica Newtoniana está contida na Mecânica Quântica e na Relatividade Einsteiniana como caso limite em uma região de fronteiras muito bem delimitadas.

Em sala de aula, o autor experimentou uma situação que explicita, de forma muito clara, a visão harmoniosa (e equivocada) que os alunos sustentam em relação ao processo científico vinculado à Física, em particular. Em uma aula sobre “Efeito Fotoelétrico”, cuidou de definir o fenômeno para, em seguida, sugerir alguns experimentos mentais que teriam, como principal função, revelar o realismo ingênuo (ou, no máximo, o racionalismo clássico) presente em esquemas conceituais destes jovens. Passou, posteriormente, ao desajuste entre tais esquemas e os resultados experimentais cuidadosamente obtidos no

final do século XIX e início do século XX para, finalmente, mostrar que uma “revolução” se fazia necessária para que o problema pudesse ser satisfatoriamente resolvido. Findo este momento da aula, um aluno se manifestou incomodado: “Professor, por que aprendemos a explicação errada para este efeito? Não poderíamos ter passado diretamente para a versão correta dos fatos?”. As perguntas, em primeiro momento, geraram uma situação de desconforto para o autor, não pela resposta (que se fez presente na ocasião de modo claro e lúcido), mas pelo *insight* que lhe fez perceber que o ato de se ensinar Física com base em inserções histórico-filosóficas deveria ser repensado para que os estudantes formassem uma concepção mais próxima do que realmente ocorre, de como se comporta a evolução dos conceitos, das transformações associadas ao objeto de estudo da Ciência à medida que esta progride etc. Foram, portanto, perguntas norteadoras de um trabalho que, segundo se pretende, justificará a importância de uma postura epistemológica mais responsável e, principalmente, buscará sugerir meios de implementação de abordagens do tipo em sala de aula.

A Física Moderna e Contemporânea (FMC) tem, neste sentido, um potencial explorador extremamente significativo. Trabalhos acadêmicos advogam, já há algum tempo, a sua introdução nas aulas regulares do Ensino Médio (e o fazem por motivos diversos, fortemente aceitáveis em sua grande maioria); nos últimos anos, a quantidade de livros didáticos dispostos a abordar tópicos de FMC em linguagem acessível para este nível escolar cresceu em taxas bem sólidas. Entretanto, a quantidade de professores de nível médio que passaram a se dedicar, regularmente, à abordagem da FMC não acompanha, em velocidade, o movimento de reformulação dos materiais de apoio. Afinal, como se sabe, apreender elementos de FMC requer a superação de diversos obstáculos epistemológicos (mais uma vez, nos termos de Bachelard), dificuldades iniciais que só serão convincentemente vencidas se o professor, como guia do processo de ensino-aprendizagem, estiver apto para, em primeiro momento, reconhecê-las (e assim, em seguida, conseguir elencar os meios pelos quais conduzirá tal correção).

Perante as problemáticas anteriormente expostas, pretende-se, aqui, estruturar uma série de reflexões que visem atender, satisfatoriamente, as exigências impostas pelos seguintes questionamentos:

- Que postura metodológica podemos adotar de modo a explicitar, corretamente, a dinâmica não-linear típica da Ciência, assim como os meios pelos quais esta se vale para organizar e revisar os seus esquemas conceituais?
- De que forma podemos vincular aos obstáculos epistemológicos bachelardianos as propriedades de elementos norteadores de uma prática docente (ou, em termos mais abrangentes, de um trabalho pedagógico geral)?

Desta forma, o texto que aqui se apresenta tem por propósito fundamental reconhecer os principais obstáculos epistemológicos intervenientes no processo de ensino-aprendizagem de FMC a partir da consideração de ferramentas diagnósticas – atividades narrativas – que, ao serem aplicadas, forneçam ao docente vias de atuação confortáveis para lidar, convenientemente, com a transição entre Física Clássica e Física Moderna (especialmente a Teoria Quântica). Há de se convir que, uma vez posto o fosso existente os vieses clássico e quântico, uma atitude de desprendimento, por vezes, se faz necessária. Em termos técnicos, por exemplo, a progressão para a Relatividade Restrita de Einstein requer o “abandono” de um tempo absoluto em favor da noção de uma velocidade absoluta (a da luz no vácuo); em Quântica, faz-se necessário substituir o dualismo “onda x partícula” por uma complementaridade “onda – partícula”. Criados em um mundo macroscópico no qual os princípios fundamentais da Física Clássica continuam inabaláveis, os alunos quase sempre têm dificuldades para cumprir com o salto exigido e o docente, por não conseguir emitir um parecer adequado ou por não saber como transpor uma barreira conceitual corretamente identificada, pode enfrentar sérias resistências na intermediação de todo o esquema de ensino. Neste sentido, subsidiá-lo e abastecê-lo com possíveis ações corretivas está entre os nossos principais objetivos.

Nesta dissertação, o alvo precípua supracitado será perseguido a partir do respeito aos seguintes objetivos específicos:

- Escrutinar o sentido de obstáculo epistemológico na obra de Bachelard.
- Conceber propostas educacionais com o intuito de debater a transição da Física Clássica para a Física Moderna com alunos do Ensino Médio, de modo a reconhecer e suplantar os obstáculos epistemológicos por eles enfrentados e promover uma acertada apreensão desse processo.
- Analisar e indicar os principais contratempos e/ou desafios a serem enfrentados pelos docentes ao discutir a dita transição.

Ademais, em se tratando de um trabalho vinculado um programa de Mestrado Profissional, acompanha-a um “produto educacional”, um constructo, material ou não, que possa ser aproveitado para beneficiamento do processo de ensino-aprendizagem em qualquer dos seus momentos (melhoria de sua condução, aprimoramento dos resultados etc.). Esta obra, em particular, pretende contribuir com a elaboração de uma série de textos denominados “Um conto, um quantum: narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica”, cujo principal intuito é proporcionar um ingresso confortável no universo das revolucionárias ideias quânticas, calcado nos esquemas narrativos de pensamento e de comunicação de aprendizagem. Neste sentido, objetiva-se a busca pela criação de condições para aplicação e adaptação de um instrumento norteador de ensino-aprendizagem que estimule o constante diálogo com os alunos envolvidos e permita acertos e ajustes dinâmicos capazes de culminar na apropriação sólida de estruturas lógico-científicas típicas da Velha Teoria Quântica.

Ao evocar o pensamento narrativo como mecanismo de potencial valor para assentar, de forma mais segura, os conceitos quânticos mais fundamentais, apoiamo-nos no trabalho de Jerome Bruner que, a partir da década de 1980, passa a refletir sobre a forma que os seres humanos conferem às suas experiências (particulares ou coletivas). Ao compartilhá-las com grupo maior ou menor de indivíduos, opera em favor da transmissão cultural, proporciona ambiente para mudanças comportamentais e, conseqüentemente, comunica aprendizagem.

Neste caso, estimular o pensamento narrativo nos alunos pode, além de permitir uma aproximação sucessiva às abstrações conceituais usualmente presentes nas Ciências (e de modo mais marcante em Teoria Quântica), oferecer via alternativa para a constatação de aprendizagem. E é justamente este processo gradativo que se verá executado neste trabalho – um acompanhamento contínuo marcado pela atuação paralela dos esquemas narrativos de Jerome Bruner e na noção de obstáculo epistemológico de Gaston Bachelard (visto segundo uma perspectiva educacional), de tal sorte que, sempre que identificado um empecilho, se faça o esforço de tentar compreendê-lo à luz de um ruído e/ou perturbação que respeite a classificação sugerida pelo epistemólogo e filósofo francês.

Longe de ser versão última no que tange à abordagem deste terreno “pantanososo” quanto ao ensino, mas descomunalmente belo em seu perpasso histórico, esta dissertação surge a partir de problematizações delineadas pelo autor a partir de situações emergentes em seu exercício docente durante o curto período (até aqui) pelo qual foi o responsável principal, na instituição em que atua, pelo adentrar em tópicos que demarcam a “infância” da Mecânica Quântica. Mais do que a já esperada relutância quanto ao aceite, por parte do aluno, das novas leituras conceituais exigidas, nota-se, de forma mais grave, uma internalização distorcida sobre o progresso científico e, conseqüentemente, dos agentes responsáveis pela sua operacionalização: os cientistas. Conhecimento se constrói, não nasce pronto! Tal construção, aliás, se faz a partir de grandes revoluções e rupturas profundas e nada tem de linear e harmoniosa. Os objetos-base da Ciência evoluem em direção a uma carga abstrata ainda mais intensa e presente, de tal forma que a realidade científica é, verdadeiramente, uma realidade edificada, erigida, arquitetada (e não previamente posta pelo mundo sensível que nos envolve). Permitir um salto extenso, mas confortável, rumo às novas conformações conceituais e possibilitar a apreensão de uma imagem mais fidedigna da Ciência e de seus operadores são, portanto, as metas primordiais do encadeamento de ponderações aqui consideradas. Espera-se, neste sentido, que este trabalho ofereça contribuições mínimas para a superação destes problemas significativos quanto à sua importância e generalizáveis, dada a realidade educacional brasileira, quanto à sua extensão.

Capítulo 2

2. Referenciais teóricos

2.1. Gaston Bachelard: vida e obra

Gaston Louis Pierre Bachelard nasceu a 27 de junho de 1884 no pequeno vilarejo de Bar-sur-Aube, situado na região de Champagne (França). De família modesta (seu pai era sapateiro e sua mãe dona de um depósito de tabaco), Bachelard ascendeu socialmente por força de seu empenho e de sua capacidade, precocemente atestados nos prêmios de excelência que acumulara ao longo de sua educação básica (conduzida na escola pública de sua cidade). Findos os estudos secundários e conquistada a aprovação no *baccalauréat* (o exame que, na França, garante o acesso ao Ensino Superior), Bachelard viu-se obrigado a impor uma primeira descontinuidade em sua trajetória acadêmica para trabalhar e auxiliar na composição da renda doméstica. Neste momento, torna-se monitor no Colégio de Cézanne em 1902 e, no ano seguinte, adquire, via concurso, um posto como estagiário dos Correios em Remiremont (no nordeste francês). À medida que ascendia nos Correios, encontrava espaço para investir, de modo mais robusto, em sua formação. Em 1909, obtém uma bolsa especial para cursar Matemática no liceu Saint-Louis e outra para acompanhar os cursos na área de Ciências, acumulando, ao cabo de 3 anos, a licenciatura em Matemática como formação principal além de vários certificados complementares (entre os quais os de Física Geral, Física Matemática, Mecânica Racional e Astronomia Aprofundada) que lhe conferiram uma formação científica plural.

A Primeira Guerra Mundial, entretanto, atuou como um obstáculo ao incremento de sua formação. No período de 1914 a 1918, Bachelard atuou inicialmente como telegrafista e, já próximo do final do conflito, combateu no front como subtenente. Regressou são e salvo, sendo, inclusive, condecorado pelo governo

francês em reconhecimento ao seu constante esforço no restabelecimento das linhas telegráficas seguidamente danificadas pelo fogo inimigo.

Já em tempos de paz, foi convidado para lecionar no colégio público de sua cidade, responsabilizando-se, originalmente, pelo ensino de História e Geografia e, passado algum tempo, pelas aulas de Física e Química (domínios mais próximos àqueles correspondentes à sua formação). Esta experiência como professor de Educação Básica na área de Ciências Naturais será, posteriormente, tida como fundamental para algumas de suas mais importantes obras.

Os anos de 1920 revelariam um crescimento abrupto em sua formação filosófica – uma das fortes pernas que o sustentam como bastião de referência na área de Humanidades. Já no primeiro ano da década em questão, conclui a licença em Filosofia (iniciada em 1919). Em 1922, consegue a agregação na dita disciplina. Em 1927 – aos 43 anos de idade, portanto – conquista o grau de Doutor em Letras pela Universidade de Paris ao defender duas teses em Filosofia (avaliadas, aliás, com menção muito honrosa): a principal *Essai sur la connaissance approchée (Ensaio sobre conhecimento aproximado)*, orientada por Abel Rey, acabou publicada na forma de livro 1 ano depois e foi premiada pelo Instituto de História das Ciências e Tecnologia da Sorbonne; a complementar *Étude sur l'évolution d'un problème de physique: la propagation thermique dans les solides (Estudo sobre a evolução de um problema de física: a propagação térmica nos sólidos)*, também fora lançada na forma de livro, mas não alcançou a mesma repercussão. Sua produção intelectual intensa e de grande qualidade alça o seu nome entre as grandes referências da comunidade filosófica francesa em curto intervalo de tempo e, em 1930, é convidado para assumir a cadeira de Filosofia na Faculdade de Letras da Universidade de Dijon, em Bourgogne.

O período em Dijon, aliás, seria extremamente prolífico para o filósofo francês. Em 1934, surgiria *Le nouvel esprit scientifique (O novo espírito científico)*, obra na qual Bachelard sintetiza a sua visão descontínua e não-linear de progresso científico. Anos depois, em 1938, reforça a sua teoria epistemológica com o lançamento de *La formation de l'esprit scientifique (A formação do espírito científico)*, trabalho no qual lança os conceitos de rupturas e obstáculos

epistemológicos. No mesmo ano, publica *La psychanalyse du feu (A psicanálise do fogo)*, produção que inaugura uma nova vertente do seu trabalho intelectual, vinculada à criação artística fundamentada na imaginação poética e no estudo dos sonhos e devaneios – esta nova investida abre margem para a fortificação da “outra perna” na qual se apoia o gigante Bachelard enquanto arquétipo acadêmico.

Em 1940, em meio à Segunda Guerra Mundial, aceita convite da Sorbonne para suceder a seu orientador Abel Rey (falecido em janeiro do dito ano) na cadeira de História e Filosofia das Ciências, lá permanecendo até 1954 como responsável efetivo (ano no qual completara 70 anos – reconhecido como limite para lecionar na Sorbonne) e mantendo-se como professor honorário na instituição em questão pelo ano letivo de 1954/1955. Na parte inicial deste período, Bachelard avança em sua “produção noturna” (forma pela qual é caracterizada, segundo os analistas de sua obra, a porção de sua obra dedicada à poesia) com *L’air et les songes (O ar e os sonhos, 1943)*, *La terre et les rêveries du repôs (A terra e os devaneios do repouso, 1946)* e *La terre et les rêveries de la volonté (A Terra e os devaneios da vontade, 1948)*. O final dos anos 1940 e começo dos anos 1950 assinalam o retorno de Bachelard à vertente diurna de seus textos (aqueles vinculados aos estudos em História das Ciências e em Epistemologia) com *Le rationalisme applique (O racionalismo aplicado, 1949)* e com *Le matérialisme rationnel (O materialismo racional, 1952)*.

Fora da Sorbonne, assume lugar na Academia das Ciências Morais Políticas e acumula uma série premiações e condecorações em reconhecimento à sua contribuição científica, entre as quais se destacam a de comendador da Legião de Honra (1960) e o Grande Prêmio Nacional das Letras (1961). Falece a 16 de outubro de 1962, aos 78 anos de idade.

2.2. A epistemologia de Gaston Bachelard

Já a partir da seção anterior, tem-se uma pequena noção da vastidão assumida pela obra epistemológica de Bachelard, toda referenciada no que se convencionou chamar de “Ciência Contemporânea”. Esta Ciência, por sua vez,

é marcada por nova atitude científica (ou “novo espírito científico”, nos termos bachelardianos), na qual os seus objetos de trabalho são obtidos por extrapolações do mundo sensorial imediato e, desta forma, adquirem facetas cada vez mais abstratas por força da capacidade ilimitada do imaginário humano em lhe conferir novas configurações mais abrangentes e generalizantes. Neste âmbito, costumam ser inseridas a introdução das Geometrias Não-Euclidianas, o surgimento da Relatividade Einsteiniana, os adventos da Mecânica Quântica e da Mecânica Ondulatória etc.

É esta Ciência que as Filosofias tradicionais (representadas, aqui, pelo positivismo de Comte e pelo pensamento de Émile Meyerson) falham em descrever. Aliás, em seus trabalhos epistemológicos, Bachelard não caracteriza a “Nova Epistemologia” de forma explícita, mas o faz de forma negativa (ou seja, aponta as inadequações do pensamento tradicional ante a prática científica dita contemporânea – sugerindo de forma indireta as competências assumidas por uma Filosofia das Ciências que se pretende mostrar adequada). Vale ressaltar, porém, que o descompasso apontado por Bachelard entre a Filosofia Positivista e a Ciência se verifica, como ele mesmo reconhece, a partir de certo período (nas primeiras mostras de contemporaneidade, no caso). Tal fato pode sugerir, portanto, o caminhar *pari passu* das práticas positivistas a uma estrutura científica anterior e já ultrapassada à época de Gaston Bachelard.

Entre as principais críticas feitas pelo polímata francês às filosofias tradicionais está aquela que as caracteriza como “filosofias do imobilismo” (BULCÃO, 2009), no sentido em que correspondem a sistemas filosóficos fechados, dotados de princípios universais imutáveis e incapazes, portanto, de acompanhar o caráter dinâmico do pensamento científico atual. Por ter a Ciência como objeto de estudo, análise e descrição, a Nova Epistemologia deve estar pronta para se ajustar, como uma luva deformável, ao seu material de trabalho – aqui fundamentalmente caracterizado em sua atitude cinética, móvel e inconstante, que deve transitar, alternada e convenientemente, entre dois vieses: o racional e o empírico. Em suas palavras:

“Um empirismo sem leis claras, coordenadas, dedutivas, não pode ser nem pensado nem ensinado; um racionalismo sem provas palpáveis, sem aplicação à realidade imediata, não pode

convencer plenamente. Prova-se o valor de uma lei empírica fazendo dela a base de um raciocínio. Legitima-se um raciocínio, fazendo dele a base de uma experiência. A ciência, soma de provas e experiências, de regras e leis, de evidências e fatos, necessita, pois, de uma filosofia de dois polos”. (BACHELARD, 1940, p. 5 apud BULCÃO, 2009, p. 32).

Inserida nesta nova óptica, a Filosofia das Ciências, na proposta bachelardiana, não mais deve se preocupar em questionar quais os limites do conhecimento científico – dado que esta pergunta não faz mais sentido na perspectiva de objeto científico construído. Sendo assim, falas como a de Albert Abraham Michelson “... as leis e fatos fundamentais mais importantes da Física já foram descobertos e estão tão bem estabelecidos que a possibilidade deles serem suplantados em decorrência de novas descobertas é excessivamente remota” (MICHELSON A. A., 1903), que sugerem uma aproximação dos objetos de estudo da Física a um quadro de esgotamento e, conseqüentemente, o iminente alcance de uma fronteira última do conhecimento nesta área, não têm mais lugar. Acredita-se que Michelson, um físico experimental de calibre lendário e prêmio Nobel de Física (1907, o primeiro norte-americano a conseguir tal feito, aliás), não imaginava o impacto que o seu experimento teria sobre a reestruturação de algumas leis fundamentais da Física e tampouco o estardalhaço que seria causado pelas ideias de quantização de energia lançadas por Max Planck no final de 1900.

A sugestão bachelardiana de uma Ciência sempre em movimento e de uma Filosofia que lhe corresponda à altura exige, por conseguinte, uma postura reflexiva sempre atenta, necessária para manter ininterruptamente aceso um espírito disposto a corrigir e retificar o conhecimento que se apresenta diante de si. O erro, quando atestado, deve ser visto em sua nuance positiva, pois é ele quem vai inspirar as retificações necessárias à produção das novas verdades científicas que, por sua vez, mobilizarão a Ciência em sua rota de progresso. Nos seus termos, “A retificação é uma realidade, ou melhor, é a verdadeira realidade epistemológica, pois é o pensamento em seu ato, em seu dinamismo profundo” (BACHELARD, 1928, p. 300 apud BULCÃO, 2009, p. 56).

Em detalhes, a mobilidade associada ao “dinamismo profundo” que define “a verdadeira realidade epistemológica” não é, aos olhos de Bachelard, bem-comportada. Mais uma vez em oposição às filosofias tradicionais, defensoras de uma evolução científica contínua e assintótica (quanto à progressiva aproximação às zonas limítrofes do conhecimento), Bachelard advoga em favor de uma Ciência marcada por rupturas e por um progresso não-linear, pautando-se pelo próprio exemplo da produção científica dos séculos XIX e, principalmente, XX para justificar a sua tese. Romper com as noções de tempo absoluto exigiu mais de 20 séculos (se a contagem for iniciada a partir da Física Aristotélica); retomar as ideias atômico-moleculares e coloca-las em bases científicas mais sólidas (que trouxeram, como resultados ulteriores, a descoberta de estruturas ainda mais elementares) requereu um intervalo de tempo da mesma ordem de grandeza; conquistar a possibilidade de construção de novas geometrias que não a de Euclides (século III a.C) só foi possível com os importantes trabalhos de Lobatchevsky, Bolyai e Riemann (século XIX). Não significa, obviamente, que intervalos da dimensão de 2 milênios sejam necessários para as quebras decisivas que demarcarão o desenvolvimento científico; significa, sim, que as deformações dos objetos científicos em busca de novas feições requerem tempo e, atualmente, posta a complexidade e a abstração subjacentes aos conceitos e às estruturas teóricas que deles se valem, reclamam a ação coletiva da comunidade acadêmica, a atuação conjunta da “cidade científica” (BULCÃO, 2009). O salto do Eletromagnetismo de Maxwell para a Eletrodinâmica Quântica de Schwinger, Feynman e Tomonaga, por exemplo, se deu em pouco menos de 1 século.

Na qualidade de indivíduos que lidam com Ciências e, assim, com muitas relações funcionais em diversas circunstâncias, é extremamente natural questionar: quais são as variáveis intervenientes de que depende este intervalo de tempo? Para Bachelard, um fator é essencial para o alcance do passo seguinte: a superação de “valores subjetivos inconscientes”, presentes no ato mesmo de conhecer e que tendem a fechar os nossos olhos para aquilo que pode se colocar adiante enquanto nova verdade científica. É neste âmbito que se insere a noção-chave de “obstáculo epistemológico”, tão extensivamente desenvolvida em *A Formação do Espírito Científico* e que será melhor analisada

na próxima seção deste trabalho. A construção de um novo conhecimento, na óptica bachelardiana, sempre se dá sobre uma estrutura já existente que, por vezes, oferece muita resistência ao desenrolar do progresso científico e é neste ato que os obstáculos se colocam. Em termos metafóricos, é como se, em certos momentos na construção de um edifício, fosse necessário reestruturar os seus níveis basais para que o trabalho pudesse ser todo refeito – agora apoiado em alicerces mais firmes. São nesses “instantes” em que se faz necessária a revisão e reconstituição das bases que Bachelard enxerga os momentos de ruptura que caracterizam a Ciência em seu processo de evolução. Tais rupturas são vislumbradas, por exemplo, na migração das Transformações de Galileu para as de Lorentz – movimento possível graças à reinterpretação das ideias fundamentais de espaço e tempo e da assunção de um caráter absoluto à velocidade da luz no vácuo (independente do referencial considerado) – e no surgimento das Mecânicas Ondulatória de Schrödinger e Matricial de Heisenberg, que passavam a dispensar todas as hipóteses semiclássicas que permeavam as primeiras teorias quânticas típicas das duas décadas iniciais do século XX.

Em resumo, a Epistemologia de Bachelard busca se moldar à contemporaneidade a partir da apreciação dos seguintes aspectos (que, aliás, a colocam em forte oposição às filosofias científicas dita tradicionais):

- Valorizar das construções racionais da Ciência e de sua linguagem específica para distanciá-la do conhecimento comum (desestruturado, frouxo, efêmero e, portanto, não científico).
- Evocar do caráter social da Ciência, mostrando que o seu progresso não é mais fruto da atividade “encarcerada” e “isolada” de um indivíduo, mas, sim, da ação coletiva da comunidade científica especializada.
- Deixar-se guiar pela Ciência em voga, de forma a definir uma Filosofia das Ciências enquanto sistema aberto.
- Atuar no afastamento dos “valores subjetivos inconscientes” que tendem a retardar ou desviar a Ciência de seu movimento progressivo.

2.3. Os obstáculos epistemológicos

A superação dos “valores subjetivos inconscientes” enquanto tarefa da Epistemologia Bachelardiana foi disposta, na seção anterior, propositadamente como último item da lista por ser ela a que alude aos famigerados obstáculos epistemológicos, conceito fundamental e, portanto, de enorme importância para a dimensão diurna da obra de Bachelard. Como já descrito, os tais obstáculos transfiguram-se em barreiras de grande extensão presentes nas fronteiras últimas do conhecimento, cujas transposições demandam a reflexão e a reestruturação da Ciência enquanto construção humana. Nas palavras de Bachelard:

“Quando se procuram as condições psicológicas do progresso da ciência, logo se chega à convicção de que *é em termos de obstáculos que o problema do conhecimento científico deve ser colocado*. E não se trata de considerar obstáculos externos, como a complexidade e a fugacidade dos fenômenos, nem de incriminar a fragilidade dos sentidos e do espírito humano: é no âmago do próprio ato de conhecer que aparecem, por uma espécie de imperativo funcional, lentidões e conflitos. É aí que mostraremos causas de estagnação e até de regressão, detectaremos causas de inércia às quais daremos o nome de obstáculos epistemológicos”. (BACHELARD, 1996, p. 17).

Contribuem decisivamente para as resistências e letargias de pensamento a postura conservativa assumida pelo espírito científico que, segundo Bachelard, prefere, a partir de certa idade, confirmar o que sabe a questionar o que está posto. Este chega a citar, inclusive, um “epistemólogo irreverente” (BACHELARD, 1996, p.19) que afirma que “os grandes homens são úteis à ciência na primeira metade de sua vida e nocivos na outra metade” (BACHELARD, 1996, p.19). Assim, passa-se de uma atitude formativa e questionadora a outra conservadora e tradicionalista. A primeira traz a coragem e o ímpeto para ir a fundo nos trabalhos de revisão e eventual reconstrução da Ciência do momento; a segunda, em contrapartida, prefere atuar na defesa e na reafirmação da Ciência em sua condição vigente. Aliás, pautando-se pela

Ciência Contemporânea na qual se molda o esquema epistemológico bachelardiano, convém recordar que Einstein viveu por 76 anos e, aos 25/26, contribuiu cientificamente com quatro artigos que balançaram, no melhor dos sentidos, os alicerces da Física até ali concebida; Heisenberg finalizou a sua Mecânica Matricial aos 23/24 anos de idade e viveu até os 74; o exemplo mais curioso, entretanto, é o de Planck que, em sua longeva vida de 89 anos, concebeu a revolucionária ideia da quantização de energia dos ressonadores de cavidade (para explicar o problema da Radiação Térmica do Corpo Negro Ideal) aos 42 anos de idade – bem próximo, portanto, daquilo que correspondeu ao marco médio de sua existência. Interessante, ainda, é observar que mesmo depois dos trabalhos de Einstein de 1905 (sobre o Efeito Fotoelétrico) e de 1907 (sobre o calor específico dos sólidos), nos quais a quantização de energia constituía o ponto de partida para os desenvolvimentos teóricos levados a cabo, Planck, exercendo o instinto conservativo próprio da segunda metade da sua vida, passou a se opor à hipótese da descontinuidade da energia e a tentar retomar o problema da Radiação Térmica em termos tipicamente clássicos – como pode ser constatado em trabalhos que remontam a 1912 e a 1914.

Longe de querer revestir a fala do dito “epistemólogo irreverente” de certo caráter científico pelos exemplos acima considerados, pretende-se, sim, ilustrar como a Ciência progride, aos olhos de Bachelard, a partir do confronto dos instintos formativos de uns com os conservativos de outros e, também, como a típica conduta científica do ser humano passa da flexibilidade ao enrijecimento. Certamente, este movimento de endurecimento atitudinal acompanha o trabalho científico em âmbito maior, afinal, à medida que uma teoria ou conceito inicialmente visto como revolucionário se mostra correto depois de sucessivos testes, passa a agregar, na sua zona proximal, uma série de elementos que visam imbui-lo de certa concretude. Neste sentido, surgem metáforas, analogias e associações que, por vezes, passam a substituir o objeto original de forma prejudicial – uma vez que atravancam o desenvolvimento científico. Para Bachelard, o vetor diretor que orienta o progresso da Ciência é, em tempos atuais, tipicamente abstrato. Recobri-lo de viés de materialidade é, portanto, atitude que, apesar de oferecer maior acessibilidade à sua compreensão, tende a levá-lo à uma fronteira cuja transposição exigirá a restituição de sua abstração.

Mais do que associá-lo a um elemento importante no processo de desenvolvimento científico, onde exerce uma atuação macroscópica, pode-se inserir, analisar e estudar os obstáculos epistemológicos bachelardianos na escala microscópica nas formas pelas quais professores e alunos coordenam suas respectivas construções do conhecimento científico. É fato que o aluno que se abre para a aprendizagem de um novo conteúdo (assim como o professor que atua como agente organizador do processo de ensino-aprendizagem) não se coloca como um ser cru, um alguém onde os conhecimentos serão depositados e justapostos. Por outro lado, sempre que se vê diante de uma realidade específica, o sujeito aprendiz e o agente instrutor vão, antes de tudo, confrontar os objetos envolvidos às suas convicções pessoais, às suas experiências primeiras (imediatas e sedutoras) ou às consequências primeiras de um raciocínio aparentemente científico mas, em geral, precoce quanto à elaboração e rudimentar em estrutura.

Ao discutir a aplicação pedagógica do conceito, Bachelard é extremamente feliz ao apresentar o exemplo clássico da flutuação de sólidos em líquidos. Em sua experiência cotidiana, ao perceber que diferentes objetos flutuam ou não na água presente em um copo, na piscina de um clube etc., o aluno tende a atribuir, em primeira análise pretensamente científica, a capacidade ou não de flutuar ao corpo. O corpo, em si, parece surgir como agente causador do fenômeno observado. Dificilmente se alude a uma força exercida pela água sobre o objeto em questão (o empuxo) para modelar os acontecimentos físicos processados. Na visão da maioria dos alunos, a água (ou qualquer líquido que possa substituí-la) tem relevância minoritária ou não tem parte alguma no fenômeno em questão.

Independente da escala na qual se pretenda observar o processo de construção do conhecimento, Bachelard enxerga uma mesma lista, enumerável e fixa, de obstáculos epistemológicos que julga serem intervenientes na dita dinâmica. Em seu desenrolar pioneiro da teoria, centra a sua análise inicial nos obstáculos epistemológicos dito “gerais”, categoria onde insere a “experiência básica” como o primeiro e mais importante entrave a ser superado.

Aqui, o contato inicial com certo fenômeno, leve, ingênuo e sedutor, converte-se em afrontoso à objetividade do conhecimento se calcado no imediatismo das conclusões primeiras, geralmente flácidas e despidas de real importância

científica. Qualquer construção própria da Ciência que se pretenda imbuir de verdade é processual e, segundo Bachelard, deve-se pautar pelo movimento alternado e colaborativo entre o empírico e o racional e buscar uma feição progressivamente abstrata a partir da qual a realidade possa ser deduzida como caso particular. Assim, aliás, se dá a dinâmica do “racionalismo aplicado” bachelardiano.

Para situar este obstáculo epistemológico no seio da História das Ciências, convém lembrar que a Eletricidade, desde os tempos de Tales de Mileto (século VI a.C.) – época a partir da qual começou-se a reunir uma série de evidências fenomenológicas que partiram das propriedades misteriosas do âmbar atritado – até o século XVIII, consistia em uma justaposição de numerosas manifestações diretamente vinculadas à Natureza e frouxamente correlacionadas entre si. Coube a Charles A. Coulomb, na segunda metade do século XVIII, dar o primeiro passo rumo à abstração subjacente às relações quantitativas que, graças aos trabalhos posteriores de Volta, Oersted, Ampère, Faraday, Kirchhoff e Maxwell (apenas para citar alguns), acabaram por oferecer a grande contribuição de reorganizar convenientemente toda a série de fenômenos já conhecidos e, além disso, possibilitar o vislumbre de novos horizontes (onde se insere, por exemplo, a realização experimental, por Heinrich Hertz, das ondas eletromagnéticas – já previstas teoricamente pelas equações de Maxwell – e o entendimento da luz visível, há tanto conhecida, como um típico exemplo destas ondas).

Investir contra a experiência básica significa combater as imagens, metáforas e analogias que se originam, de pronto, a partir do paralelismo estabelecido entre algo naturalmente observado e as vivências pessoais do observador (este repleto de paixões, convicções e desejos, todos subjetivos e danosos ao novo espírito científico instituído pela Ciência contemporânea). A autêntica objetividade que se pretende alcançar é, antes de tudo, fruto do exercício constante da isenção, da postura crítica e da atitude reflexiva e deve transpor as representações concretas que tentam conferir ao conhecimento científico (mesmo àquele dito “de fronteira”) um aspecto afável e digerível, capazes de “vender” ao leigo a ideia errada de uma Ciência que guarda, na Natureza, uma imagem sensível e acessível para qualquer dos conceitos que lhes são próprios.

Neste ponto, cabe uma crítica pedagógica já trazida por Bachelard em *A Formação do Espírito Científico* (e que ainda permanece atual) sobre o ensino de Ciências e, também, sobre os materiais nos quais este se apoia. Na tentativa de prover melhor entendimento entre os alunos dos objetos de aprendizagem, o ensino tem se cercado de todas essas metáforas e analogias que estão assumindo lugar de preponderância ante os reais conceitos científicos a que deveriam aludir. É este fato, agregado à preocupação de se lidar, em classe, com uma Ciência que tenha correspondência na experiência cotidiana, que fomenta a difusão de uma Ciência imobilizada, bem-comportada e limitada – uma vez que está condenada a se restringir ao mundo natural que nos cerca.

Enquanto a experiência básica se coloca como obstáculo epistemológico “de entrada” (visto como consequência da interação efêmera entre um sujeito e um conhecimento que se coloca diante dele), o segundo obstáculo geral – a generalização prematura – aparece como distorção vinculada à “saída”, à extensão equivocada de uma relação particular fracamente estabelecida para outros domínios científicos. Tem-se aqui uma atitude muito frequente na Ciência anterior à contemporânea que, até o século XVIII, costumava reunir objetos e fenômenos científicos diversos sob os mesmos termos científicos com intenções unificadoras e universalizantes. Foi assim, por exemplo, com a palavra “coagulação”, empregado “para designar as transformações de estado ocorridas com o leite, a gordura, o sangue e até o fenômeno de congelamento da água” (BULCÃO, 2009, p. 62).

A atitude extremada da generalização precoce é condenada por Bachelard por, segundo ele, dar margem a uma Ciência estagnada pela ação de “conceitos esclerosados”, enrijecidos e, portanto, pouco deformáveis – tal como a parede de uma célula vegetal onde há excesso de deposição de lignina. A propósito, é este poder de deformação que confere riqueza de constituição a dado conceito científico e não, como se pode pensar em primeira instância, a sua adequação a uma observação específica ou a sua capacidade em abarcar diferentes campos ou áreas do conhecimento. As duas últimas posturas são, inclusive, características do espírito pré-científico vigente até o fim dos anos 1700. Ante à defesa das posturas extremistas sugeridas pela particularização e pela universalização, Bachelard sugere uma atitude intermediária na qual as

condições de aplicação do conceito são de grande relevância para que se avalie o seu poder de deformação. Mais uma vez, o equilíbrio harmonioso entre empirismo e racionalismo deve se instaurar para prover, em um movimento oscilatório, as sucessivas reformulações de um conceito verdadeiramente científico e, portanto, de considerável poder de deformação. Em suas palavras:

“Na experiência, (a conceitualização) procura ocasiões para *complicar* o conceito, para *aplicá-lo*, apesar da resistência desse conceito, para realizar as condições de aplicação que a realidade não reúne. É então que se percebe que a Ciência *constrói* seus objetos, que nunca ela os encontra prontos. A fenomenotécnica *prolonga* a fenomenologia. Um conceito torna-se científico na proporção em que se torna técnico, em que está acompanhado de uma técnica de racionalização. Percebe-se que o problema do pensamento científico moderno é, de novo, um problema filosoficamente intermediário.” (BACHELARD, 1996, p. 77)

Imprescindível a um conceito dito “proliferante” (em oposição ao “esclerosado” já comentado), o caráter matemático é fundamental para permitir o vaivém entre as atitudes racionais e empíricas, pois é a sua estruturação funcional (isto é, a sua representação por funções – na acepção matemática do termo) a responsável por apresentar possíveis realizações conceituais jamais vislumbradas até então e, assim, orientar e organizar os testes que são extremamente importantes para a ampliação das condições de aplicação ou para a reconceitualização eventualmente necessária.

Feitas as discussões sobre os obstáculos epistemológicos gerais, que sinalizam a radicalização de condutas filosóficas específicas (um realismo ingênuo com a experiência básica e a racionalização lânguida vista na generalização prematura), Bachelard passa a discutir os chamados obstáculos particulares, assim denominados apenas para efeito de classificação, de didatismo quanto à explanação. Afinal, como será notado nas próximas linhas, todos eles guardarão, em certa medida, relação com os gerais já discutidos.

Como primeiro exemplo, Bachelard investe na análise do verbalismo, um entrave que decorre da relação entre os conceitos e os fenômenos científicos e a

linguagem utilizada para descrevê-los. Uma vez que a evolução não-linear e descontínua da Ciência não é acompanhada, *pari passu*, pela reestruturação do linguajar utilizado em sua expressão, condiciona-se e limita-se, costumeiramente, a “expressão do novo pelo emprego do velho”. E as palavras velhas, já carregadas de vícios e vieses, tendem a levar os desavisados por rotas oblíquas e perigosas.

Neste âmbito, Bachelard fará nova referência ao cuidado com as metáforas que, por meio de um conjunto restrito de palavras, oferece a tentadora possibilidade de abranger um sem número de ideias e valores científicos – um poder tamanho que, facilmente reconhecido, tende a relegar tais valores a um plano de segunda ordem quanto à importância. Vale ressaltar, entretanto, que um conceito proliferante, por ser dotado de grande poder de deformação, jamais será completamente esgotado por um conjunto limitado e fixo no tempo de palavras e quaisquer outras representações linguísticas – uma vez que a renovação da linguagem se dá de forma mais lenta que o progresso científico. A expressão simbólica, independente da forma, sempre reproduzirá determinado conceito dentro de certo grau de precisão útil para dada aplicação e/ou circunstância.

Para ilustrar, na prática, uma ocorrência típica do obstáculo verbal, Bachelard dedica um capítulo inteiro de *A Formação do Espírito Científico* (BACHELARD, 1996) para a discussão do caso da esponja, tão aproveitada para explicar fenômenos físicos até o fim do século XVIII. Entre os exemplos considerados, cita o do ar, descrito em um trabalho de Ferchault de Réaumur como uma esponja em sua capacidade de adensar-se e rarefazer-se.

Posteriormente, Bachelard avança para o próximo obstáculo particular, que constitui, aliás, um retrato fidedigno do espírito pré-científico que dominou a Ciência até o fim do século XVIII: o substancialismo. Neste caso, o desenvolvimento da Ciência fica comprometido pela vinculação de diversas propriedades, muitas vezes antagônicas, ao mesmo objeto científico, ferindo os ideais de precisão tão importantes para firmar as bases científicas em sólidas estruturas.

As mostras mais comuns do exercício deste obstáculo numa prática científica anterior à da Ciência contemporânea estão na Medicina. Os compostos

medicinais eram, antes de tudo, valorizados pelos seus adjetivos e quanto mais qualidades carregavam, mais nobre as suas respectivas condições científicas. Por exemplo, “segundo a *Encyclopédie*, a mera raiz de cardo-santo é vomitiva, purgativa, diurética, sudorífica, expectorante, emenagoga, alexitérica, cordial, estomacal, hepática, antiapoplética, antiepilética, antipleurética, febrífuga, vermífuga, vulnerária e afrodisíaca, ou seja, tem 17 propriedades farmacêuticas” (BACHELARD, 1996, p. 141). Exponencialmente superiores em valor estavam, ainda, as misturas complexas destas substâncias individuais, simplesmente por possibilitarem a justaposição de todas as propriedades particulares de cada uma delas – como as “teriagas” de “150 substâncias” ou de “mil bálsamos”, nas quais as proporções dos compostos envolvidos em suas formações eram irrelevantes perto da confluência de tantos adjetivos que as aproximavam de verdadeiros elixires.

Em tempos atuais, o mercado farmacêutico preza pela especificidade dos remédios, mas ainda assim vende antes a propriedade do que a substância – o que, de certa forma, a aproxima ainda de um espírito pré-científico em versão atenuada. Neste sentido, a composição “sulfato de neomicina + bacitracina” ocupa posto de segundo plano ante o poder de cicatrização para o qual contribui.

O transcorrer de mais de 2 séculos desde a publicação da *Encyclopédie*, portanto, não foi suficiente para eliminar o obstáculo substancialista da compreensão científica. E tal fato não se restringe, obviamente, ao meio medicinal. Em tecnologia, compra-se antes um apanhado de qualidades e pouco se reflete sobre a parte operacional do conjunto. Não se percebe, nesta e em tantas outras situações, que as propriedades e qualidades resultam da interação entre objetos científicos e o sujeito usuário, mediada por fenômenos físicos de diferentes graus de complexidade. Aparentemente, “a noção de substância está arraigada no inconsciente” (BULCÃO, 2009, p. 65). Suprimir o dito obstáculo, então, envolve um esforço colossal de conscientização que seja capaz de atribuir maior relevância aos fenômenos e às suas relações, subtraindo o papel influente exercido pelas substâncias e por seus respectivos adjetivos.

Do domínio das Ciências Biológicas, emerge o “animismo” enquanto terceiro obstáculo epistemológico particular. Neste caso, as dificuldades surgem pela atribuição de caráter fundamental ao conceito de vida, extrapolado para outras

instâncias científicas além daquelas delimitadas pela Biologia. No referencial dos cientistas dos séculos XVII e XVIII, principalmente, era extremamente razoável que tal noção, de fácil intuição e incrivelmente acessível aos sentidos, pudesse ser vinculada aos processos físicos e químicos, por exemplo.

É desta forma que as classificações científicas do período vão considerar, como exemplos, algumas correspondentes no mundo biológico. É assim que processos como o da digestão serão admitidos como basais para explicar a ação química de corrosivos e a coordenação dos fenômenos que se dão no interior da Terra para a formação de produtos mineralógicos. Citando Robinet (1766), Bachelard escreve:

“Um líquido circula no interior do globo. Carrega partes terrestres, oleosas, sulfurosas, que transporta para as minas e as pedreiras a fim de alimentá-las e apressar-lhes o crescimento. Essas substâncias são de fato transformadas em mármore, chumbo, prata, como o alimento no estômago do animal torna-se a própria carne.” (ROBINET apud BACHELARD, 1996, p. 220).

É também por um caminho biológico que comportamentos específicos de elementos e compostos químicos serão associados a termos extraídos do âmbito biológico da sexualidade. Extraído do *Dictionnaire hermétique* (Paris, 1695, p. 112), tem-se a seguinte passagem como exemplo: “O mercúrio é estéril. Os Antigos o acusaram de esterilidade devido a sua frieza e umidade; mas, quando ele é purgado e preparado como se deve, esquentado por seu enxofre, perde a esterilidade”. (apud BACHELARD, 1996, p. 231).

Enfim, a Ciência construída por este caminho tinha por intenção a construção de pontes entre fenômenos mais próximos (aqueles cotidianamente presentes na vida biológica – notavelmente a do ser humano) com outros mais distantes pelos seus respectivos graus de especificidade, buscando o intuito de fazer da ampla Ciência um corpo de conhecimentos táteis ao homem comum, repleta de eventos que, apesar de aparente complexidade inicial, sempre possuem uma homologia para com algum processo corriqueiro no qual a vida tome parte.

Por fim, Bachelard fecha o quadro de obstáculos epistemológicos particulares discorrendo sobre a “matematização precoce”, execrando a emergência de um

conhecimento quantitativo vinculado às imagens primeiras de dado fenômeno científico. Afinal, estas imagens, geralmente, encontram-se afetadas pela fraqueza da ingenuidade – comum às primeiras impressões obtidas. Primeiras impressões frouxas geram relações matemáticas desprovidas de amplo sentido, haja vista que, dificilmente, proverão informações corretas e/ou relevantes sobre a predição de resultados importantes no que tange ao objeto em estudo.

Como a introdução do ferramental matemático requer, antes de tudo, a consideração do ato de medir, sugere-se, de forma equivalente, que a primeira aproximação requer uma análise prévia cuidadosa que seja capaz de organizar, de forma sistemática, as grandezas a serem avaliadas, o grau de precisão que se pretende atingir no processo de mensuração e, finalmente, os instrumentos de medida a serem empregados. Tem-se, assim, uma espécie de “receita” a ser admitida para se evitar a incidência em uma faceta específica da “experiência básica” (o primeiro obstáculo epistemológico geral da teoria bachelardiana): a inserção extemporânea do aspecto matemático.

As mostras históricas da atuação da “matematização precoce” enquanto obstáculo epistemológico particular são diversas e avançam, inclusive, o século XIX – período no qual, segundo Bachelard, prevalece o espírito científico já encarado como evolução do pré-científico multiforme típico dos séculos anteriores. Acredita-se que um dos exemplos, inclusive, foi crucial para o emergir da teoria quântica enquanto parte importante da Ciência contemporânea: a modelagem matemática do problema da “Radiação Térmica” levada a cabo por John W. Strutt (Lord Rayleigh) e por Sir James H. Jeans. A raiz da incompatibilidade entre os resultados matemáticos decorrentes da lei de Rayleigh-Jeans e as medidas experimentais associadas ao fenômeno está na adoção de uma estrutura clássica para explicar algo cuja origem está vinculada ao “mundo do muito pequeno”. Tudo porque a Física da época colecionava fortes evidências em favor das Mecânicas Newtoniana, Lagrangiana e Hamiltoniana, da Termodinâmica de Carnot, Clausius e tantos outros e no Eletromagnetismo de Maxwell, estruturas, então, tão sólidas que o problema da escala, segundo se acreditava, não constituiria barreira às suas aplicações em outros domínios. Em análise *a posteriori*, Bachelard criticará, de forma veemente, o desdém ante a importância das escalas e das ordens de grandeza, sugerindo que ideias

simples (como a de proporcionalidade, por exemplo) são extremamente sedutoras e instigam a mera transposição direta de raciocínios já verificados e consolidados em um contexto para outro onde se mostram incrivelmente inadequados.

À medida que se regressa no tempo, incrementa-se a coleção de exemplos ligados ao obstáculo da “matematização precoce”. No século XVIII, a desconsideração dos erros e das perturbações por parte dos cientistas (que enxergavam no conceito de “lei científica” apenas as formulações que poderiam conduzir a resultados inequívocos, sem margens para qualquer dúvida) resultaram na determinação de diversas expressões matemáticas simples e elementares para a descrição dos mais variados fenômenos científicos. Muitas destas leis, exatas aos olhos dos cientistas deste período, cobriam, na verdade, um domínio específico de avaliação e apresentavam divergências quando extrapoladas para outros âmbitos. Vigorava, naquela fase, o imperativo do “determinismo laplaciano”, assim denominado em homenagem ao francês Pierre Simon, marquês de Laplace (1749 – 1827) – o seu principal defensor. Tal teoria filosófica pode ser sintetizada no seguinte excerto extraído do seu *Ensaio filosófico sobre as probabilidades*, de 1814:

“Devemos, pois, encarar o estado presente do Universo como o efeito de seu estado anterior e como causa do que vai seguir-se. Uma inteligência que, por um instante dado, conhecesse todas as forças de que está animada a natureza e a situação respectiva dos seres que a compõem, e que, além disso, fosse ampla o bastante para submeter os seus dados à análise, abarcaria na mesma fórmula os movimentos dos maiores corpos do Universo e os do mais leve átomo: nada seria incerto pra ela, e o futuro, como o passado, estaria presente aos seus olhos...”.
(apud BERGÉ, POMEAU, DUBOIS-GANCE 1996, p. 30.)

Mais do que explicitar a problemática com o tratamento equivalente dedicado a diferentes ordens de grandeza, o trecho acima defende uma interação entre todos os fenômenos do Universo – que, aliás, é governada pela mesma fórmula. Tal percepção vai em defesa de outra prática científica recorrente entre aqueles imbuídos de um espírito pré-científico: o estudo quantitativo de grandezas físicas a partir de instrumentos que, em verdade, detinham o propósito de avaliar outros

mensurandos. Como exemplo, Bachelard cita o caso do fluido elétrico: não havendo instrumento específico para a sua quantificação, os cientistas da época “apelavam”, repetidas vezes, para o termômetro, tal como atesta o excerto abaixo:

“Como a matéria elétrica é considerada semelhante ao fogo, sua influência nos órgãos dos corpos vivos deve provocar calor; a maior ou menor elevação do termômetro encostado à pele vai, portanto, indicar a quantidade de fluido elétrico do corpo humano”. (BACHELARD, 1996, p. 269)

Sobrepular a “matematização precoce” significa, então e em suma, introduzir os aspectos quantitativos em momento oportuno, depois de um estudo inicial cuidadoso que seja capaz de, qualitativamente, reconhecer as grandezas relevantes ao objeto em análise para, em seguida, se eleger os instrumentos de medida adequados para a ordem de precisão que se pretende alcançar, cuidando de mensurar, também, a dimensão dos erros e das perturbações sempre presentes de modo a reconhecer a sua influência no domínio em questão para, finalmente, identificar e traçar claramente as fronteiras da modelagem matemática a ser concebida em última instância.

Uma vez concluída a apresentação e discussão, em detalhes, dos obstáculos epistemológicos bachelardianos, julga-se oportuno construir um pequeno “quadro-resumo” que possa referenciar a essência de cada um deles e ao qual se possa retomar nas ocasiões em que se fizerem necessárias a vinculação destes a problemas específicos no processo de ensino-aprendizagem de alguns tópicos de FMC. Posto o fosso existente entre os esquemas científicos clássico e contemporâneo, é de se esperar que os diferentes obstáculos epistemológicos bachelardianos (e outros, que eventualmente complementaríamos o quadro inicial montado pelo estudioso francês) atuem de forma incisiva nas relações de ensino-aprendizagem. Mapear as principais barreiras/entraves no ensino de Física Moderna e Contemporânea, associando-as aos ditos obstáculos, constitui, aliás, o grande propósito deste trabalho.

O dito quadro segue abaixo exposto:

Tabela 1: Quadro-resumo dos obstáculos epistemológicos bachelardianos.

Obstáculos epistemológicos	
Gerais	
Experiência básica	Associada aos contatos imediatos com o mundo exterior sensível, pode contribuir para a constituição de metáforas e analogias que deturpam as essências dos objetos científicos em análise.
Generalização prematura	Reunião imatura de diversos fenômenos em torno de poucos “termos-chave” na tentativa de construir conexões que, em várias situações, estabelecem aproximações incorretas e travam a Ciência em sua rota de avanço.
Específicos	
Verbalismo	Distorções geradas por limitações impostas pela linguagem empregada na definição de termos científicos.
Substancialismo	Vínculos metafóricos mal executados entre substâncias sensíveis e objetos científicos na tentativa de conferir concretude à prática científica.
Animismo	Tentativa de explicação das Ciências Físicas pela atuação de aspectos, propriedades e características dos seres animados de vida, tipicamente estudados no domínio da Biologia.
Matematização precoce	Antecipação na introdução de tratamentos quantitativos descuidados que tendem a desviar da realidade objetiva subjacente a dado fenômeno científico.

2.4. Jerome Bruner: vida e obra

Jerome Seymour Bruner, nascido a 1º de outubro de 1915, foi o mais novo entre quatro filhos que, junto a seus pais e a dois primos, compunham uma família judia que vivia nos subúrbios de Nova York.

Logo aos dois anos de idade, Bruner foi obrigado a passar por uma cirurgia (a primeira de duas) para corrigir uma cegueira precoce, causada por cataratas. Por trás deste evento tão prematuro – do qual Bruner afirma não guardar nenhuma memória pessoal – está um elemento que, somado *a posteriori* “aos sorrisos charmosos e às conversas espirituosas” (TAKAYA, 2013, p. 2 – tradução do autor), comporia um dos seus traços mais marcantes por longos anos: os óculos formados por lentes grandes e espessas.

Seu pai, dono de um negócio vinculado à fabricação de relógios, faleceu em 1927 – quando Bruner tinha 12 anos de idade, portanto. A morte do pai forçou a família a viajar constantemente pelo país (Flórida, Califórnia e o interior dos Estados Unidos constituem alguns exemplos de locais). Forçado, em função dos deslocamentos, a cursar o *high school* em 6 diferentes escolas, Bruner atesta que o seu ensino secundário foi “apavorante” (BRUNER *apud* LEFRANÇOIS, 2000, p. 198 – tradução do autor). Além de não ter a possibilidade de estreitar laços com escolas e professores para criar identificações, Bruner, conseqüentemente, não desenvolveu interesse notável pelos estudos escolares em um nível que, eventualmente, justificasse uma propensão intelectual prematura. Em sua autobiografia, afirma taxativamente: “Não tinha curiosidade intelectual particular nos ensinamentos escolares” (BRUNER *apud* TAKAYA, 2013, p. 1 – tradução do autor). Em contrapartida, manifestava um entusiasmo incomensurável em aprender de forma mais autônoma e independente. Adorava consultar, regularmente, a coleção de 11 volumes que o seu pai mantinha da *Encyclopaedia Britannica* (SHORE *apud* TAKAYA, 2013, p. 2 – tradução do autor). Seria este impulso a real origem para a defesa posterior, já como pesquisador renomado, da “aprendizagem por descobertas” – uma das palavras-chave mais frequentes quando se refere ao trabalho pedagógico de Bruner?

Aos 17 anos, ingressou na Duke University e lá conquistou o seu Bacharelado em Artes em 1937. Quatro anos à frente, em 1941, obteve o título de Doutor em Psicologia pela Harvard University e, desde então, passou a atuar como professor naquela instituição. Ali fundou e dirigiu o Centro para Pesquisas Cognitivas. Também acumulou, ao longo de sua trajetória como docente e pesquisador, posições acadêmicas em Princeton, Cambridge e Oxford.

Da década de 1940 em diante, Bruner teve a oportunidade de investigar a mente humana sob perspectivas incrivelmente plurais: sua obra, além do evidente viés atrelado à Psicologia e da intensa aplicação à área da Educação, tangenciava a Literatura, a Filosofia, a Antropologia etc. Dentro da Psicologia, inclusive, desenvolveu trabalhos e pesquisas que se enquadravam em diferentes correntes. Enquanto muito jovem, fez experimentos tipicamente behavioristas usando animais para buscar correlações entre estímulos e respostas, crendo que os resultados observados poderiam ser transpostos para entender certos mecanismos que regem o funcionamento do pensamento humano; com o advento das Ciências Cognitivas (que se empenhavam em lidar, de forma ampla, com a natureza da mente humana, distinguindo seres humanos de animais e mente de reflexos comportamentais), Bruner, já em Harvard, desfez os seus laços com o Behaviorismo em voga para, inspirado em grandes nomes como Jean Piaget e Bärbel Inhelder, abraçar essa nova área de estudos e lançar grandes trabalhos sobre o assunto. A partir destas influências, edificou, por exemplo o conceito de *representações*, como diferentes formas de apresentação do conhecimento a partir de diversos modos de interação com o mundo – formas estas que se ajustam de acordo com o estágio de desenvolvimento intelectual do sujeito aprendiz. Entretanto, nesta *Teoria de Estágios de Desenvolvimento*, Bruner admite, implicitamente, que a motivação para aprendizagem seria natural e que os indivíduos poderiam conduzir os seus esquemas de incremento cognitivo como “aprendizes solitários” (KATAYA, 2013, p. 12 – tradução do autor). É esta percepção que resulta no “flerte” com a Psicologia soviética, representada pelas figuras de Lev S. Vigotsky e de Alexander Luria e que detinha uma linha predominante de pesquisa: estudar e analisar como a sociedade provê instrumentos para o fortalecimento intelectual do indivíduo. Assim, pode-se reconhecer que aqui surge o Bruner partidário da “Psicologia Cultural”.

Ainda na linha da pluralidade salientada no parágrafo anterior, pode-se afirmar que o prolífico psicólogo estado-unidense, ao longo de sua extensa trajetória profissional, permeou os seguintes temas nos correspondentes períodos: percepção e pensamento nos anos 1940 e 1950, motivos retratados, por exemplo no livro *“A Study of Thinking”*; intuição, invenção e mitologia, possivelmente ilustrados por *“On Knowing: Essays for the Left Hand”* e desenvolvimentos cognitivo e linguístico tal como trabalhados em *“Studies in Cognitive Growth”* e em *“Child’s Talk”* nos anos 1960 e 1970; a natureza das narrativas e várias formas de interação e de elaboração centradas em manifestações culturais – vistas, cronologicamente em *“Actual Minds, Possible Worlds”*, *“Acts of Meaning”*, *“The Culture of Education”* e *“Making Stories: Law, Literature and Life”* dos anos 1980 em diante. Diante do quadro posto, acredita-se que não há frase melhor para ilustrar a polivalência de Bruner do que aquela que emprestou de seu amigo de Oxford Isaiah Berlin, que o descreveu como “uma raposa em vez de um ouriço, preferindo saber muitas coisas em vez de uma coisa grande” (BRUNER *apud* TAKAYA, 2013, p. 3 – tradução do autor).

Em 1983, no auge de seus 68 anos de idade, escreveu uma análise autobiográfica que se encerrou com o seguinte excerto: “Suponho que minha vida tenha sido boa... A Psicologia certamente a ajudou a ser assim, Psicologia como meio de investigação e não como base de sabedoria (BRUNER *apud* LEFRANÇOIS, 2000, p. 198 – tradução do autor). O início do trecho, que sinaliza claro tom de dever cumprido, suscita um Bruner que, ao menos em aparência, mal desconfiava que muito trabalho sobreviria: faleceu em 2016, aos 100 anos de idade, conduzindo a sua paixão pela aprendizagem e pelos mecanismos que a sustentam e alimentam até os seus últimos dias.

2.5. O cognitivismo de Bruner: a aprendizagem como uma aventura

A obra de Bruner voltada para as teorias de instrução é, entre o público geral, resumida em expressões tais como “currículo em espiral” e em falas impactantes como aquela em que garante que “é possível ensinar qualquer assunto, de uma maneira honesta, a qualquer criança em qualquer estágio de desenvolvimento”

(1969). Em cada uma destas manifestações, tem-se, nesta ordem, a exposição de uma estrutura fundamental e de um pormenor extremamente saliente que, em verdade, correspondem a aspectos muito particulares de uma teoria de aprendizagem muito bem organizada e descrita em suas nuances. Nesta seção deste trabalho, pretende-se apresentar uma versão sintetizada do arcabouço pedagógico de Bruner, gerado a partir de vasta coletânea de obras que refletiram sobre a questão.

Enquanto psicólogo, Bruner se põe, de início, a refletir, em termos cognitivos, sobre o aprendizado da criança e sobre a sua evolução com o avançar do tempo – à medida em que passa a acumular experiências e a estreitar relações com o contexto escolar. Aprender significa interagir com um mundo, com um universo que, nem sempre, está disponível de imediato para ser experimentado pelos sentidos. Esta observação dá sentido ao conceito do autor de *representação*, que consiste na forma pela qual o indivíduo se relaciona com o meio onde se insere na tentativa de entendê-lo, explicá-lo e gerenciá-lo/dominá-lo. No transcorrer de seu desenvolvimento intelectual, o ser humano acumula novas representações que traduzem modos alternativos e/ou complementares de interação dotados de diferentes graus de complexidade e abstração. Fala-se, aqui, nas *representações ativa, icônica e simbólica*, descritas a seguir.

- *representação ativa*: em seus primeiros anos de vida, em um período comumente iniciado com a aquisição da linguagem e que avança pelos primeiros anos da vida escolar, a criança interage intensamente com o universo imediatamente disponível pelas ações físicas e sensoriais explícitas. Experimentar o mundo significa agir sobre diretamente sobre ele. Brincar com a própria sombra ou com o próprio reflexo em um espelho plano, lambe o focinho do cachorro, assustar-se com o trovejar em dias chuvosos e tentar colocar os dedos na tomada são, apenas, alguns exemplos cômicos e perigosos de como se dão as descobertas nesta fase.
- *representação icônica*: a partir de certo estágio da vida escolar, a criança já acumula instrumental suficiente para internalizar algumas operações e, assim, extrair dados do mundo disponível, selecioná-los, organizá-los e prever comportamentos sem depender de ações sensoriais explícitas –

que, agora, podem ser substituídas por esquemas mentais internos e reversíveis. Em exemplo simples, mas ilustrativo, a criança já é capaz de entender que a mistura dos conteúdos de duas pequenas bacias, uma contendo três tomates e outra contendo outros quatro, gera, em um terceiro recipiente, um conjunto de sete tomates sem operar ativamente com os frutos. Mesmo que as bacias e os tomates não estejam presentes nas cercanias, a criança pode obter informações diversas sobre a situação (formas dos recipientes, cores, tamanhos e quantidades dos tomates etc.), selecionar as entradas relevantes para a resolução do proposto (quantidades dos tomates), manipular sinais que substituam as figuras físicas dos tomates (os algarismos “3” e “4”), organizá-los segundo uma operação (adição de números naturais) e, finalmente, prever a configuração final do conjunto em termos de conteúdo (sete tomates). Todo esse sequenciamento de operações pode, segundo Bruner, ser resumido em duas atitudes: organização perceptivas das informações disponíveis e sucessiva transformação econômica dessas organizações.

- *representação simbólica*: os símbolos já presentes de forma incipiente na fase anterior adquirem, aqui, complexidade maior e passam a predominar na coordenação das maneiras pelas quais se interage com o meio. Conquistada a capacidade de formulação de proposições hipotéticas e dominada a manipulação adequada de símbolos e de suas relações, permite-se, inclusive, a exploração de universos distantes. Provocar a queda de objetos próximos à superfície da Lua é, pelo menos até o momento presente, uma experiência extremamente restrita aos seres humanos. Entretanto, considerando desprezível a influência de qualquer força de resistência e admitindo que a aceleração envolvida na queda seja constante (proposições hipotéticas), é possível a qualquer um de nós, se dispusermos dos símbolos e das operações apropriadas, concluir que um objeto solto a uma altura de 3,2 metros necessita de aproximadamente 2 segundos para chegar à superfície da Lua. A verificação deste resultado, se já não foi feita, poderá ser processada por qualquer astronauta que se envolva em expedições exploratórias em tempos futuros.

Ao cabo desta sucinta descrição das *representações* de Bruner, é importante salientar que elas não se substituem umas às outras. Com o desenvolvimento intelectual, o indivíduo fortalece aquelas às quais já tem acesso e, paralelamente, potencializa, organiza e transforma as condições e pré-requisitos necessários para que outras formas sejam constituídas e firmadas, podendo atuar de forma complementar àquelas que já lhe são disponíveis. Para ilustrar esta percepção em uma situação concreta, talvez valha o seguinte exemplo: é fato que não se converte em um grande tenista pelo estudo exclusivamente simbólico das interações estabelecidas entre esportista, raquete, bolinha e campo gravitacional. Por mais que vários aspectos qualitativos e quantitativos decorrentes da representação simbólica destas interações tenham real importância para a eficácia do jogo, é a prática, em seu aspecto ativo, a componente a ser preponderantemente estimulada rumo ao efetivo alcance de aprendizagem significativa e relevante.

Pensar os mecanismos que conduzem ao desenvolvimento intelectual traduz, para o psicólogo norte-americano, o primeiro passo para a edificação de uma teoria de ensino. A partir do viés cognitivo a eles atrelados, constitui-se o elemento basal a partir do qual evolui uma teoria de ensino dotada de uma perspectiva prescritiva, cujo corpo pode ser condensado pelo seguinte excerto:

“Em primeiro lugar, deve apontar as experiências mais efetivas para implantar em um indivíduo a predisposição para a aprendizagem – aprendizagem em geral, ou qualquer caso particular dela. Deve, em segundo lugar, especificar como deve ser estruturado um conjunto de conhecimentos, para melhor ser apreendido pelo estudante. A ‘estrutura ótima’ será constituída de uma série de proposições da qual poderá decorrer um conjunto de conhecimentos de maiores dimensões, sendo característica a dependência da sua formulação para com o grau de adiantamento do campo particular do conhecimento...

Em terceiro lugar, uma teoria de ensino deverá citar qual a sequência mais eficiente para apresentar as matérias a serem estudadas. Se alguém quer ensinar a estrutura da teoria da Física Moderna, como deve fazê-lo? Apresentando inicialmente matérias concretas, de maneira a despertar curiosidade sobre

as regularidades decorrentes? Ou com uma notação matemática, formal, que simplificará a representação das regularidades a ser encontradas? Quais os resultados de cada método? E qual a mistura ideal?

Deve, finalmente, uma teoria da instrução deter-se na natureza e na aplicação dos prêmios e punições, no processo de aprendizagem e ensino. Intuitivamente, parece claro que, com o progresso da aprendizagem, chega-se a um ponto em que é melhor abster-se de premiações extrínsecas – como elogios do professor, em favor da recompensa intrínseca, inerente à solução de um problema complexo.” (BRUNER *apud* MOREIRA, 1999, p. 85 - 86).

Dentro do esqueleto sequencial ilustrado anteriormente, viabilizar a predisposição à aprendizagem corresponde a um primeiro passo de extrema importância – pelo simples fato de que os posteriores dependem do sucesso desta etapa inicial. Em sua obra pedagógica, Bruner defende que o alcance suficiente desta propensão se dê pelo estímulo, em nível ótimo, à exploração por parte do aluno, à participação ativa deste na coordenação de sua própria aprendizagem – é especificamente aqui, inclusive, em que se encontra o Bruner defensor da “aprendizagem por descoberta”. Otimizar, neste sentido, significa buscar uma opção que reflita um equilíbrio entre a transmissão unidirecional de conhecimento (desprovida de qualquer janela para investigações) e a proposição de rotinas excessivamente abertas que coloquem o aluno no meio de um oceano de possibilidades, sem qualquer instrumento de orientação. Cumprir com esta fase significa, conseqüentemente, ativar a chama da curiosidade, mantê-la queimando pela minoração dos riscos e paralela gestão dos benefícios resultantes do processo exploratório e, por último, direcioná-la para que ela cumpra com o propósito do incentivo à predisposição desejada.

O prosseguimento da instrução enquanto ato, envolve, agora, a seleção da estrutura e da forma do conhecimento a serem adotadas, organizando os degraus que marcarão a escalada que metaforicamente retrata a aprendizagem. Quantos degraus são necessários? Quais aqueles julgados como mais básicos? Pode-se garantir que a estrutura final desta escada estará bem ancorada no conjunto de degraus que a antecede? É neste momento em que o professor,

enquanto guia do processo, reflete sobre estas questões. Para Bruner, nesta etapa, um olhar cauteloso deve ser conferido ao grupo de conteúdos, conceitos e conhecimentos tidos como fundamentais, uma vez que, com fundamentos sólidos, tem-se cada vez mais garantida a estabilidade de tudo o que neles se apoiam. Mais do que conferir coerência interna ao tema ensinado, estes conhecimentos estruturantes oferecem, por meio de seu caráter essencial, a oportunidade de recuperar eventuais detalhes perdidos pela ação do tempo (como os pormenores que constantemente nos escapam pelo desuso por longos períodos).

Definidos os degraus a serem superados, passa-se à definição de como superá-los e, sendo assim, de quais veículos serão utilizados para, vencendo cada um deles, encaminhar o aluno ao objetivo final de aprendizagem. Esta escolha de vetores diretores também carrega consigo a escolha das representações (na concepção de Bruner) que dominarão em cada uma das partes nas quais o professor dividiu o decurso do aprendizado. Aqui, tangenciar o ideal significa aproximar-se de um esquema que evolua do ativo para o icônico e, por fim, deste para o simbólico para, como já afirmado anteriormente, proporcionar ao aprendiz as disposições necessárias para se livrar das amarras impostas por relações sensoriais restritas ao ambiente imediatamente disponível.

Encerrando o período (e, por tabela, permitindo a posterior reaplicação desta série de passos a um novo assunto), faz-se necessário ponderar sobre a administração dos reforços e das medidas corretivas para gerenciar, convenientemente, o processo de ensino-aprendizagem. Diferentemente da perspectiva skinneriana, Bruner acredita que os reforços devem, progressiva e gradativamente, passar de um viés extrínseco (ou seja, baseado em fatores e agentes externos, como premiações e elogios provenientes dos pais, professores e/ou colegas) para um intrínseco, no qual o próprio aluno reforça a sua própria aprendizagem por reconhecer, por exemplo, satisfação na superação de um desafio. Ter-se-ia, assim, uma aprendizagem que, em seu estágio final (às margens da completude, portanto), seria retroalimentada e, por conseguinte, autossustentada. Nota-se, então, que a passagem do behaviorismo de Skinner para o cognitivismo de Bruner evoca um deslocamento nos agentes modificadores de comportamento: transita-se das contingências de reforço

(geralmente atreladas a fatores externos) para a própria aprendizagem em si (que, alcançando níveis complexos de expressão pela paulatina intensificação do simbolismo enquanto representação, incentiva cada vez mais a motivação pela competência).

Apoiado neste sistema instrucional, o professor, atuando como um coordenador, conduz a aprendizagem processual do aprendiz. Munido de técnicas consagradas e do auxílio de instrumental facilitador, ele ensina conteúdos e, sempre que a ocasião permite, cuida de retomá-los em suas representações iniciais para, a partir delas, inserir novos itens e ingredientes. Esse é o cerne do “currículo em espiral”, expressão tão conhecida no meio educacional que, muito provavelmente, é mais afamada que o próprio Bruner – o responsável pela sua concepção.

2.6. As narrativas como veículos do processo de ensino-aprendizagem

Tão essencial quanto a esquematização do ato instrucional, trazida na seção anterior, encontra-se, aos olhos de Bruner, a linguagem aplicada em seu encaminhamento. Em seus próprios termos, “O ensino é altamente facilitado por meio da linguagem, que acaba sendo não apenas o meio de comunicação, mas o instrumento que o estudante pode usar para ordenar o meio ambiente” (BRUNER *apud* MOREIRA, 1999, p. 90). Em análise fria, as escolhas das formas, da sequência a ser empregada e das representações a serem estimuladas, todas importantes dentro da teoria instrucional bruneriana já comentada, trazem consigo opções linguísticas subjacentes e, neste ponto, é importante refletir sobre a acessibilidade e aceitação da linguagem selecionada ante os aprendizes. Elas dialogam com o contexto próximo do aluno? Existe um “gap” a ser superado? Qual a dimensão deste? A suplantação deste obstáculo é realmente importante para que o aluno se apodere de outros meios de expressão?

Pensando na viabilidade da expressão de um conteúdo qualquer em estruturas de comunicação mais próximas das cotidianamente utilizadas pelos alunos,

Bruner torna a investir, em uma fase final de seus trabalhos, no estudo e análise do papel das narrativas para a construção do pensamento humano. De início, como justificativa para as reflexões que sobreviriam em trabalhos ulteriores, o psicólogo norte-americano reconhece duas linhas básicas pelas quais se pode estruturar um raciocínio: a lógica-científica e a narrativa – que, inclusive, não são excludentes e podem atuar de forma complementar. Tendo a tradição filosófica ocidental, pelas mãos de autores diversos e durante bons séculos, privilegiado as discussões acerca do pensamento lógico-científico, nota-se que Bruner, ao acenar para o pensamento narrativo, abre um campo de pesquisa extremamente vasto quanto ao potencial de exploração.

Em uma leitura inicial simplista, narrar significa contar uma história que, apreendida e assimilada por um sujeito interlocutor, gera nele uma mudança, uma aprendizagem – sendo encarada, portanto, como um mecanismo de transmissão cultural. Toda história, quando comunicada, traz consigo um aspecto de novidade, traços de impressões contrárias ao senso de normalidade construído por um indivíduo em sua bagagem de experiências particulares e de aprendizagens pessoais. Em viés pedagógico, uma narrativa assenta os caminhos pelos quais se pode lidar com situações adversas e problemáticas, estabelecendo vínculos com outras manifestações culturais próprias a um indivíduo (ou a um grupo deles). Para Bruner:

“Uma grande narrativa nos convida a expor problemas. Ela não está lá para simplesmente dizer como resolvê-los. Ela nos fala de uma situação de crise, de um caminho a percorrer e não nos leva a um refúgio” (BRUNER *apud* GURGEL, 2017, p. 32)

Especificamente, quando se depara com o caso do ensino de Ciências em seus últimos trabalhos, Bruner admite que muito progresso foi feito desde que começou a pensar o processo instrucional. Entretanto, formas e rotinas esclerosadas ainda em voga constituem fatores retardadores de um progresso que poderia ser mais veloz e abrangente em extensão. Entende que a condução do processo de ensino-aprendizagem na área segundo vias quase que exclusivamente lógico-científicas constitui um erro e acredita que as narrativas poderiam, adequadamente, preencher ou abrandar as lacunas cada vez mais pronunciáveis entre os conteúdos científicos e os universos culturais dos alunos

a que se destinam. Afinal, assim como qualquer ser humano, a Ciência também tem uma história! Contá-la, pode, sim, expor a faceta humana que lhe é própria e, em consequência, trazê-la para um plano mais próximo daquele que contempla a realidade dos sujeitos aprendizes. Aliás, é justamente a esta tarefa a que se devota a presente dissertação.

Capítulo 3

3. Teoria Quântica: abordagens histórica e matemática das primeiras contribuições

3.1. Estudos sobre radiação térmica: antecedentes

O estudo da radiação térmica proveniente de corpos aquecidos, conduzido a partir da conceituação do emissor/absorvedor ideal (o corpo negro), tem reconhecida importância como marco introdutório para a Teoria Quântica (BRUSH, 1976, p. 303; MARTINS, 2014, p. 13). Até que se pudesse atingir este estágio, entretanto, modificações profundas tiveram de ser impostas à Teoria do Calor durante a extensão de um século: o século XIX.

Este período assistiu, também, a prolíficos debates envolvendo a natureza da luz. E estas discussões, meramente paralelas de início, acabaram por se aproximar com o avançar dos anos e, no caso limite, a definir importantes pontos de tangência que colaboraram para os seus respectivos desenvolvimentos. No alvorecer dos anos 1800, acreditava-se fortemente na teoria do calor enquanto fluido imponderável (denominado “calórico”), integrante de todos os corpos imagináveis e espontaneamente transferido de um corpo de maior temperatura para outro de menor até que o equilíbrio térmico fosse atingido – exatamente da mesma forma em que dois recipientes idênticos contendo diferentes volumes d’água, quando comunicados por suas bases, transferem fluido de um nível mais alto para outro mais baixo até que estes se igualem (EINSTEIN, 2008, p. 42). No que diz respeito à luz, era explícita a preponderância da teoria corpuscular (isto é, que entendia a luz como um conjunto de pequenas partículas emitidas por fontes específicas), defendida por ninguém menos que Sir Isaac Newton, filósofo natural inglês cujo prestígio, decorrente de suas diversas e extremamente relevantes contribuições científicas, explica a contundente influência sobre seus pares contemporâneos e, também, sobre várias gerações posteriores de pesquisadores.

No primeiro terço do período em questão, trabalhos teórico-experimentais de diversos cientistas, entre os quais Benjamin Thompson (o Conde de Rumford), Humphry Davy, William Herschel, John Leslie, Macedonio Melloni e James Forbes colaboraram para incitar dúvidas sobre a teoria do calórico (Rumford, inclusive, é constantemente lembrado pelas reflexões que conduziu acerca das quantidades inexauríveis de calor geradas no processo de perfuração de canhões que eram inconsistentes com a ideia do calor na qualidade de substância) e para aproximar o “calor radiante” da luz enquanto “um mesmo fenômeno *i.e.* diferentes manifestações superficiais do mesmo agente físico” (BRUSH, 1976, p. 305). Neste mesmo intervalo temporal, o escocês Thomas Young conduziu o experimento da fenda dupla para a luz e seus resultados não poderiam ser explicados por uma teoria corpuscular como a advogada por Newton, mas sim por uma teoria ondulatória – já sugerida anteriormente pelo holandês Christiaan Huygens e formalmente desenvolvida pelo próprio Young e pelo francês Augustin Fresnel.

Nota-se, então, que, ao final dos anos 1830, aproximar “calor” e “luz” significava, naquela altura, desenvolver uma “teoria ondulatória do calor” para lidar com os problemas típicos da Física Térmica. Ela, entretanto, não decretou o abandono definitivo para a teoria do calor enquanto substância, pois, a partir desta “nova” concepção, a quantidade de calórico seria substituída pelas vibrações periódicas de átomos transmitidas pelo calórico (ainda provido de características etéreas). A sobrevivência desta substância misteriosa (fundamental, agora, para a teoria ondulatória do calor) não se mostrou longa: ao final da primeira metade do século XIX, o interesse prático em máquinas térmicas e as experiências para a determinação do “equivalente mecânico do calor” abriram caminho para a Termodinâmica moderna e sua estrutura fenomenológica edificada a partir de 2 leis: a 1ª consistindo na tradução formal de um princípio de Conservação de Energia e a 2ª definindo, eventualmente, uma ordem preferencial para a ocorrência dos fenômenos que lhe cabem a partir da distinção entre processos reversíveis e irreversíveis. O renascimento da Teoria Cinética dos Gases (cuja inspiração original remonta à obra *Hydrodynamica* de Daniel Bernoulli, 1738) parecia, a partir dos anos 1850, conferir um papel definitivo ao movimento vibracional de átomos e moléculas na origem do calor.

Entretanto, a Teoria Eletromagnética de Maxwell mostrou que o “calor radiante” poderia estar associado a um tipo de onda eletromagnética (as hoje identificadas à radiação infravermelha) que, por sua vez, seria capaz de gerar efeitos térmicos em qualquer corpo pelos processos de emissão/absorção. Desta forma, para diferenciar este calor daquele gerado pelas vibrações em nível atômico-molecular e conveniente tratado pela Teoria Cinética dos Gases, o termo “radiante” seria fundamental. Nos termos do próprio Maxwell, em correspondência dirigida a um conterrâneo, o físico e matemático escocês P. G. Tait: “*Eu não acho que o calor radiante seja calor em sua totalidade, a menos que seja radiante*” (MAXWELL *apud* BRUSH, 1976, p. 307). A então virtual possibilidade de conciliar a Termodinâmica, a Teoria Cinética dos Gases e a Teoria Eletromagnética de Maxwell para tratar esse “calor radiante” mobilizou esforços interessantes da comunidade científica na metade final do século XIX.

3.2. A Radiação do Corpo Negro

Qualquer corpo, cujo estado térmico se caracterize, entre outras variáveis, por uma temperatura T , emite radiação em diferentes comprimentos de onda λ e frequências ν . Esta radiação, contínua em termos de estrutura (isto é, existente para todas as frequências entre 0 e ∞), é denominada *radiação térmica* do corpo aquecido.

Paralelamente, o mesmo corpo pode interagir com um campo exterior de radiação por uma “soma” de três diferentes processos: absorção, reflexão e transmissão. Em outros termos, de toda a energia que nele incide, o quadro mais geral existente em termos de interação é: parte dela é absorvida, outra fração é refletida e, finalmente, uma terceira porção é transmitida através do material. Mais do que depender de propriedades específicas do corpo com que se interage, a distribuição da energia incidente em componentes absorvida, refletida e transmitida depende da própria radiação considerada. Neste sentido, alguns exemplos podem ser bem ilustrativos:

- Ao se aproximar de uma janela convencional, é possível enxergar através dela com grande clareza e, além disso, pode-se visualizar o reflexo do

próprio rosto de maneira pouco nítida (isto é, o vidro apresenta, na faixa da luz visível, alto coeficiente de transmissão e baixo coeficiente de reflexão).

- A mesma luz não consegue ser transmitida através de uma parede de concreto (aqui, em relação ao exemplo anterior, muda-se o material, mantém-se a mesma faixa no espectro de ondas eletromagnéticas e, finalmente, obtém-se diferente resultado quanto às frações transmitida e refletida).
- Em um túnel, não é possível observar o ambiente externo (ruas, avenidas, prédios comerciais, residências e transeuntes) e, também, nota-se tremenda dificuldade em se sintonizar uma estação de rádio. Por outro lado, o sinal de telefonia celular, importante para fazer/receber ligações e para conectar-se à Internet via *smartphones*, funciona, no geral, sem qualquer intercorrência. Tal fato ilustra diferentes qualidades de transmissão pelo túnel em diferentes faixas do espectro eletromagnético (os casos aqui tratados envolvem, respectivamente, ondas na região da luz visível, rádio e micro-ondas).

A componente absorvida, não tratada nas situações-exemplo aqui consideradas, tem parte importante na definição de uma temperatura para o corpo com o qual o campo de radiação interage. Ela, quando comparada à emissão térmica característica do corpo, pode definir um aquecimento (isto é, um aumento de temperatura), um resfriamento (uma diminuição na temperatura) ou mesmo, uma condição de equilíbrio térmico – na qual o corpo, por emitir e absorver energia em taxas iguais, consegue manter uma temperatura T fixa. É neste equilíbrio em que vamos nos concentrar pelos próximos parágrafos.

Gustav Robert Kirchhoff, em 1859, deu um primeiro passo dentro deste assunto ao demonstrar o seguinte teorema: “Para um corpo de material arbitrário, emitindo e absorvendo radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda e em equilíbrio termodinâmico, a razão do seu poder emissor pelo seu coeficiente adimensional de absorção é igual a uma função universal do comprimento de onda da radiação e da temperatura do corpo. Esta função universal descreve a potência emissora do corpo negro perfeito”. Em seu enunciado, o poder emissor de um corpo correspondia à sua radiância espectral

u_ν , de tal forma que $u_\nu d\nu$ represente a quantidade de energia emitida, por unidade de área e por unidade de tempo, na forma de radiação eletromagnética cujas frequências se situam entre os valores ν e $\nu + d\nu$. Por outro lado, o “coeficiente adimensional de absorção” remete à absorvidade a do corpo, isto é, à fração da radiação incidente que é absorvida pelo corpo enquanto este se encontra emitindo e absorvendo energia em uma condição de equilíbrio termodinâmico. Desta forma, para um objeto ideal que apresentasse uma absorvidade igual à unidade ($a = 1$), a razão tratada por Kirchhoff representaria a radiância espectral do corpo negro ideal – segundo o seu enunciado, uma função universal que não dependeria de qualquer composição específica deste absorvedor perfeito.

Um passo importante na busca da função $u_\nu(\nu, T)$ (apesar de controverso em sua execução) fora dado cerca de 20 anos depois, pelo físico austríaco Josef Stefan. Apoiando-se em dados experimentais coletados pelo britânico John Tyndall (que, em 1865, conduziu um ensaio em que aquecia um fio de platina para analisar o comportamento da energia por ele emitida de acordo com as temperaturas cada vez maiores), Stefan concluiu, em 1879, que o fluxo total de energia irradiada por unidade de área, em todas as frequências, era diretamente proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta (MARTINS, 2014), ou seja:

$$\Phi = \sigma T^4$$

O caráter fortuito da lei em sua faceta original reside no fato de que Stefan chegou a esta conclusão a partir de apenas dois dados experimentais de Tyndall – que percebeu o aumento de temperatura do arame de platina de 525°C para 1 200°C gerava um aumento na intensidade de 10,4 para 122 (em unidades arbitrárias) para um comprimento de onda específico (BRUSH, 1976, p. 514-515). A partir destas informações, bastou perceber que:

$$\left(\frac{1\ 200 + 273}{525 + 273} \right)^4 \cong \frac{122}{10,4}$$

Cinco anos depois, em 1884, um dos seus mais renomados alunos, o também austríaco Ludwig Boltzmann, demonstrou a validade da lei de Stefan a partir de argumentos que conciliavam resultados importantes da Termodinâmica e do

Eletromagnetismo. Ao cabo deste trabalho, o desafio para a área de pesquisa era, naquele momento, o de buscar a forma específica da função universal $u_\nu(\nu, T)$ para o corpo negro ideal sabendo que $\int_0^\infty u_\nu(\nu, T) d\nu = \sigma T^4$.

Em 1893, o alemão Wilhelm Wien deu um passo importante, apesar de não definitivo (como o decorrer dos anos acabou por mostrar), para a resolução do problema em questão. Modelando a situação a partir de um campo de radiação confinado em um cilindro formado por paredes perfeitamente refletoras e dotado de um pistão, Wien mostrou que, se o pistão se movesse, a radiação por ele refletida deveria variar o seu comprimento de onda em função do Efeito Doppler-Fizeau. Ademais, se o processo puder ser admitido como adiabático, é possível demonstrar que todos os pontos da curva de distribuição espectral se deslocam respeitando $\nu/T = \text{constante}$ – algo posteriormente denominado como “lei de deslocamento de Wien”. De maneira mais importante, esta relação, quando aplicada aos máximos das distribuições espectrais, permite, por exemplo, estimar a temperatura de um objeto que, em boa aproximação, possa ser modelado por um corpo negro a partir da leitura da frequência ν ou do comprimento de onda λ correspondente ao da radiação emitida segundo a maior intensidade (radiância espectral).

Esta lei de deslocamento proposta por Wien deriva de um resultado ainda mais fundamental sobre o qual ele discorreu neste mesmo artigo: o fato de que considerações baseadas em Termodinâmica e Eletromagnetismo garantem que a função $u_\nu(\nu, T)$ precise satisfazer uma relação da forma:

$$u_\nu = \nu^3 F\left(\frac{\nu}{T}\right)$$

O problema, agora, seria extrair uma versão para a função $F(\nu/T)$ – algo que foi feito pelo próprio Wien 3 anos mais tarde, em 1896. Valendo-se de uma analogia com a distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann e o seu caráter exponencial em versão infinitesimal, ele propôs que:

$$du_\nu = \alpha \nu^3 e^{-\beta \cdot \nu/T} d\nu$$

Esta versão parecia estar de acordo com os dados experimentais, uma vez que fora confirmada pelos alemães F. Paschen e H. Wanner em 1897 apenas nas condições de baixas temperaturas e altas frequências luminosas (MARTINS,

2014, p. 25). Entretanto, medidas feitas posteriormente, em 1899-1900, por Otto Lummer e Ernst Pringsheim no domínio das baixas frequências (na região do infravermelho, em essência) mostravam diferenças sensíveis para com a relação teórica sugerida por Wien – diferenças estas que se incrementaram com a realização, *a posteriori*, de experimentos similares em frequências ainda mais baixas.

No intervalo de tempo situado entre a apresentação da Lei de Distribuição de Wien (1896) e da divulgação dos dados de Lummer e Pringsheim, o alemão Max Planck trabalhou para oferecer um caráter mais físico à lei assumida por Wien *ad hoc*. Para isso, admitiu que o equilíbrio térmico determinado em um radiador de cavidade se devia à igualdade nas taxas de emissão e absorção de radiação estabelecidas por ressoadores carregados situados nas moléculas que compõem tal corpo. Sem discutir a constituição interna das moléculas, Planck se apoiou nas equações do Eletromagnetismo de Maxwell para lidar com a emissão de ondas por um dipolo elétrico oscilante e com a absorção de energia pelo mesmo para, finalmente, obter u_ν segundo um tratamento termodinâmico. Sendo $\delta\varepsilon$ e δW , respectivamente, a taxa temporal de emissão pelo dipolo elétrico e o trabalho infinitesimal realizado por um campo de radiação sobre tal dipolo, temos:

$$\delta\varepsilon = \frac{2e^2}{3mc^3} (2\pi\nu)^2 \bar{\varepsilon}$$

$$\delta W = \frac{\pi e^2}{3m} u_\nu$$

Na equação acima, $\bar{\varepsilon}$ representa a energia média (tomada no tempo) dos osciladores envolvidos. Igualando as equações, Planck obteve:

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \bar{\varepsilon}$$

Introduzindo a Termodinâmica em um modelo de n ressoadores cujas oscilações remetiam a uma energia $\bar{\varepsilon}$, Planck chegou ao seguinte resultado para a segunda derivada da entropia S em relação à energia ε :

$$R = \left(\frac{\partial^2 S}{\partial \varepsilon^2} \right)^{-1} = -\frac{\varepsilon}{\alpha}$$

Depois das medidas expostas por Lummer e Pringsheim, Planck percebeu esta última conclusão – tão simples que chegou a enxergar nela a “verdadeira base para a lei de distribuição de energia” (PLANCK, 2012, p. 121) – era inaceitável em termos de generalidade. Em suas próprias palavras:

“Os resultados de novas medidas mostraram que essa opinião era insustentável. Para pequenos valores de energia e pequenos comprimentos de onda [grandes frequências], a lei de Wien se verificava muito bem, mas havia grandes divergências entre o cálculo e a experiência no caso de grandes comprimentos de onda [baixas frequências]. Isso foi mostrado primeiro pelas experiências de Lummer e Pringsheim e mais tarde pelas de Rubens e Kurlbaum, feitas com raios infravermelhos residuais após a passagem através do espato-flúor (fluorita) ou do sal-gema. Neste último caso, os autores mostraram que havia outra relação entre a energia e a grandeza R , totalmente diferente da lei de Wien. Tal relação, aliás, às vezes se expressava de maneira muito simples. A grandeza R já não é proporcional à energia, mas ao seu quadrado, e isso com uma aproximação cada vez maior, na medida em que as energias e os comprimentos de onda crescem”. (PLANCK, 2012, pág. 122)

O novo limite observado por Planck (R proporcional ao quadrado da energia ϵ) estava de acordo com uma nova lei descoberta pelo inglês John William Strutt (mais conhecido como Lord Rayleigh) em junho de 1900. Valendo-se da Lei de Equipartição de Energia, ele mostrou que $\bar{\epsilon} = kT$ e, conseqüentemente, deduziu que:

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$$

Na equação acima, k remete à constante de Boltzmann (a razão entre a constante universal dos gases R – que é diferente da grandeza R citada por Planck – e o número de Avogadro).

Para os componentes do espectro eletromagnético aos quais correspondem grandes comprimentos de onda (ou seja, baixas frequências), a Lei de Rayleigh – posteriormente chamada de Lei de Rayleigh-Jeans graças ao trabalho

complementar de Sir James Hopwood Jeans em 1905 – se ajustava muito bem à distribuição experimental de intensidades irradiadas. Para altas frequências, entretanto, a equação está errada. Basta notar que, segundo ela, u_ν cresce sem limites (tende ao infinito quando $\nu \rightarrow \infty$). Desta forma, a integral $u = \int_0^\infty u_\nu d\nu$ seria completamente divergente e se instauraria a completa discordância em relação à Lei de Stefan-Boltzmann e aos dados experimentais existentes para o domínio de grandes frequências.

Percebendo que diferentes relações para a grandeza R (o recíproco da derivada segunda da entropia dos ressoadores em relação à energia) levavam à descrição correta de u_ν em diferentes regiões do espectro eletromagnético, Planck, às pressas, resolveu fazer uma interpolação entre estas expressões que fosse capaz de recair em $-\epsilon/\alpha$ para grandes frequências e em ϵ^2/β no domínio de baixas frequências. Desta forma, escreveu:

$$R = \left(\frac{\partial^2 S}{\partial \epsilon^2} \right)^{-1} = \frac{\epsilon(\epsilon + b)}{a}$$

Sendo assim, para $\epsilon \ll b$, tem-se $R \cong (b/a) \cdot \epsilon$ e, em contrapartida, para $\epsilon \gg b$, obtém-se $R \cong \epsilon^2/a$ – e os dois limites são atingidos adequadamente. Em um trabalho feito às pressas e apresentado à *Deutsche Physikalische Gesellschaft* (Sociedade Alemã de Física) em 19/10/1900 como um comentário ao trabalho experimental de Heinrich Rubens e de Friedrich Kurlbaum (MARTINS, 2014, p. 32), Max Planck mostrou ao mundo aquele que seria o primeiro registro da correta versão para a descrição da radiação espectral (originalmente exibida em sua versão u_λ , relacionada à u_ν por $u_\lambda d\lambda = u_\nu d\nu$ e por $c = \lambda\nu$):

$$u_\lambda(\lambda, T) = \frac{C\lambda^5}{e^{\frac{c}{\lambda T}} - 1}$$

Em situação que, de certa maneira, lembrava a sua postura em relação ao trabalho de Wien em 1896, Planck não se contentou com o trabalho que apresentara em outubro de 1900 (uma vez que a interpolação, apesar de levar a uma função que se mostrava adequada aos resultados experimentais em amplo domínio, não explicitava o seu conteúdo físico). Dedicou-se, pelas semanas seguintes, à busca de um modelo físico que o conduzisse à sua Lei de Radiação. Ao final, quase dois meses foram suficientes para que novo artigo

fosse submetido à Sociedade Alemã de Física, em 14/12/1900. Neste trabalho, Planck replicou fração considerável de sua dedução para a Lei de Distribuição de Wien, com uma sutil e importante diferença: a consideração de uma análise probabilística para o particionamento da energia entre os osciladores. Empregando a estatística de Boltzmann (que afirma que a entropia de um sistema físico é diretamente proporcional ao logaritmo natural do número de microestados acessíveis), Planck distribuiu a energia total E do sistema entre os n ressoadores. Ao repartir a energia entre estes osciladores, contudo, não pôde fazê-lo de forma contínua, pois isso implicaria em infinitos modos para se empreender tal divisão. Para esta situação, um artifício geralmente produtivo seria o de estabelecer um mínimo de energia ϵ de modo a se obter um número finito de microestados acessíveis e, conseqüentemente, uma densidade de probabilidades bem-comportada enquanto função. Ao final, bastaria levar a quantidade fundamental ao limite $\epsilon \rightarrow 0$ e a continuidade das energias alocadas estaria convenientemente assegurada.

Adicionalmente, para alinhar seu constructo à necessidade de se obedecer à $u_\nu = \nu^3 F(\nu/T)$, Planck precisou assumir que o tal mínimo de energia dependeria da frequência de oscilação do ressoador segundo $\epsilon = h\nu = hc/\lambda$ e que, para o seu “desespero”, era impossível manter a versão correta da Lei de Radiação se a constante h fosse levada a zero. Eis o nascimento da hipótese de quantização de Planck.

3.3. Evocação das ideias de quantização após Planck (1900)

Inspiradas ou não pelo trabalho de Planck de dezembro de 1900, as noções de quantização se mostraram adequadas para mostrar caminhos promissores em problemas que, assim como o da Radiação do Corpo Negro, atormentava a comunidade científica no final do século XIX. Entre os mais notáveis fenômenos, encontra-se o Efeito Fotoelétrico, a partir do qual se pode notar a ejeção de elétrons de uma placa metálica quando esta é sujeita à incidência de ondas eletromagnéticas. As primeiras observações documentadas de eventos como este remontam a 1872 e são devidas ao físico russo Alexander G. Stoletov que,

inserindo duas placas metálicas em um frasco onde fora feito vácuo e ligando-as aos bornes de uma bateria, observava o imediato estabelecimento de uma corrente elétrica quando permitia que uma das placas recebesse luz proveniente de uma lâmpada de mercúrio (BASSALO, 1987, p. 177). Depois de acumularem evidências experimentais adicionais advindas dos trabalhos dos físicos alemães Heinrich R Hertz (1887) e Wilhelm Hallwachs (1888) e, também, de alcançarem novos resultados acerca do fenômeno em questão, o próprio Stoletov e, posteriormente, o físico húngaro-alemão Philipp E. A. von Lenard obtiveram as leis experimentais do Efeito Fotoelétrico que, segundo BASSALO (1987, p. 178), se resumem a:

- Os elétrons emitidos têm velocidades iniciais finitas, mesmo num campo nulo, as quais não dependem da temperatura.
- Esta velocidade dos elétrons não depende da intensidade da luz incidente, mas depende fortemente da respectiva frequência.
- O número total de elétrons emitidos é proporcional à intensidade da luz incidente.

Havia uma clara incompatibilidade destas conclusões com a Física Clássica – notavelmente com a segunda lei, a propósito. Afinal, de acordo com o Eletromagnetismo de Maxwell, aumentar a intensidade de uma onda eletromagnética significa, por exemplo, aumentar a amplitude do campo elétrico \vec{E} ; este, por sua vez, agindo sobre um elétron de carga e (em módulo), gerará uma força elétrica \vec{F}_{el} maior que, a seu modo, oferecerá maior aceleração ao portador de carga e , finalmente, permitirá que este atinja maiores velocidades. A solução para este imbróglio veio quando Albert Einstein, em 1905 (o seu *annus mirabilis*), afirmou que a energia da radiação eletromagnética não se distribuía continuamente (como assim o dizia o Eletromagnetismo Clássico), mas, sim, concentrava-se em pequenos “pacotes de energia” coletivamente referidos como *quanta de luz* (“Lichtquanta”, para a expressão em alemão), cada qual dotado de uma energia $h\nu$, sendo h o quantum elementar de ação (a constante de Planck) e ν a frequência da radiação. Vale destacar que, em seu trabalho original, a notação empregada por Einstein para se referir à energia do quantum de radiação era $(R/N_0)\beta\nu$, sendo R a constante universal dos gases perfeitos, N_0 o número de Avogadro e β a constante exponencial presente na lei de Wien para

o corpo negro ideal. Tal fato aponta para um detalhe importante: no seu trabalho de 1905 “*Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz*”, no qual trata o Efeito Fotoelétrico, Einstein usou como referência a lei de Wien para a radiação eletromagnética, reconhecendo que, por mais que a lei não seja válida de forma exata, “foi bem confirmada para grandes valores de ν/T ” (MARTINS, 2014, p. 48). Sendo assim, os resultados por ele obtidos são, a priori, válidos para o regime de altas frequências ν e baixas temperaturas T . Esta percepção parece apontar para uma independência (no sentido de ausência de vínculo) entre a quantização das energias dos ressonadores de Planck e quantização do campo eletromagnético tal como assinalada por Einstein.

Conforme comenta Martins, o trabalho de Planck sobre a Radiação do Corpo Negro não gerou interesse imediato na comunidade científica – que enxergava a hipótese de quantização como uma “anomalia curiosa” (MARTINS, 2014, p.57). Poucas pessoas (Albert Einstein, Paul Ehrenfest e Max von Laue entre os mais notáveis) viam algum potencial revolucionário nas ideias lançadas por Planck em 1900. Curioso é saber que o próprio Planck, físico já veterano (e, nesta altura da vida, munido de espírito conservador), “foi contra a hipótese da descontinuidade de energia, mesmo quando Einstein a utilizou em 1905 para explicar o Efeito Fotoelétrico” (BASSALO, 1987, p. 192). Apesar de, a partir de h , ter conquistado o mérito de determinar os valores mais precisos da época para a carga elétrica elementar e e para o número de Avogadro N_0 , Planck via no quantum elementar de ação um mero artifício matemático desprovido de conteúdo físico. Chegou, inclusive, a escrever dois artigos científicos (um em 1912 e outro em 1914) nos quais tentava salvar a continuidade da distribuição de energia sobre as ondas eletromagnéticas, sendo as descontinuidades eventos pontuais que emergiam apenas nos choques entre partículas materiais e nos processos de emissão (BASSALO, 1987, p. 192-193). Entretanto, diante de uma amostra significativa de trabalhos frutíferos e apoiados na noção de quantização, Planck acabou por se convencer acerca da realidade física de seu constructo original.

O real interesse nas noções de quantização surgiu quando de sua aplicação, por Einstein, na abordagem do problema do calor específico dos sólidos (1907). No

artigo intitulado “A teoria da radiação de Planck e a teoria do calor específico”, Einstein desenvolve um trabalho que, em suas próprias palavras, “mostrará que a teoria da radiação – em particular a teoria de Planck – leva a uma modificação da teoria cinético-molecular do calor por meio do qual algumas das dificuldades que obstruem a implementação de tal teoria podem ser eliminadas” (EINSTEIN, 2005). Uma destas remete ao comportamento do calor específico dos sólidos a baixas temperaturas absolutas: para $T \rightarrow 0$, tem-se, experimentalmente, que $c_V \rightarrow 0$. Este fato não se adequa ao resultado clássico de Dulong-Petit que, a partir da Equipartição da Energia, advoga em favor de um c_V constante e igual a $3R$. Resolver esta disparidade exigiu, como ponto de partida, a hipótese de que as “oscilações térmicas das partículas dos sólidos somente podiam adquirir valores de energia que fossem múltiplos de $\varepsilon = h\nu$ ” (MARTINS, 2014, p. 57) e culminou em uma concordância teórico-experimental interessante, sutilmente refinada pelo trabalho posterior do físico e químico holandês Petrus J. W. Debye (1912).

Os sucessos obtidos a partir da aplicação de ideias quânticas em fenômenos fundamentalmente situados no domínio atômico estimularam a consideração destas noções como “pontos de partida” para a resolução de outros problemas em voga. Entre tantos, o mais famigerado remete à própria constituição do átomo e à disposição das partículas subatômicas no seu interior. Neste sentido, um primeiro precursor foi o astrofísico inglês John William Nicholson que, advogando em favor de um modelo saturniano (no qual uma partícula central, portadora de carga positiva, é rodeada por “anéis de elétrons” dotados de uma mesma velocidade angular), afirmou, em junho de 1912, que deveria “haver uma relação entre a constante de Planck h e o momento angular dos elétrons girantes, chegando a afirmar que esse momento só poderia variar discretamente, em quantidades proporcionais a h ” (BASSALO, 1987, p. 195 e 196). Entretanto, as dificuldades existentes nos modelos planetários (corpúsculo central possuidor de carga positiva acompanhado de elétrons orbitando ao seu redor em trajetórias fechadas de qualquer geometria) estavam concentradas na estabilidade do átomo pois, enquanto cargas aceleradas, os elétrons tenderiam a irradiar e, por tabela, a perderem energia. Desta forma, a colisão com o corpúsculo central (núcleo) – e o conseqüente colapso do átomo – seria inevitável.

Para resolver a questão da estabilidade do átomo, o físico dinamarquês Niels H. D. Bohr, em 1913, vinculou, por meio de postulados, a estabilidade de órbitas fechadas a uma condição de quantização: a do momento angular, de forma muito parecida daquela sugerida por Nicholson no ano anterior. Neste modelo:

- As órbitas eletrônicas estacionárias permitidas são circunferências para as quais o momento angular orbital (\vec{L}_n) dos elétrons girantes satisfaz:

$$L_n = m r_n v_n = n \frac{h}{2\pi}, n \in \{1, 2, 3, \dots\}$$

- Um elétron, na condição estacionária, não emite e nem absorve energia. Estes processos de emissão/absorção de energia, entretanto, só acontecem quando este elétron “salta” de uma órbita estacionária permitida de ordem n para outra de ordem m ($m \neq n$). Neste caso, um fóton de radiação eletromagnética de frequência f_{nm} é emitido/absorvido, tal que:

$$f_{nm} = \frac{|E_n - E_m|}{h}$$

Agregando estes postulados à Física Clássica, Bohr foi capaz de obter, para o átomo de hidrogênio, as séries espectrais já conhecidas (Lyman no ultravioleta, Balmer no visível e Paschen na região do infravermelho curto), assim como antecipou séries espectrais que só seriam verificadas *a posteriori* (Brackett e Pfund, na região do infravermelho longo). Ademais, ofereceu uma base Física para a fórmula de Balmer-Rydberg (a equação que permite determinar, matematicamente, os comprimentos de onda das raias que integram cada uma das séries anteriormente mencionadas), conquistando o feito de expressar a constante de Rydberg, de valor já conhecido, em termos de constantes físicas fundamentais. Entretanto, por mais que se adeque ao átomo de hidrogênio e que também sirva para descrever aspectos importantes de íons hidrogenóides (espécies químicas formadas por um núcleo de carga $+Ze$ rodeado por um único elétron de carga $-e$), o modelo de Bohr falha na determinação das intensidades das linhas espectrais do hidrogênio, na explicação da separação destas mesmas linhas quando expostas a um espectroscópio de maior resolução (estrutura fina) ou quando sujeitas a um campo elétrico (efeito Stark) ou a um campo magnético (Efeito Zeeman). Ademais, não se mostrava harmonioso para com os resultados experimentais extraídos para elementos com mais de um elétron na eletrosfera.

Com o propósito de resolver as questões pendentes para o hidrogênio, os físicos William Wilson e Arnold Sommerfeld desenvolveram, independentemente, um modelo de órbitas eletrônicas elípticas extraídas a partir de outra versão para a regra de quantização (que abrange a de Bohr como caso particular): “Dentre todas as órbitas possíveis para o elétron, somente são permitidas aquelas que satisfazem a relação” (BASSALO, 1987, p. 200):

$$\oint pdq = nh, n \in \{1, 2, 3, \dots\}$$

Com esta alteração e com a introdução de correções relativísticas para a massa do elétron, foi possível demonstrar a estrutura fina das raias espectrais e as respostas destas aos efeitos Stark e Zeeman. Mas, infelizmente, a estrutura hiperfina destas linhas e os efeitos Zeeman anômalo e de Paschen-Back ainda não estavam cobertos por este novo modelo atômico. Além disso, o incômodo gerado pela manutenção de elétrons em órbitas fechadas sem irradiarem (e, portanto, sem espiralarem em rota de colisão com o núcleo) era explícito na comunidade de cientistas durante as décadas de 1910 e de 1920. Louis de Broglie, em 1924, ainda tentou salvar a ideia de órbitas a partir do conceito de “ondas de matéria”, a partir do qual conseguira reproduzir a regra de quantização do momento angular na versão concebida por Bohr. Mas o passo decisivo foi dado quando se ousou abandonar a ideia de órbita para apoiar a Teoria Quântica sobre outros pilares. É nesta perspectiva que se nota o surgimento da Mecânica Matricial de Heisenberg-Born-Jordan (1925) e da Mecânica Ondulatória de Schrödinger (1926), abordagens fisicamente equivalentes (tal como demonstrou Schrödinger, também em 1926), mas que se apoderam de estruturas matemáticas diferentes.

Capítulo 4

4. Metodologia de Pesquisa

4.1. Pesquisa Qualitativa: Uma pequena revisão histórica

Os estudos sociais, tomados em amplo sentido como aqueles nos quais a componente humana – em manifestação individual ou coletiva – detém parte influente e preponderante, foram, em diversos momentos dos séculos XIX e XX, referenciados em uma perspectiva positivista que lhes tentava imbuir da mesma metodologia essencialmente empregada nas Ciências Naturais: formulação de hipóteses apriorísticas, levantamento de variáveis e parâmetros relevantes, observação sem participação, tomada de dados quantitativos, aplicação de métodos estatísticos de análise e, finalmente, obtenção das conclusões vinculadas às hipóteses consideradas. Apesar de se mostrar adequada a diversos estudos na área das Humanidades, a pesquisa quantitativa, isolada, não obtinha êxito ao lidar com as subjetividades intrínsecas ao comportamento do indivíduo e, conseqüentemente, não poderia oferecer garantias quanto à completa validade da associação direta e exclusiva entre resultados alcançados e variáveis estudadas. Neste sentido, precisou ser complementada (ou, em outros casos, completamente substituída) por uma abordagem mais aberta, descritiva, processual e interacionista, capaz de inferir adequadamente a partir da plena incorporação à realidade social que se pretende estudar. Em linhas gerais, esta é a proposta trazida pela pesquisa qualitativa em seus diferentes matizes, sempre acreditando que “do ponto de vista metodológico, a melhor maneira para se captar a realidade é aquela que possibilita ao pesquisador “colocar-se no papel do outro”, vendo o mundo pela visão dos pesquisados”. (GODOY, 1995, p. 62).

Em uma história oscilante quanto à intensidade de seu emprego em trabalhos na área das Ciências Humanas, a pesquisa qualitativa, em suas primeiras manifestações, remonta, provavelmente, a meados do século XIX. Entre os primeiros registros, encontram-se o do francês Pierre Guillaume Frédéric le Play

que, em 1855, publicou *Les ouvriers européens*, um trabalho sociológico dotado de uma coletânea de monografias sobre a classe trabalhadora de diversas regiões da Europa, fruto de uma série de registros feitos em uma longa e extensa viagem pelo continente os quais, coligidos e organizados, resultaram em rico estudo comparativo a partir da consideração de multicasos. Igualmente importante e contemporâneo quanto à publicação, o *London Labour and the London Poor* do jornalista inglês Henry Mayhew remete a um trabalho centrado em histórias de vida e na documentação a partir de entrevistas para retratar, na íntegra, a vida dos londrinos mais desfavorecidos do início da 2ª metade do século XIX (a obra fora publicada em 4 volumes, entre 1851 e 1862).

Além da Sociologia, a pesquisa qualitativa encontrou porto seguro também na Antropologia, domínio no qual os trabalhos do teuto-americano Franz Boas e do polonês Bronislaw Malinowski se destacam como pioneiros. Suas abordagens, entretanto, diferiam na condução metodológica, uma vez que Boas privilegiava a interação indireta via dados documentais obtidos dos informantes (GODOY, 1995, p. 60), enquanto Malinowski, em contrapartida, privilegiava o convívio cultural na íntegra durante períodos consideráveis de tempo – exatamente como fez no intervalo de 1914 a 1918, quando viveu em Nova Guiné junto aos nativos da ilha, incorporando os seus hábitos, expressando-se no idioma local e assimilando o máximo da cultura própria daquela distante região.

As primeiras incursões neste tipo de metodologia de pesquisa, apesar de frutíferas em suas aplicações, não se encontravam formalmente estruturadas. Notava-se, sim, a precoce consideração de instrumentos que, hoje, compõem parte importante nos trabalhos que a consideram como referencial metodológico (diários, retratos, documentos, entrevistas etc.). Mas a falta de investimento em um formalismo que sugerisse como se apoderar, de forma conveniente, destes objetos de análise inviabilizou, de início, o aproveitamento da pesquisa qualitativa em outros meios no seio das Humanidades e, inclusive, refreou o seu uso na Sociologia, na Antropologia e na Psicologia – áreas para as quais já havia oferecido contribuições interessantes. Graças, também, a novo sopro de fôlego ganho pelos esquemas quantitativos e pela interação coordenada pelo trabalho de pesquisa típico das Ciências Naturais, foi necessário, durante o período situado entre a década de 1930 e a de 1960, repensar a pesquisa qualitativa em

seus fundamentos. Os esforços iniciais vieram um pouco antes deste intervalo com os britânicos Sidney Webb e Beatrice Webb e culminaram, em 1932, com a publicação de *Methods of Social Investigation*, verdadeiro compêndio no qual discorrem sobre as estratégias fixas por eles empregadas na avaliação de diversos problemas sociológicos ingleses, destacando as características existentes no modo como coordenavam os processos de tomada e análise de dados que obtinham a partir de documentos, de entrevistas e de observações pessoais, por exemplo.

Do outro lado do Oceano Atlântico, especificamente nos Estados Unidos, o empenho dos pesquisadores de Chicago mostrou-se especialmente importante. Herbert Blumer, com o seu “interacionismo simbólico”, preparou o caminho para a normatização de uma pesquisa qualitativa que “ao conceber a sociedade como um processo, entende que indivíduo e sociedade mantêm constante e estreita inter-relação e que o aspecto subjetivo do comportamento humano é necessário na formação e na manutenção dinâmica do *self* social e do grupo social” (GODOY, 1995, p. 60). Para executar esta proposta, defende a interação naturalista *in loco*, isto é, o estudo do comportamento humano em viés coletivo e inserido no exato ambiente onde as trocas sociais são verificadas por meio de participação efetiva e instrumentalizada em entrevistas, cartas, diários, registros documentais, observações diretas etc. A título de exemplo, vale citar o trabalho que Howard Becker, sociólogo norte-americano da escola de Chicago, conduziu no final dos anos 1950: um estudo sociológico no qual acompanhou, por três anos, os alunos do curso de Medicina da Universidade de Kansas em quase todas as suas atividades cotidianas: frequentou as aulas, foi a eventos em espaços extra-acadêmicos etc. Depois de extensa convivência, converteu a sua experiência em livro: *Boys in White: student culture in medical culture* (1961).

A partir dos anos 1960 e 1970, com pressupostos metodológicos mais firmes, os esquemas qualitativos de pesquisa encontraram voz em campos outrora não-explorados. Godoy (1995, p. 61-62) cita o caso do ramo administrativo, apontando aplicações tanto no âmbito das empresas como nos das grandes organizações e/ou corporações. No meio educacional, Triviños (1987) destaca o explícito e crescente interesse “pelos aspectos qualitativos da educação” (TRIVIÑOS, 1987, p. 116) dentro da América Latina. A partir desta última

perspectiva (a pedagógica-educacional), cuidar-se-á de caracterizar, na próxima seção, a pesquisa qualitativa por meio de um conjunto de propriedades que lhe são peculiares para, posteriormente, apresentar algumas das suas diferentes nuances – facetas diversas que, perseguindo caminhos próprios, se mostram mais adequadas a certas situações de investigação e menos a outras. É neste contexto que emergem a Pesquisa Documental, a Etnografia e o Estudo de Caso, com particular ênfase a este último, haja vista que ele norteará o arcabouço metodológico que confere estrutura ao presente trabalho.

4.2. Características gerais da pesquisa qualitativa

Expor uma definição precisa e rigorosa da metodologia qualitativa de pesquisa, aplicada à Educação ou a qualquer outro domínio das Humanidades, consiste de árdua tarefa sobre a qual já se depositaram vários especialistas de áreas diversas. Segundo Triviños (1987), existem, no mínimo, duas dificuldades que se apresentam na busca do pleno entendimento do que representa uma pesquisa qualitativa: a primeira “diz respeito à abrangência do conceito, à especificidade de sua ação, aos limites deste campo de investigação” (TRIVIÑOS, 1987, p. 120), enquanto a segunda “é muito mais complexa e emerge dos suportes teóricos fundamentais que a alimentam” (TRIVIÑOS, 1987, p. 120).

É possível, entretanto, estabelecer uma lista de características cujas presenças se fazem obrigatórias na condução de qualquer trabalho que siga a referida abordagem. Estas, por exemplo, são apontadas por Bogdan e Blikem no livro *Qualitative Research for Education* (1982). Seguindo as traduções e os comentários tais como presentes em Ludke e André (1986), tem-se:

1. A pesquisa qualitativa tem o ambiente natural como a sua fonte direta de dados e o pesquisador como seu principal instrumento. Para os autores, é de fundamental importância que o pesquisador interaja com os pesquisados no habitat natural destes, de tal modo que possa evidenciar as interconexões entre os agentes, o ambiente e as situações em uma

medida mais próxima do espontâneo, do natural. Justamente por isso, muitos especialistas qualificam este estudo como naturalístico e, conseqüentemente, acreditam que todo esquema qualitativo de pesquisa é, por tabela, naturalístico.

2. *Os dados coletados são predominantemente descritivos.* O material de trabalho sobre o qual se debruça o pesquisador que se pauta pelo método qualitativo é repleto de informações que, sob diversas facetas, cuidam de nutri-lo e situá-lo sobre a trama que se desenrola diante de si: os atores, os cenários, as interações etc. Dela, registra fotos, faz filmagens, conduz entrevistas, analisa documentos, extrai dados de observação direta etc. Todas fontes aqui citadas contribuem com um aparato informacional essencialmente descritivo que confere um caráter dinâmico ao objeto de estudo e que é essencial na orientação do pesquisador rumo às conclusões que nortearão o seu trabalho.

3. *A preocupação com o processo é muito maior do que com o produto.* Haja vista que, em geral, o observador se coloca como um sujeito originariamente exterior (metaforicamente, um “forasteiro”) que surge para interagir, in loco, com atores e situações que, em conjunto, integram o seu objeto de estudo, garantir o pleno entendimento da dinâmica de relacionamentos em análise passa, antes de tudo, pela ênfase no processo de trocas que envolvem pesquisador e pesquisados, despido de quaisquer premissas de partida ou de eventuais desejos de buscar comportamentos que confirmem ou contestem hipóteses apriorísticas. A pesquisa qualitativa exige, do investigador, espírito aberto para que “o durante” atue livremente (ou o mais próximo possível dessa condição) na tentativa de guia-lo até resultados que reproduzam, de maneira fiel, a realidade em julgamento.

4. *O “significado” que as pessoas dão às coisas e à sua vida são focos de atenção especial pelo pesquisador.* Isto significa que, ao final, o que importa é a interpretação e/ou leitura que o conjunto de participantes (pesquisados) tem acerca das situações que os envolve, de tal forma a clarear, para o observador externo, o “dinamismo interno das situações” (LUDKE & ANDRÉ, 1986, p.12) nas quais se colocam.

5. *A análise dos dados tende a seguir um processo indutivo.* Em certa medida, esta necessidade caminha *pari passu* com o que já fora afirmado na 3ª observação: o estudo qualitativo não se esforça em “casar” resultados com afirmações e/ou hipóteses preliminares. Não consiste em verificar, para um conjunto de pressuposições associadas a certo fenômeno, quais são aquelas atendidas e quais devem ser descartadas ao final de uma análise capaz de testá-las. Evidentemente, a metodologia não proíbe o sujeito inquiridor de alimentar expectativas ou inclinações iniciais em relação ao seu estudo, mas exige um mínimo de flexibilidade para que a interação observador-observados evolua, no espaço-tempo, como um funil: parta de questões amplas para, paulatinamente, rumar para conclusões e resultados fieis e mais específicos. (LUDKE & ANDRÉ, 1986, p. 11 a 13).

A tarefa de orientar uma produção acadêmica segundo esta perspectiva qualitativa pode ser feita de diferentes formas e respeitando esquemas que variam de acordo com as intenções do pesquisador, do universo que se lhe coloca para investigação, dos instrumentos mais adequados para o propósito traçado etc. Neste âmbito, fala-se, substancialmente, em três sistematizações disponíveis e úteis para a condução de uma abordagem qualitativa dedicada ao estudo de certo fenômeno: pesquisa documental, etnografia e estudo de caso.

A pesquisa documental consiste, como o próprio nome sugere, na consideração de documentos (ainda não tratados analiticamente ou passíveis de serem reavaliados segundo novas leituras) que possam intermediar um contato entre o observador e o seu objeto de pesquisa. Por “documentos”, pode-se entender uma ampla gama de materiais instrumentais, desde diários, cadernos, cartas e blocos de anotação (que reúnem desde informações triviais e corriqueiras, até dados íntimos e sigilosos), passando por materiais escritos (jornais, revistas, obras científicas e literárias e outros itens de grande circulação), registros de áudio e/ou vídeo (fotografias, filmes direcionados ao público amplo e filmagens de caráter mais particular) e toda sorte de comunicações que remetam à uma fonte admissível de informações. Oferece, portanto, a vantagem de lidar com situações distantes no espaço e no tempo e, também, com eventos duradouros

– posto que, por mais que os sujeitos pesquisados tenham falecido ou se encontrem inacessíveis por qualquer motivo, os documentos podem, eventualmente, propiciar uma substituição suficiente (dependendo, claro, dos propósitos de pesquisa). Os registros documentais tendem a ser mais longevos e, neste sentido, permitem um diálogo adequado para as condições de contorno existentes. Deve-se, contudo, encará-los com parcimônia, no sentido que a sua elaboração esconde um ser pensante que, mais o que introduzir vieses no material desenvolvido, pode não ter desejado infundir sobre ele um caráter documental – fato que pode gerar dificuldades ao pesquisador na ocasião de sua interpretação. Vale, aqui, o exemplo genérico de uma carta que, escrita em um passado muito distante, tinha o eventual interesse de propalar mentiras para gerar confusões isoladas ou mesmo para perturbar a ordem social. Uma carta dessas, se descoberta em tempo presente em razão de um trabalho de pesquisa, poderia comprometê-lo seriamente em suas análises e conclusões.

Emprestada originariamente da Antropologia, a etnografia já se mostrou prolífica, também, na orientação de trabalhos vinculados à Sociologia, à Psicologia Social, à Administração de Empresas e a tantas outras áreas. Admitida como a versão que mais rememora o legítimo trabalho de campo, sugere verdadeira imersão por parte do investigador na realização do seu trabalho de pesquisa e, em virtude disso, demanda uma assimilação cultural extensa no tempo e localizada no ambiente onde costumam interatuar os agentes em observação. Reforçando esta necessidade, Fetterman (1989) a entende como “a arte e a ciência de descrever uma cultura ou grupo” (FETTERMAN *apud* GODOY, 1995, p. 28.). Descrição, aliás, possível graças ao “acultramento” do pesquisador, que se faz parte integrante do grupo para “colher os significados contextualizados, captar a realidade complexa subsistente em particularidades e apreender o ponto de vista dos membros, tendo presente todos os aspectos éticos que as revelações e confidências dos investigados implicam” (CHIZZOTTI, 2014, p. 72). Garantir que estes aspectos sejam convenientemente extraídos depois de convivência local suficiente no tempo e impliquem conclusões adequadas e reproduzíveis por outros investigadores exige, primeiramente, a ausência de pré-julgamentos e preconceitos pessoais por parte destes e sugere a consideração de microgrupos de análise – ou seja, que respeitem certas limitações de tamanho e extensão.

Tudo para se evitar a demasiada complexificação da dinâmica de interações (algo que poderia condenar as regularidades e padrões que se pretendiam identificar à submersão em tenebroso oceano de aleatoriedades).

Entre as diversas possibilidades de norteamento para uma pesquisa qualitativa, acredita-se que a mais adequada para o trabalho que aqui se pretende conduzir corresponde ao “estudo de caso”. Justamente por tal fato, optou-se por inseri-la em uma seção separada (a próxima, inclusive), de modo que as suas características específicas pudessem ser melhor evidenciadas para, em seguida, serem associadas ao contexto de pesquisa próprio deste estudo.

4.3. Estudo de Caso: Caracterização e Comentários Gerais

Da mesma forma que outras aproximações qualitativas, o estudo de caso tem sua origem firmada em aplicações antropológicas (notadamente nos trabalhos de Malinowski¹), enquanto que o pioneirismo no que tange aos esforços de formalização cabe à Escola de Chicago (HAMEL *apud* CHIZZOTTI, 2014, p. 135). De enorme potencial exploratório, foi disseminada para um sem número de domínios (clínicas médica e psicológica, educação, consultorias financeiras, jornalismo, meio empresarial etc.) sempre com o mesmo propósito: a partir de um caso, posto originalmente pelo próprio pesquisador ou, eventualmente, por um ator externo, decifrar e organizar os fenômenos e fatos sociais que ali tomam parte. É criar condições para se entender mais e melhor sobre o caso exposto de tal forma a, eventualmente, se aproveitar dessa compreensão para eventuais extrapolações (estudo de outros casos similares, realização de testes em outros grupos etc.).

Definido por alguns autores como legítima metodologia e lido, por outros, como sendo, em essência, a escolha de um objeto de estudo para que se compreenda toda a sua bagagem de especificidades no seio de determinado grupo social, o

¹Bronislaw Malinowski (1884 - 1942): antropólogo polaco, considerado um dos fundadores da Antropologia Social, alicerçada pelo desenvolvimento de um novo método de investigação de campo cuja origem remonta a intensas e extensas experiências com povos nativos para incorporação e interpretação de elementos típicos de suas respectivas culturas e tradições.

estudo de caso impele o pesquisador a uma intensa tomada de dados (obtidos a partir de diversos instrumentos diferentes) para incentivá-lo no alcance de uma descrição pormenorizada das situações que se colocam, das interações que se estabelecem, das decisões que são tomadas etc. Tal descrição, rica em detalhes e, segundo se espera, fiel ao(s) grupo(s) analisado(s), tem como propósito a produção de elementos que permitam avaliar o poder de eventuais intervenções (internas e/ou externas) para, transmitindo aos outros os resultados obtidos, estimular a tomada de decisões para a introdução de melhorias e difundir a aplicação junto a outras realidades próximas para examinar a profundidade e correção das conclusões aferidas. Diante destas características, deduz-se que o caso que se apresenta deve inspirar algum tipo de interesse, seja pelas nuances que lhes são inerentes (isto é, pelo encantamento suficiente que gera no investigador que o analisa) ou por seu suposto caráter socialmente expansivo, associado à capacidade de vê-lo considerado em múltiplos contextos segundo matizes próximas àquelas próprias do estudo original. (CHIZZOTTI, 2014, p. 135 e 136)

Pautando-se justamente pelos interesses subjacentes e pelos objetivos de investigação que Stake (STAKE *apud* CHIZZOTTI, 2014, p. 137) categoriza os estudos de caso em intrínsecos, instrumentais ou coletivos.

O estudo de caso intrínseco considera, como objeto de inspeção, um fato, fenômeno ou grupo que, em função de suas particularidades, não está vinculado a uma realidade social ampla. Com ele, não se tem a intenção de coletar informações que subsidiem uma teoria abstrata ou a exploração de casos mais amplos. Admite-se, sim, a sua perspectiva internalista como justificativa para o estudo que o envolve (ou seja, o objeto é interessante por si só, não importando a dimensão de sua representatividade junto a outros casos).

O instrumental, por outro lado, traz, implicitamente, a intenção de avaliar grupos particulares com vistas a amparar ou inspirar teorias abstratas e de estrutura mais robusta. Neste caso, lida-se com um grupo bem delimitado no espaço e em quantidade para, em tempo suficiente, extrair grande quantidade de informações passíveis de serem testadas em outros meios, orientando pesquisa ulteriores e estudos subsequentes. Portanto, a escolha do caso por parte do pesquisador, deve, inicialmente, considerar um fenômeno amplo que, analisado em

microescala, ofereça a ele a possibilidade de gerar uma semente fértil capaz de florescer/frutificar em vasto campo, encorajando-o em estudos futuros ou fazendo avançar pesquisas paralelas e correlatas conduzidas por outros investigadores.

Ao abarcar um conjunto de estudos instrumentais em uma rede complexa e intrincada, com o intuito de reunir diferentes facetas e aspectos atrelados a um fato amplo, configura-se, finalmente, o estudo de caso coletivo, também conhecido como multiestudos de caso (ou estudo de multicasos) e, de modo alternativo, como método comparativo de caso – posto que o cerne de seu corpo estrutural se fundamenta na comparação entre os múltiplos casos perscrutados.

Entre aqueles que colocam ressalvas ao estudo de caso como gerador de pareceres dignos de atenção e avaliação, seja para uma realidade específica ou susceptíveis de exportação para outros contextos, as principais críticas remetem à admissão de domínios muito restritos de análise (como fator comprometedor de seu poder de generalização) e também à ação enviesada do pesquisador que, por manter um conhecimento prévio e estritamente pessoal sobre o grupo investigado, pode alinhar as suas observações às suas convicções próprias e, muito provavelmente, distanciar-se dos resultados esperados pela construção de um quadro alternativo e inconciliável com aquele presente diante dos seus sentidos. Visando responder a estas posturas condenatórias, muitos trabalhos do final do século XX e começo do XXI (STENHOUSE, 1988; STAKE, 2005; YIN & CAMPBELL, 2002) têm manifestado preocupação em devotar esforços no revestimento do estudo de caso, enquanto caminho para a abordagem qualitativa, de vigor estrutural e rigor procedimental. Neste sentido, advogam em favor do estabelecimento de um plano de estudo de caso dividido em 4 etapas, a saber:

1. A seleção de casos e negociação do acesso.
2. O trabalho de campo.
3. A organização dos registros.
4. A redação do relatório.

Na primeira etapa, argumenta-se no sentido de buscar razões que defendam o estudo que se pretende levar a cabo, identificando e elencando motivos que justifiquem a sua importância e salientando os benefícios que se podem obter a partir dele. Posteriormente, define-se o grupo de análise, o conjunto de sujeitos cujas ações e interações serão submetidas à observação, explicitando a conexão da coletividade ali disponível para o atendimento dos objetivos preliminarmente traçados. Em seguida, limita-se o universo de comportamentos a serem focalizados, as intervenções que resultarão em dados úteis para a pesquisa conduzida de modo a se evitar a turbidez das conclusões extraídas a partir dos objetos avaliados. Finalmente, lista-se os potenciais instrumentos – observação direta, entrevistas, questionários, fotos, filmagens etc. - capazes de registrarem, da melhor forma, os comportamentos e intervenções que, segundo se espera, suprirão o pesquisador de dados qualitativamente adequados e quantitativamente suficientes. Caso o sujeito-pesquisador não mantenha relação anterior com os pesquisados, faz-se necessário, ainda, negociar a sua inserção no contexto destes, apresentando-lhes o trabalho, descrevendo, em termos mínimos, a tomada de dados e os instrumentais aplicados para tal para, finalmente, solicitar-lhes as autorizações que possibilitam o prosseguimento do estudo.

Convenientemente munido de toda a aparelhagem preliminar necessária descrita no parágrafo anterior, o pesquisador vai à campo para, de forma totalmente isenta e despido de qualquer preconceito, coletar, sistemática e intensamente, os dados que lhe interessam. Concluído este processo, passa à terceira parte: organizar as informações auferidas, separando-as de acordo com as diferentes ferramentas empregadas na formação da coletânea final para melhor orientar a análise ulterior e, também, para permitir a formação de um arquivo convenientemente sistematizado passível de ser consultado por outros investigadores interessados em avaliar, com minúcia, os mecanismos e os dados decorrentes de suas respectivas aplicações.

Ao final, cuida de elaborar um relatório que, geralmente, segue o estilo descritivo, para que se ofereça ao leitor a possibilidade de imersão no caso segundo uma perspectiva fiel – a mais próxima possível da sucessão de fatos desenrolados quando da aplicação do estudo. Outros estilos (narrativo, analítico etc.) podem

ser considerados, desde que cumpram com a tarefa de tratar o problema em seus múltiplos espectros, sustentem a sua relevância (seja em âmbito mais específico ou mesmo geral) e tratem a série captada de fatos de maneira adequada (sob o ponto de vista da análise), oferecendo a garantia de eliminação de interpretações/leituras alternativas. Tal pode ser conquistada pela submissão do relatório, antes da ocasião de sua divulgação, à crítica de outros avaliadores – um mecanismo comum de validação de pesquisas qualitativas, especialmente interessante para estudos de caso.

Apresentadas as características fundamentais pelas quais se pauta um estudo de caso genérico, passa-se à caracterização do contexto que permeou aquele que fundamenta o trabalho desenvolvido nesta dissertação.

4.4. Contexto de Pesquisa

O trabalho que aqui se apresenta fora aplicado em uma escola particular situada na região da Vila Mariana, um bairro tradicional da cidade de São Paulo. Nela, o autor desempenha o papel de professor de Física no Ensino Médio (atua junto a alunos de 2º e 3º anos), no Curso Pré-Vestibular e desenvolve atividades extracurriculares relacionadas à disciplina – ministrando aulas voltadas para Olimpíadas de Física de diversos níveis e âmbitos (estadual, nacional e internacional) e gerindo toda a administração que diz respeito à preparação dos alunos interessados em participar destas competições. Finalmente, responde, também, pela elaboração de algumas listas de exercícios, provas e simulados que são aplicados em toda a escola (assim como em escolas parceiras que adotam o seu sistema de ensino).

Com uma unidade em São Paulo e outra no interior (na cidade de Valinhos), o colégio segue um material apostilado que abre caminho para a abordagem de Física Moderna no 2º ano do Ensino Médio. O assunto se inicia com a Radiação do Corpo Negro Ideal, passa pelas ideias de quantização de energia, lida com uma primeira aplicação destas (feita para o Efeito Fotoelétrico) e conclui com uma segunda inserção junto ao Modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio.

Oferece, em essência, um conjunto de 9 aulas (tradicional, de 50 minutos cada) para abordar este assunto.

As primeiras aulas de Física Moderna oferecidas a este público geram algumas reações incomuns em comparação ao ensino-aprendizagem de tópicos típicos da Física Clássica. Nota-se uma presença mais forte da História da Física em cada uma das aulas; adentra-se, enfim, ao século XX; fala-se, pela primeira vez, em “prêmios Nobel” – Einstein, até então um personagem folclórico dentro da Física ensinada no ciclo médio, se faz presente entre os alunos; e o mais importante: surgem, de forma abrupta, várias ideias revolucionárias que estabelecem, em relação à Física anterior, um fosso muito largo, difícil de ser transposto.

Com o intuito de permitir que o aluno, neste período escolar, esteja mais acostumado com estas e outras “novidades”, optou-se por desenvolver este trabalho experimental que envolve uma ligeira antecipação deste conteúdo para jovens de 9º EF II e 1º EM. Para tal, seriam aproveitados os horários reservados a atividades olímpicas destinadas a alunos deste grupo (noites de terças-feiras ou sextas-feiras, uma única vez na semana – de forma que a inserção deste programa não interferisse nos cronogramas rígidos de matérias próprios destas séries). Notou-se, na série de aulas atreladas ao projeto, a presença de um mínimo de 10 e um máximo de 15 alunos (a frequência era um tanto irregular, justamente por se tratar de uma atividade extracurricular), todos de perfil olímpico – ou seja, predispostos a participarem de competições de conhecimento que envolvem a Física. Estes alunos estão acostumados a lidar com a Física segundo o viés conteudista “teoria + exercícios”, tanto no núcleo duro que partilham com seus muitos colegas (a escola, na Vila Mariana, possui 6 turmas de 9º EF II e 13 de 1º EM, cada uma com cerca de 50 alunos) quanto nas aulas olímpicas (nas quais o conteúdo é aprofundado no nível exigido por cada competição). Posta a forma como a Física lhes é apresentada em sala de aula, acredita-se que eles nutram, em relação aos seus quase 1000 companheiros de série, a mesma visão de Ciência a-histórica, despida de vínculos com o contexto sócio-histórico que lhe circunscreve – um dos pontos que este trabalho visa sanar, referenciado nos eventos científicos que se sucederam no fim do século XIX e começo do XX. Ademais, a abordagem, para eles, é inédita. Afinal, dada

a perspectiva focada no conteúdo (já em sua forma final) e a obrigatoriedade em se seguir um material didático pouco flexível, não se tem espaço para a introdução de narrativas que possam auxiliar na aproximação entre dado assunto e sua versão última, em linguajar mais técnico. Talvez, estes 15 alunos pudessem cumprir mais tranquilamente com este “salto quântico” rumo à technicalidade. As narrativas, entretanto, foram pensadas para suavizar não só o caminho deles, mas principalmente os de seus colegas que, eventualmente, confirmam à Física uma visão tipicamente astigmata: turva e desfocada.

A aplicação das atividades fora iniciada em junho de 2019 e concluída em outubro do mesmo ano, marcada por encontros semanais para apresentar as seguidas propostas e discutir os vários resultados. Vários dos textos que conferem estrutura a este trabalho oferecem espaço para que o aluno apresente a sua visão acerca de dado assunto. Nestes casos, entregava-se dado texto ao aluno, fazia-se uma apresentação inicial, explicitava-se a tarefa que lhes cabia e fornecia o intervalo de uma semana para que pudessem refletir a respeito e registrar as suas impressões. Estes textos eram coligidos e seus resultados devidamente debatidos sempre que a ocasião permitia. Várias das impressões deles extraídas serão discutidas na seção posterior (“Análise dos dados e conclusões”).

Capítulo 5

5. Análise dos dados

5.1. Introdução

Em consonância à metodologia de pesquisa que norteia este trabalho (de faceta qualitativa, especialmente identificada a um estudo de caso) e aos dados – todos textuais – que dela resultaram, optou-se, neste trabalho, por uma metodologia de análise de viés igualmente qualitativo. Especificamente, empreender-se-á um esforço de avaliar as informações extraídas pela aplicação do produto educacional segundo o modelo da Análise Textual Discursiva, um mecanismo que, recebendo produções textuais como entrada, guia-nos por uma rota sistematizada de etapas procedimentais importantes para o estabelecimento de conexões entre as produções textuais elaboradas e os referências teóricos considerados.

Neste capítulo, serão apresentados aspectos fundamentais desta metodologia de análise para que, em seguida, possamos considerá-la no estudo de caso aqui sugerido. Posteriormente, será comentada a forma pela qual este trabalho foi aplicado junto ao universo de alunos explicitado no final da seção anterior (Metodologia de Pesquisa) e, em paralelo, as conclusões extraídas de cada uma das etapas de aplicação – sempre expostas à luz da estrutura sugerida pela Análise Textual Discursiva.

5.2. Análise Textual Discursiva: um breve resumo

A pesquisa qualitativa tem como pressuposto deixar-se guiar pelo processo de desenvolvimento da pesquisa para abrir espaço gradativo para as inferências que dela derivam. Isto não significa, entretanto, que o estudo e a interpretação

destes resultados sejam conduzidos de forma aberta e sem qualquer norteamento procedimental. Tal como a pesquisa quantitativa, a leitura dos resultados em perspectiva qualitativa tem respaldo metodológico e a Análise Textual Discursiva se coloca como uma das vias possíveis para a estruturação desta tarefa.

Nas palavras de Moraes (2003):

“a análise textual qualitativa pode ser compreendida como um processo auto-organizado de construção de compreensão em que novos entendimentos emergem de uma sequência recursiva de três componentes: desconstrução dos textos do *corpus*, a *unitarização*; estabelecimento de relações entre os elementos unitários, a categorização; o captar do novo emergente em que a nova compreensão é comunicada e validada” (MORAES, 2003, p. 192).

De início, coligem-se os textos e documentos (sejam estes predefinidos ou elaborados, de modo específico, para a pesquisa levada a cabo), constituindo o que Moraes, na citação acima, concebe como *corpus* – o conjunto de significantes materializados em produções textuais, imagens, representações iconográficas etc. que referenciarão as interpretações e leituras posteriores. Já neste ponto, faz-se necessário explicitar, como o faz Moraes (2003), a não existência de uma única leitura a partir do *corpus* composto – independente do material que o configure. Em suas palavras:

“Toda leitura é feita a partir de alguma perspectiva teórica, seja esta consciente ou não. Ainda que possa admitir o esforço em colocar entre parênteses essas teorias, toda leitura implica ou exige algum tipo de teoria para poder concretizar-se. É impossível ver sem teoria; é impossível ler e interpretar sem ela. Diferentes teorias possibilitam os diferentes sentidos de um texto. Como as próprias teorias podem sempre modificar-se, um mesmo texto sempre pode dar origem a novos sentidos”. (MORAES, 2003, p. 193).

Definido o *corpus* de análise (a partir da consideração de todos os documentos existentes e/ou coletados ou de subconjunto suficiente deles – tendo plena consciência de que a porção subtraída não fornece acréscimos relevantes),

passa-se, então, à primeira etapa do processo: a fragmentação do *corpus*, também reconhecida como desconstrução dos textos ou *unitarização*. O propósito é separar os documentos e dados pelos seus pormenores e pelas suas peculiaridades, reduzindo-os a unidades elementares cujos limites são estabelecidos pelo próprio pesquisador e se colocam em condição consonante às suas intenções enquanto sujeito inquiridor. Vale esclarecer que assumir esta postura não implica a introdução de viés de distorção (ou seja, não se pretende classificar e selecionar os dados para sujeitá-los a uma conclusão preliminar que o pesquisador gostaria de atender), mas pura e simplesmente o ajuste do dados ao limite de observação que se pretende considerar – da mesma forma que um físico ou químico, com a proposta de avaliar a interação existente entre átomos de silício e de oxigênio, toma um punhado de areia e o “fragmenta” até o nível atômico, investindo, no máximo, no domínio subatômico associado aos elétrons mas, certamente, sem se preocupar com cortes adicionais que o conduzisse ao domínio subnuclear dos quarks e glúons.

Da fragmentação supracitada, emergem as unidades de análise, as produções que serão admitidas pelo pesquisador em sua análise futura e que, no próximo passo, serão classificadas, categorizadas segundo critérios que podem ou ser apriorísticos ou emergentes de uma reflexão profunda do leitor orientada pelos referenciais teóricos que o fundamentam. É neste sentido que volta a emergir uma ordem para suplantar o caos associado à *unitarização* preliminar, haja vista que a categorização – nome atribuído a esta segunda fase de todo o processo de análise – pretende estabelecer articulações entre as diferentes unidades base por meio da identificação recursiva de classes que possam aproximá-las ou distanciá-las segundo a perspectiva teórica adotada. Nos termos de Torres et al. (2008), a recursão, comparada à lapidação de uma pedra bruta, “se processa através dos mecanismos sensoriais de dedução, indução e intuição do pesquisador, que concomitantemente permeiam o processo de investigação analítica”. (TORRES et al., 2011, p. 5)

Finalmente, em terceiro e último estágio, deve resultar um ou mais metatextos que expressem os significados extraídos dos significantes, clarificados a partir dos esforços anteriores vinculado à categorização e consequência da ordem por ela iluminada – trata-se da “comunicação e validação do novo emergente” apontada

em citação anterior. Propositadamente, faz-se menção à clarificação e iluminação para se aludir à metáfora constantemente utilizada por Moraes (2003) para ilustrar um processo de análise qualitativa marcado por estas três etapas: a de uma “tempestade de luz”. A luz surge, verdadeiramente, no segundo estágio da análise, na forma de *flashes* e *insights* que permitem ao pesquisador enxergar a realidade previamente mascarada pelo caos tenebroso da fragmentação. Esta terceira fase remete, em seu entendimento, à “explicitação de luzes sobre o fenômeno” (MORAES, 2003, p. 210).

Os metatextos compõem o canal de comunicação entre o pesquisador e o seu leitor e podem ser mais descritivos (fato que os aproxima dos próprios textos integrantes do *corpus*) ou mais interpretativos (estes dotados de maior abstração, por demandarem um esforço de compreensão que os aproximem dos referenciais teóricos considerados pelo pesquisador).

5.3. Descrição da aplicação e apresentação dos resultados

Nesta seção, serão apresentados os propósitos existentes por trás de cada uma das narrativas aplicadas junto aos alunos participantes da pesquisa e descritas as situações que permearam a consideração de cada uma destas atividades. Todos os contos que norteiam a análise empreendida encontram-se publicados em um apêndice a esta dissertação.

A aplicação do módulo envolveu uma série de nove textos, sendo:

- Um texto de introdução, com a finalidade de apresentar o projeto aos alunos (Anexo A).
- Seis contos principais, amarrados pela intenção de se aproximar, gradativa e sucessivamente, às noções de quantização (Anexos B a G).
- Uma atividade complementar, que visava, em primeiro plano, permitir uma determinação experimental da constante de Planck h a partir do manuseio de LED's e, paralelamente, a retomada de alguns dos contos principais admitidos anteriormente (Anexo H).

- Uma atividade de fechamento, cuja intenção era colocar o aluno no centro da construção de narrativas fictícias para a elaboração de paralelos capazes de explicar aspectos importantes próprios do Efeito Fotoelétrico – um dos fenômenos físicos que invoca, nitidamente, as ideias de quantização para alcançar plenitude em sua descrição e entendimento (Anexo I).

As análises dos resultados (quando existentes) advindos de reflexões feitas sobre a aplicação das oito primeiras atividades serão expostas logo após as suas respectivas descrições. Neste caso, cuidar-se-á de referendar as conclusões obtidas pelas falas específicas de alguns alunos, representativas dos aspectos “novos emergentes” nos quais culmina a Análise Textual Discursiva.

A atividade de fechamento, especial pela possibilidade de mensuração do sucesso da proposta, contará com o investimento de uma dosagem suplementar de minúcia e detalhamento: depois da conveniente descrição de sua intenção e da situação que permeou a sua aplicação, serão conduzidas análises individuais, específicas para cada aluno respondente na tentativa de evidenciar êxitos notórios e falhas pontuais – neste último caso, buscando uma origem ou uma compreensão aprofundada que estejam possivelmente referenciadas em obstáculos epistemológicos bachelardianos. Dada a importância desta fase final do processo, tal análise será levada a cabo em um capítulo específico: o capítulo 6.

5.3.1. Texto de Introdução/Apresentação

Esta atividade tem por propósito estabelecer um contato inicial entre os alunos respondentes e o personagem principal da série de contos: Peter Planck, alguém que se revela, nesta fase, apenas pelo seu nome e por uma informação inicial associada ao seu tamanho (muito pequeno, diga-se de passagem). Pequeno tal como uma criança recém-nascida? Uma moeda? Um grão de arroz, quem sabe? Enfim... Quão pequeno? Peter Planck não responde a essa pergunta neste primeiro momento e coloca o termo “pequeno” como algo propositadamente vago, oferecendo a garantia de que tal noção será melhor exposta no decorrer

das narrativas. Afirma-se, apenas, como um guia turístico disposto a conduzir o leitor por um universo diminuto, apresentado ao interlocutor a partir de um experimento mental interessante.

- Inicialmente, envia o leitor à Lua e pede que este, a partir do nosso satélite natural, compartilhe as suas visões acerca da Terra agora distante. O que vê? Que detalhes percebe? Até que ponto se estende o seu poder de resolução?
- Finalmente, propõe ao “leitor lunático” um retorno à Terra e solicita que, durante a viagem de retorno, este apresente as suas novas visões acerca de nosso planeta. Há novos detalhes? Se sim, o que se passa a enxergar em termos de novidades?

Fazendo um paralelo, leva o leitor à seguinte reflexão: o que se poderia ver se o olho humano, com uma acuidade visual incrivelmente mais sensível que a real, se aproximasse progressivamente da folha de papel que contém estes caracteres? Esta atitude clarifica um pouco mais para o aluno com quem se interage a ideia de “muito pequeno” que Peter Planck diz estar vinculada ao universo que se pretende explorar. Os próximos contos, inclusive, se articulam tal como a reflexão proposta: oferecem ao interlocutor a possibilidade de uma aproximação progressiva ante a folha de papel, uma vez que os fazem enxergar detalhes cada vez mais importantes e próprios do mundo atômico e subatômico – âmbito onde as leis quânticas têm atuação mais vigorosa.

A análise desta primeira atividade pode ser feita a partir das respostas oferecidas pelos alunos ao experimento mental sugerido, estas compondo o *corpus* da análise textual discursiva (Moraes, 2003). Os dois itens anteriormente descritos corresponderam, originalmente, a duas perguntas para as quais foram redigidas diferentes respostas.

As visões da Terra a partir da Lua e, em seguida, no referencial de uma “espaçonave” que faz a viagem de retorno ao nosso planeta foram, em primeira instância, conforme a utilização da ATD, ser divididas em duas categorias: “científica” e “geográfica”.

As descrições que se inserem na categoria “científica” são marcadas pela presença de termos que aludem ao saber técnico e que estão associados à

abordagem típica das Ciências Naturais. O aluno 1D, em sua visão a partir da Lua, afirma poética e cientificamente:

“Enxergo um planeta muito bonito, sinônimo de vida, pois está a uma distância ideal do Sol, possui água e atmosfera. Tudo que já vivi neste planeta parece tão distante e ele tão pequeno, porém sua magnificência não se dissipou mesmo estando distante”. (aluno 1D)

Em sua viagem de retorno, prossegue:

“Quando me aproximo, me sinto cada vez menor em relação ao planeta que da Lua parecia pequeno; me sinto como um grão de poeira pequenininho, ou, talvez, um átomo de tão pequeno”. (aluno 1D)

Note-se que, em sua resposta para a última situação proposta, ele já antecipa a presença do termo “átomo”, uma das palavras-chave dentro da série de narrativas aplicadas, mas que, neste texto inicial, não fora mencionada uma única vez. Um colega seu, o aluno 1B, responde a primeira pergunta da seguinte forma:

“Como a Lua não possui própria atmosfera, vejo a Terra azul e com muitas nuvens, e o céu totalmente negro, inclusive quando estiver de “dia”. Podemos ver variações no relevo da Terra também (desde que relativamente grandes)”. (aluno 1B)

Em suma, as respostas que se enquadram nesta categoria são caracterizadas pela presença de palavras e de formas de expressão que estão mais inclinadas às Ciências da Natureza, tais como abordadas pelas disciplinas correlatas (Física, Química e Biologia) até o 1º ano do Ensino Médio.

Em contrapartida, a categoria “geográfica” reflete um olhar menos técnico e, por mais redundante que se pareça, carregado por uma presença mais marcante do sensorial – notadamente da visão enquanto sentido estimulado pela experiência. “*Daqui [da Lua] a Terra parece tão pequena. Consigo ver seus grandes oceanos e os continentes. Até parece aqueles globos terrestres que tenho em casa (sem as divisões territoriais é claro)*” – disse o aluno 1F ao compartilhar, com Peter Planck, a sua visão da Terra a partir da Lua. Aproximando-se da Terra em seu regresso, ele complementa:

“À medida que me aproximo, a pequena esfera começa a ficar cada vez maior e começam a aparecer pequenos pontinhos de luz, que vão se transformando em cidades e construções. Começo a ver também alguns pontinhos andando que, então, “viram” pessoas”. (aluno 1F)

A avaliação das respostas parece sugerir uma fronteira entre caracterizações tipicamente visuais (as “geográficas”) e outras que extrapolam este aspecto, concedendo-lhes um viés “científico” (ainda que reduzido, limitado e/ou incipiente). Dentro da coletânea de registros, notam-se diferentes alunos se referindo à camada esbranquiçada que revolve a Terra pelo emprego do termo “nuvens”; outros poucos optaram por “atmosfera”. Em primeira leitura, pode-se supor que a impressão trazida por qualquer dos termos seja equivalente. Contudo, acredita-se que o segundo termo carregue, consigo, uma faceta científica muito mais explícita por sua precisão e por sua correlação com outras noções e conceitos típicos da Ciência. Afinal, quando se refere a atmosfera, abre-se caminho para discutir, tecnicamente, a composição química dela, as proporções nas quais os diferentes gases aparecem, a ideia de “pressão atmosférica” etc. Todas estas construções são imbuídas de abstrações próprias das Ciências e que refletem, em uma perspectiva bachelardiana, um *espírito concreto-abstrato* – ou seja, o uso de estruturas científicas e/ou matemáticas para a descrição do mundo disponível aos sentidos (BULCÃO, 2009, p. 54 e 55). Por outro lado, os que empregam o termo “nuvem” tendem a se ater, unicamente, ao sensorial, externando um espírito mais vinculado ao estritamente concreto. A partir desta discussão, conclui-se que, segundo o referencial da epistemologia de Gaston Bachelard, “concreto-abstrato” e “concreto” poderiam, também, ser nomes dados às categorias aqui destacadas. Entretanto, para oferecer uma visão mais acessível dos principais itens utilizados para categorizar as respostas dadas, optou-se por associá-los às disciplinas que podem ter orientado os alunos envolvidos na participação do experimento mental em questão. Cabe frisar, que não se pretende nesse primeiro momento defender uma visão bachelardiana as respostas dos alunos, mas iniciar o debate sobre possíveis indícios de percepções dos pesquisados que dialogam com a visão epistemológica do trabalho.

5.3.2. Primeiro Conto: “Eu, um universo de átomos! Um átomo no universo!”

Este conto tem, inicialmente, a intenção de apresentar um pouco do “mundo científico” e da sua dinâmica de trabalho. Todo trabalho científico pode ser metaforicamente representado por uma viagem. Uma jornada curta ou longa em sua extensão temporal, de início definido, mas de paradas intermediárias e destino final nada apriorísticos. Um passeio progressivo orientado por roteiros frequentemente reformulados pelo surgimento de novas e sucessivas perguntas.

Para levar um pouco desta ideia ao aluno, propôs-se um experimento inusitado, pelo objeto alvo da investigação: ovos. A condução poderia ser física – por meio da estimulação direta de todos os sentidos disponíveis – ou mental e correspondia ao seguinte: dada uma amostra contendo alguns ovos, o que se poderia fazer para separar os crus dos cozidos? Importante: sem quebrá-los. A intenção era a de fazer uma representação em escala (neste caso, bem simplificada) do processo de investigação científica: a interação com um objeto de estudo, o levantamento de hipóteses a serem posteriormente testadas, a formulação de uma teoria e, finalmente, a obtenção de conclusões. É justamente este processo que se pretende metaforizar, nos vários textos, na forma de viagens – ainda que, neles, os locais de destino e os objetos de estudo sejam distintos daquele aqui considerado.

A seguir, para trazê-los para o contexto da nossa viagem principal (a exploração do universo atômico e subatômico com as leis quânticas que lhes são próprias), passou-se a um questionamento mais próximo do contexto científico, sobre o qual se debruçaram filósofos, cientistas naturais, físicos, químicos e biólogos de renome e de grande reputação em um intervalo de tempo de impressionantes 2500 anos: do que somos feitos? Há, eventualmente, uma porção minúscula que corresponda, na prática, à essência última da nossa composição – e de todos os objetos que nos rodeiam? Ou será que não há limites para a divisão de certo corpo em partes menores?

Finalmente, discorreu-se um pouco – de forma bem resumida – sobre a evolução deste debate que culminou com a vitória dos atomistas (decretada nas primeiras

décadas do século XX) e sobre alguns números absurdos que tornam um pouco mais precisa, em relação ao conto de Introdução, a ideia do átomo como entidade diminuta. Por exemplo: um pão francês de 50 gramas tem uma quantidade de átomos da ordem de 10^{24} (isto é, 1 septilhão deles). Se cada átomo do pão francês custasse 1 dinar iraniano (unidade fundamental de uma das moedas mais desvalorizadas do planeta, equivalente a 0,00000030 do dólar americano segundo cotação de 20/12/2019), tal pão teria um custo total da ordem de 300 quatrilhões de dólares americanos – o que significa algo em torno de 2 000 vezes maior que a quantidade de ativos financeiros em circulação por todo o mundo (segundo dados tomados no fim de 2019). Foi com comparações deste calibre que o conto se encerrou, abrindo caminho para os próximos passos da aventura: o desbravamento do mundo subatômico.

Nesta atividade, o *corpus* de análise sofreu diferentes divisões, motivadas por diferentes critérios que foram definidos de acordo com as respostas apresentadas para cada pergunta. Desta forma, a interação sensorial e/ou mental com os ovos motiva uma primeira categorização; *a posteriori*, os retornos obtidos a partir da pergunta “De que somos feitos?” orientou uma reclassificação. As ações sugeridas como respostas às primeiras perguntas foram separadas em: “mecânicas concretas”, “mecânicas abstratas”, “mecânicas mistas” e “outras ações físico-químicas”. As primeiras trazem, unicamente, a ideia de agitar ou chacoalhar os ovos e observar diferentes respostas para ovos crus e cozidos, tal como expressa a fala do aluno 1J:

“Chacoalhar os ovos a fim de perceber se seu conteúdo é mais líquido (cru) ou sólido (cozido)”. (aluno 1J)

Adquire-se ligeiro grau de abstração quando se sugere mergulhar os ovos, individualmente, em volumes de água ou em soluções salinas para checar eventuais diferenças de densidade – o conceito físico que permite a extrapolação para além do concreto. É neste contexto que o aluno 1L fundamenta a sua solução:

“Colocar na água com sal. A diferença de densidade fará alguns ovos boiarem e outros afundarem, separando os crus dos cozidos”. (aluno 1L)

As respostas encaradas como mistas referem-se tanto ao ato de chacoalhar como à separação por supostas diferenças de densidade, tal como nos expressa o aluno 1K:

“Eu cogitaria chacoalhar ambos os ovos e observar qual parece mais líquido e com mais espaço dentro do ovo – esse seria o cru. Eu também acredito que o ovo cozido tem mais massa. Assim, seria uma forma de diferenciá-los. Por fim, experimentaria conferir diferenças de densidade”.

(aluno 1K)

Finalmente, as “outras ações físico-químicas” contribuem com falas incrivelmente criativas que agregam alternativas interessantes às saídas mais convencionais até aqui citadas.

“Encoste o ovo em uma lanterna bem potente, nos ovos crus a luz vai atravessar mais o ovo do que nos ovos cozidos, devido a cor transparente da clara no ovo cru e a cor esbranquiçada no ovo cozido.”

(aluno 9A)

Já afetados pela bagagem científica construída a partir de um acumulado de aulas de Física e Química, todos os alunos advogaram em favor do atomismo. Nos detalhamentos das respostas dadas, surgiram informações que permitem classificá-las em: “atomismo superficial”, “atomismo técnico” e “atomismo dinâmico”. Em sua faceta superficial, o atomismo é defendido sem muita elaboração, como em “Depois de tanto cortar chegaríamos a uma parte que, por mais que tentássemos, não cortaríamos. Essa pequena parte se juntaria com muitas outras de pequena partes e formaria um complexo bem firme que é basicamente a estrutura de tudo”, afirma o aluno 1H. Na versão técnica, constatada em maior parte dos textos que compõem o *corpus*, reconhece-se a presença de um atomismo moderno, de unidades elementares que não mais correspondem aos átomos científicos. Abre-se, aqui, caminho para os *quarks*.

O trecho abaixo, por exemplo, reflete o conhecimento de um aluno que, mais do que frequentar as aulas ordinárias de Física, tem envolvimento com olimpíadas de conhecimento que abrangem a dita disciplina, participando de todas as atividades preparatórias que as tenham como alvo. Ademais, tem um instinto curioso aguçadíssimo que lhe serve de estímulo para tocar leituras paralelas,

tanto em nível técnico quanto aquelas mais inclinadas para a divulgação científica direcionada, a priori, ao público amplo.

“Eu acho que tudo (e todos) somos feitos de átomos. Que são compostos por prótons, nêutrons e elétrons que por sua vez são compostos por quarks (que imagino serem feitos de cordas compostas por “energia pura”). (aluno 1G)

Por fim, provavelmente respeitando o dinamismo típico da Ciência atual, um único aluno, ao responder o questionamento, assume um posicionamento mais cauteloso ao defender a hipótese atômica, escrevendo:

“Nunca saberemos se chegamos ou não na última parte da matéria; antes acreditavam que o átomo era a última parte mas hoje sabemos que este é formado por prótons, nêutrons e elétrons, formados de outras partículas. São as últimas?”. (aluno 1J)

De posse das informações coletadas, pode-se inferir, à luz de Gaston Bachelard (1996), alguns aspectos interessantes. No tocante à distinção entre ovos crus e cozidos, nota-se que o “agitar” e o “chacoalhar”, apesar de ações mecânicas simples, configuram-se como oportunas para a resolução do problema; mergulhá-los em água para estabelecer comparações entre densidades, entretanto, não parece dos caminhos mais eficazes, pois as variações de massa e de volume obtidos pelo cozimento do ovo são muito sutis para caracterizar uma distinção tão acentuada. Em suma, a introdução de abstrações (neste caso, configurada a partir do conceito de densidade), ainda que sutis, não oferece, necessariamente, uma garantia de aproximação ao rigor científico. Pode-se, sim, interpretar a ocorrência de um obstáculo epistemológico quando se admite que densidade volumétrica corresponde a uma medida que entrega informações sobre a distribuição de massa – esta melhor caracterizada por uma grandeza física que não costuma ser trabalhada no Ensino Básico: o momento de inércia.

Quando se avalia, finalmente, a unanimidade, entre os alunos, do sucesso da hipótese atômica ao responder a pergunta “De que somos feitos?”, percebe-se claro viés justificado pela abordagem desta questão em cursos elementares de Ciências – presentes no Ensino Fundamental II e no Ensino Médio. Neste sentido, a maioria reconhece a existência de partículas subatômicas: uns falam explicitamente em prótons, nêutrons e elétrons; outros avançam um pouco mais

para escalas ainda menores e chegam aos *quarks*; há quem, inclusive, faça a menção às cordas fundamentais. Desta respostas, notam-se alguns fatos interessantes: o primeiro deles remete a uma extrapolação inadequada feito pelo aluno que, ouvindo sobre o reconhecimento recente de partículas ainda menores (os quarks), acha que todos os componentes subatômicos da matéria trazem estes quarks em seu “interior” – inclusive os elétrons; o segundo, por outro lado, parece mais sutil, e está relacionado à sucessão histórica dos modelos atômicos e, conseqüentemente, ao dinamismo do pensamento científico. Boa parte destes alunos não explicita, nem em termos vagos, a existência de um intervalo de tempo (de anos, décadas ou até séculos) necessário para a identificação de “novos tijolos elementares”. Nesta perspectiva, não enxergam a Ciência como construção e, conseqüentemente, não visualizam as rupturas que, em dado momento histórico, se interpõem para separar um quadro científico vigente de outro que emergirá para lhe substituir. Acredita-se que as aulas “blocadas” e a estrutura dos conteúdos programáticos (que, no espaço de uma semana, transitam, por exemplo, do átomo de Dalton para as noções de prótons, nêutrons e elétrons e de átomos isótopos, isótonos e isóbaros) contribuem fortemente para o comprometimento da noção real de tempo em Ciência e para a visão de progresso linear e bem-comportado.

5.3.3. Segundo Conto: “Uma conversa entre (á)tomos e a dinâmica do progresso científico”

O segundo conto principal parte da proposta de “invasão do pão francês” para avançar um pouco mais na viagem proposta às porções mais íntimas da matéria. Inicia-se a partir de uma revelação aparentemente confusa: a de que “os átomos não são tão átomos assim”! A proposta, claramente, é mostrar para os alunos que o entendimento físico-químico de diversos fenômenos depende da admissão de “átomos divisíveis” – algo paradoxal se admitirmos, *ipsis litteris*, a raiz grega do termo “átomo”. É assim que se chega, inicialmente, às noções de partículas subatômicas como prótons, nêutrons e elétrons e, conseqüentemente, à possibilidade de diferentes tipos de átomos – dessemelhantes, uns dos outros,

pelas diferenças nas quantidades destes corpúsculos. Abre-se caminho, por exemplo, para as concepções de elementos químicos, de isótopos e de íons.

Como já apontado na seção anterior, este conhecimento já fazia parte do arcabouço cognitivo dos alunos considerados nesta pesquisa. Portanto, na tentativa de surpreendê-los, optou-se por questioná-los acerca de uma eventual estrutura interna para prótons, nêutrons e elétrons. Revelou-se que, segunda a teoria mais moderna para esta área da Física (o Modelo Padrão da Física de Partículas Elementares), prótons e nêutrons podem ser subdivididos em *quarks* e os elétrons, por outro lado, constituem exemplos de *léptons* fundamentais – isto é, que não podem ser “fragmentados”. Ainda que no texto, não se tenha falado especificamente em *quarks* e *léptons*, acredita-se que os comentários, feito na ocasião da apresentação deste material, trouxeram acréscimos para as suas respectivas concepções pessoais – uma vez que, em suas leituras, tudo é feito de quarks, inclusive os elétrons. Tal fato foi ilustrado pela fala do aluno 1G exposta no fim da seção anterior, no contexto do primeiro conto.

Ao se apresentar a ideia de átomos subdivididos em elétrons, prótons e neutros e, no caso destes dois, uma fragmentação em *quarks*, permite-se, entre os mais jovens, um questionamento ao atomismo. Alguns deles, legitimamente aliás, externalizam a reflexão – em linguagem mais simples, claro: “Se o átomo original já passou por fragmentações sucessivas, o que garante, hoje, a existência de entidades mínimas?”. Dar respostas fechadas a perguntas como esta significa, antes de tudo, quebrar o dinamismo que é característico da Ciência, que se desenvolve a partir de perguntas e respostas concebidas por uma grande comunidade de pessoas interagentes, cujos trabalhos e esforços se destinam ao avanço da fronteira do conhecimento científico. E é neste momento que Peter Planck, apoiado no exemplo do desenvolvimento temporal da Teoria Atômica, coordena uma digressão para buscar as visões que os alunos mantêm acerca do progresso científico. Importante para tentar externar a leitura dos alunos sobre o aspecto humano existente por trás das Ciências da Natureza (uma discussão que raramente é levada adiante em sala de aula), esta reflexão ganhou importância adicional quando, no mesmo período, o noticiário nacional alertava os brasileiros acerca da contenção dos investimentos em pesquisa no meio universitário e dos cortes de bolsas de iniciação científica, mestrado e doutorado

(MARQUES, 2019). Deixando que os jovens percebessem, por conta própria, a conexão entre este segundo conto e o momento de crise enfrentado pela ciência brasileira, sugeriu-se uma produção textual mais extensa que aquelas invocadas em outros momentos, norteadas pelas seguintes questões:

- Como você acha que a Ciência “é feita”? Por pessoas isoladas? Por grupos de pessoas que se ajudam? Em casa? Nos laboratórios? Em que lugares?
- Conduzir pesquisas científicas é importante?
- Existe uma orientação mais adequada para a pesquisa científica? Ou seja, a Ciência deve se guiar a partir dos problemas socioeconômicos ou de questões tecnológicas – na tentativa de resolvê-los? Ou será que ela se faz autossuficiente em termos de motivação para a produção de conhecimento?
- É importante financiar o trabalho científico? Se sim, quem deveria cuidar disso?
- O financiamento de um trabalho científico deve ser feito apenas depois de comprovada uma aplicação generalizada a partir da qual a sociedade possa se beneficiar?

Para melhor entender as ideias que os alunos mantêm sobre as questões propostas, cuidar-se-á, inicialmente, de fragmentar o universo de respostas obtidas para algumas perguntas (aquelas que determinaram maior diversidade de respostas) para conceber o *corpus* de análise que, por sua vez, será devidamente categorizado para orientar possíveis conclusões e leituras particulares.

A primeira pergunta tinha por intenção fazer o aluno refletir sobre quem são as pessoas que “fazem” a Ciência e em que lugares este processo de construção toma parte. Em todas as respostas, notou-se uma conexão direta entre pessoas e locais, no sentido em que o “quem?” implicava, por tabela, o “onde” e vice-versa. A maioria das respostas, sucintas aliás, pareceu refletir o padrão seguido pela Ciência brasileira: produzia em laboratórios, em grandes centros universitários, por pessoas especializadas que atuam de forma colaborativa (sem entrar no mérito de como se estrutura essa rede de colaboração). Uma resposta que ilustra essa perspectiva pode ser vista a seguir:

“Eu acho que a Ciência é formada por pesquisa feitas por grupos de cientistas. Não só os que trabalham juntos num mesmo laboratório, mas também aqueles cientistas de regiões ou até mesmo de países diferentes que compartilham as suas pesquisas podendo auxiliar uns aos outros a chegar num resultado. E como a Ciência é bem ampla, ou seja, depende de inúmeros fatores, pesquisadores de diversos ramos podem se ajudar” (aluno 1H)

Respostas como a anteriormente discriminada foram incorporadas na categoria “padrão” (assim nomeada por corresponder à interpretação “média” assumida pelos respondentes). Elas refletem versões simplificadas de uma imagem mínima que, segundo gostaríamos, fosse conservada pelos alunos: a de Ciência enquanto um empreendimento especializado e coletivo. Outros, entretanto, foram além e apresentaram retornos mais abrangentes, inserindo pessoas e locais mais humildes como parte integrante do processo. Tal pode ser ilustrado pela seguinte resposta (categorizada em “ampla leitura”):

“A Ciência é algo complicado que engloba organizar ideias sobre determinado assunto e uni-las, e esta permanece em contínuo desenvolvimento. Isto implica no trabalho de diversas pessoas de origens, tipos e graus de escolaridade diferentes. Qualquer um pode contribuir para o conhecimento; desde amadores em oficinas improvisadas até profissionais em laboratórios de ponta” (aluno 1J).

Ao se afirmar que “qualquer um pode contribuir para o conhecimento”, deve-se tomar cuidado para não imbuir de caráter científico qualquer afirmação ingênua ou descabida. Os tempos atuais, a propósito, trazem um pouco desta perspectiva, quando se nota amplos contingentes de pessoas aproveitando-se do alcance das redes sociais para propalar notícias falsas e, também, para difundir e reavivar ideias que há muito já foram cientificamente refutadas, como o terraplanismo. A Ciência – e principalmente a Ciência contemporânea – é um empreendimento estruturalmente complexo que requer altíssima qualificação de pessoal para prosseguir a sua rota de evolução e desenvolvimento. Acredita-se que o aluno, ao defender que a Ciência pode ser feita por “amadores em oficinas improvisadas”, quer, na verdade, defender a reprodução de fenômenos científicos já conhecidos e plenamente explorados por pessoas mais humildes

que detenham um mínimo de traquejo e habilidade no que tange à replicação de técnicas herdadas de gerações anteriores ou apreendidas de forma autônoma por meio de algum instrumento ou veículo de aprendizagem.

Para a terceira pergunta, que diz respeito à orientação do trabalho científico, o “padrão” (nome da primeira categoria) é o de uma Ciência que pode se orientar ou não pela demanda social. Sendo assim, defendem que a evolução científica pode tomar uma necessidade ampla (de uma comunidade de indivíduos) como ponto de partida para desenvolver conhecimentos e técnicas ou, de modo complementar, pode verificar se dado conhecimento, originariamente motivado por um fato não-social, pode ser empregado na resolução de um problema comunitário ou facilitar a vida das pessoas que integram certa sociedade. Uma resposta que contempla essa perspectiva é a do aluno 1D, que afirma:

“Penso que uma pesquisa científica ao ser iniciada deve sempre ter um objeto a ser alcançado e não necessariamente deve, em primeiro plano, ter o objetivo relacionado ao uso social em grande escala, porém, se o obteve, não há problema algum. Concluindo, acho que a pesquisa pode se orientar pelas duas possibilidades anteriores” (aluno 1D)

Outras respostas fizeram questão de extrapolar os possíveis vínculos entre Ciência e Sociedade e defenderam, também, o “Ciência pela Ciência” (nome da segunda categoria), ou seja, uma Ciência que, alternativamente, encara assuntos estritamente científicos e, portanto, internos, como força motriz para o seu desenvolvimento. Essa defesa é constatada na seguinte resposta:

“Pesquisas científicas são importantes para um melhor entendimento do Universo que você vive, para mim, essa é a parte mais fascinantes da Ciência: descobrir e explicar fenômenos. E fazer pesquisas científicas em função de descobrir e explicar fenômenos ao invés de bens sociais específicos é muito melhor, uma vez que, entendendo um fenômeno, é possível que seja aplicado em outros bens sociais, enquanto que o estudo de apenas um deles (bens sociais) seria aplicado em apenas uma coisa específica.” (aluno 1F)

A explicitação de uma motivação interna por estes últimos pode estar ligada a um contato mais inicial com a prática científica – afinal, quem tem uma vivência mais longa e estreita com assuntos científicos tende a ter contato com episódios na História da Ciência nos quais a componente social não fora admitida como referência para o desenvolvimento científico. Da mesma forma, uma resposta deste tipo pode ser consequência de uma série de aulas que aludem a um conteúdo cujo progresso seja coordenado por um estímulo essencialmente interno. Recorde-se, por exemplo, que, para alunos desta faixa etária, é comum se ensinar tópicos de Astronomia e Gravitação, áreas que avançaram, majoritariamente, graças ao impulso decisivo da curiosidade intrínseca ao ser humano. Certamente, pode-se vincular os movimentos periódicos de astros a fenômenos terrenos (alternância de dias e noites, definição dos períodos de cheias e vazantes de rios etc.) e tais fatos comportam tremenda importância para civilizações antigas. Entretanto, a partir de certo ponto do decurso histórico (já com Galileu, Kepler e Newton, por exemplo), os estímulos estritamente científicos passaram a predominar.

Finalmente, a questão do financiamento, discutida na quarta e quinta perguntas, abre espaço para maior diversidade de respostas. Todos, sem exceção, concordaram que as ações pública e privada são importantes para o progresso da Ciência, sendo que as diferenças começaram a surgir nos pesos de contribuição. Quem se pôs a discutir as intensidades de ação, na prática científica, de ambas as esferas, defendeu maior investimento por parte do governo, sempre pensando no maior público-alvo ao qual os resultados poderiam beneficiar: a grande população. Em suas leituras, maior investimento em Ciência pode implicar maior apropriação tecnológica, melhores índices de saúde, de qualidade de vida e de bem-estar social etc. Entre estas respostas alinhadas com esta perspectiva, que parecem se preocupar mais com os retornos a “curto prazo” (nome dado à primeira categoria) destaca-se:

“O financiamento de pesquisas depende muito, a parte como melhorias na saúde, transporte, geração de energia; enfim, em tecnologias para ajudar o povo o governo deve financiar tendo em mente o objetivo final da pesquisa e com a certeza de que beneficiará a todos, não só uma classe em específico; já se a

finalidade da pesquisa for um interesse de uma empresa em específico que melhore internamente a produção ou os produtos, a empresa deve financiar, pois deve-se levar em conta que não será necessariamente um benefício para todos e sim uma necessidade da empresa.” (aluno 1A)

Por outro lado, alguns alunos, mais do que concordarem com as nuances apontados anteriormente, fizeram questão de enfatizar a necessidade de investimento em Ciência Pura – independente da fonte originária de recursos. Evidenciaram, para isso, o impacto evidente ao ser humano, enquanto espécie naturalmente curiosa e, também, apontaram o explícito benefício ao incremento, em “médio/longo prazo” (categoria complementar), dos níveis educacionais da população que, certamente, atuariam pela retroalimentação da “engrenagem”. Defensora desta postura, encontra-se a seguinte resposta:

“O Governo com certeza deveria ser o maior responsável por fornecer esses recursos (principalmente financeiros), assim como é também um dos maiores beneficiados quando a Ciência em seu território progride, pois amplia-se a cultura, educação, saúde e desenvolvimento do país. É importante lembrar que, assim como a pesquisa não deve ser limitada quando tem uma aplicação social direta, não devemos limitar os recursos dedicados a ela simplesmente porque os seus resultados não parecem “úteis”; a pesquisa num país a longo prazo, quase sempre leva a uma melhor educação, desenvolvimento e, às vezes, até a geração de capital.” (aluno 1K)

5.3.4. Terceiro conto: “A luz é uma onda!(?)”

O terceiro conto inicia a série de textos explicativos, que se propõem a trazer a Física de forma gradualmente técnica para, ao final e enquanto conjunto, permitirem uma melhor aproximação à proposta original: a conveniente apropriação da ideias de quantização e o entendimento de algumas situações que ou motivaram a sua elaboração ou lhe ofereceram campo para aplicação.

Deste modo, neste conto e nos outros dois que o sucederão, não há interação escrita com os alunos respondentes.

De início, convida-se o interlocutor para um passeio rumo ao passado. Para tal, investe-se no estímulo da melhor máquina do tempo que todos carregamos: a imaginação. A época escolhida remete ao quinquênio de 1851 a 1900 e a intenção com a “viagem” era a de descrever a Física, enquanto Ciência, no dito período. Já dotada de uma estrutura madura, sustentava-se em 3 pilares: a Mecânica, fortalecida desde a segunda metade do século XVII com os trabalhos de Isaac Newton e sempre usada como referencial primeiro para a modelagem de novos fenômenos; a Termodinâmica, reconhecida comumente como a “Física do Calor” e que, desde a primeira metade do século XIX, entende que a natureza fundamental do calor está centrada no movimento térmico dos constituintes de um corpo e, em função disso, se põe a estudar as diversas situações nas quais este toma parte relevante; finalmente, o Eletromagnetismo, domínio que concentra a análise de todos os fenômenos elétricos e magnéticos – reunidos em um só corpo a partir dos trabalhos de pesquisadores como Oersted, Ampère, Faraday e Maxwell (este último o responsável pelo grande trabalho de unificação e síntese, completado em meados dos anos 1860).

Um típico físico, atuante no final do século XIX, entendia que a Física, apoiada nestas três colunas, já estaria plenamente consolidada. Acreditava que o seu trabalho, assim como o de gerações vindouras de novos cientistas, se resumiria, dali em diante, à abordagem de novos fenômenos segundo às estruturas teóricas fundamentais já existentes ou à busca por novos métodos de medição – que possam colaborar para maior precisão dos resultados físicos. Toda essa categoria de físicos, entretanto, foi acometida de surpresa quando que os sustentáculos desta Física – dita “Clássica” – não ofereciam respostas adequadas para o problema da “Radiação Térmica dos Corpos Aquecidos”.

O problema é logo introduzido a partir de alguns exemplos: carvão enrubescido quando atirado ao fogo, lâminas metálicas que mudam de coloração quando aquecidas pela ação de um forno ou de um maçarico, estrelas que apresentam colorações características e lâmpadas incandescentes que irradiam a partir da corrente elétrica que esquentam um filamento de tungstênio. Enfim... Todo corpo

cujo estado térmico é caracterizado por uma temperatura absoluta $T > 0$ envia, para o espaço circunvizinho, energia na forma de ondas eletromagnéticas.

A familiarização do aluno com o dito problema, importante contexto para compreender alguns aspectos do surgimento da Teoria Quântica, começa com uma melhor descrição destas ondas irradiadas. Tal como feito anteriormente, parte-se dos inúmeros contextos de aplicação para varrer o espectro eletromagnético desde as ondas de rádio, passando pela luz visível e culminando com os raios X e os raios γ . Em seguida, adentra-se ao mundo dos mensurandos de modo a prover uma categorização de viés científico e, assim, surgem as definições de comprimento de onda λ e frequência f e como estas são importantes para fracionar o conjunto de ondas eletromagnéticas nas várias porções citadas nas aplicações iniciais. Finalmente, trata-se de mostrar como estes conceitos se entrelaçam para permitir o cálculo da velocidade de propagação das ondas – que assume valor fixo quando a propagação se dá no vácuo.

Atingida uma suficiência mínima no tratamento destas grandezas, fecha-se o texto oferecendo ao aluno a garantia de que o problema será convenientemente abordado no próximo conto. Nele, ter-se-á uma noção melhor do descompasso existente entre a Física Clássica e a Radiação Térmica dos Corpos Aquecidos, fonte da qual emergem hipóteses revolucionárias que determinam o surgimento da Teoria Quântica.

5.3.5. Quarto conto: “Crise sombria projetada pela luz de uma lâmpada”

Seguindo com a série de textos explicativos, para os quais não se exige nenhum retorno textual do aluno e que servem, tão somente, para aproximá-los de modo gradual do objeto de estudo sugerido, este quarto conto tem a intenção de fechar a proposição do problema da Radiação Térmica dos Corpos Aquecidos. Inicia com a retomada de um fato já apresentado no texto anterior: todo corpo, a uma temperatura $T > 0$ (em *kelvin*) irradia ondas eletromagnéticas para o espaço ao redor. Propõe-se, inclusive, uma forma de verificação que ilustre essa irradiação

para o caso do corpo humano: a experiência de enfrentar um metrô abarrotado de pessoas.

A origem do desalinho se apresenta quando os físicos se dispõem a fazer uma pergunta um pouco mais profunda: como determinar a distribuição da quantidade de energia irradiada por unidade de tempo? Em outros termos: de toda a energia emitida por um filamento de tungstênio em, por exemplo, 1 segundo... Qual o percentual que se apresenta como ondas eletromagnéticas no infravermelho? Na região da luz visível? No domínio do ultravioleta? Em todas as outras zonas do espectro?

Para lidar com estas questões, opta-se por um caminho mais visual, associado à interpretação gráfica das curvas de emissão. Em primeiro momento, mostra-se a curva correspondente ao chamado “corpo negro ideal” (não definido no texto, para evitar demasiadas abstrações) a $3\,000\text{ K}$. Apenas se afirma, segundo um viés mais utilitarista, que este corresponde, em boa aproximação, à lâmpada incandescente de filamento já citada no texto anterior. Do conceito de área sob a curva (evocado, da mesma maneira, segundo uma leitura qualitativa), explica-se o porquê da completa proibição da comercialização destas lâmpadas em 2017: pagava-se por muita energia emitida e aproveitava-se uma fração ínfima na forma de energia luminosa (isto é, na região da luz visível). Grande consumo energético, alto custo monetário e baixa eficiência resumem algumas de suas propriedades desvantajosas.

Por último, a partir de um outro gráfico, traz-se à tona a grande cereja de toda a discussão levada a cabo nesta série de contos: a inadequação da Física Clássica para a resolução do problema em questão. Este aspecto é explicitado a partir da comparação de dois gráficos associados a um mesmo corpo: o emissor ideal a uma temperatura de $5\,000\text{ K}$. Um deles fora construído a partir de dados experimentais; o outro, a partir de uma modelagem teórica que se apoia na Mecânica, na Termodinâmica e no Eletromagnetismo clássicos. A inexistência de uma superposição entre as curvas (nem em boa aproximação) sustenta a ideia de que algo está errado e precisa ser revisto. Com esta atitude, tem-se a intenção de extrapolar o problema específico para mostrar, de modo sutil, uma faceta importante do progresso científico: a necessidade de concordância entre

construções teóricas e dados experimentais – independente de quem surja antes no tempo.

Posta a incompatibilidade, abre-se espaço para o seguinte questionamento: como resolver esta situação? Peter Planck encerra o seu discurso afirmando ao interlocutor que esta é a ponte para o próximo conto, oportunidade na qual o aluno ficará ainda mais próximo de um real entendimento acerca de sua natureza diminuta, característica que lhe garante a condição de ser um excelente guia turístico neste “mundo do muito pequeno”.

5.3.6. Quinto conto: “A luz é uma partícula!(?)”

Depois de mostrar (ou, mais modestamente, de sugerir) a origem do problema, fica, naturalmente, o questionamento: o que fazer com a Física, dita “Clássica”, construída até aqui? Existem evidências de que ela não mostra adequada para resolver o problema da Radiação Térmica dos Corpos Aquecidos. Seria, então, o caso de abandoná-la por completo para reedificar uma Nova Física “do zero”?

O quinto conto da série “Um conto, um quantum”, o último da série de textos explicativos, sai um pouco da questão central para discutir a noção de “domínio de validade” de uma teoria científica. Essa fuga se faz necessária para que se entenda que a Física pré-século XX não deve ser descartada, uma vez que a sua ação se provou correta em muitos contextos e ofereceu à humanidade uma compreensão conveniente para uma grande extensão de fenômenos que ocorrem no Universo que nos rodeia. Reconhecer a sua importância constitui, portanto, a primeira postura epistemológica importante; admitir que, a partir dela, podem ser dados novos passos que permitam uma primeira exploração dos novos domínios é a próxima entre as atitudes a serem levadas a cabo. Inclusive, é necessário enfatizar que, nesta proposta de trabalho, pararemos por aqui. Afinal, sabe-se que a aplicação das imagens e representações clássicas para os conceitos de “posição”, “velocidade”, “trajetória”, “órbita” e tantos outros no

domínio atômico se mostra bem-sucedida até certo ponto, mas cria conflitos internos com a própria Física Clássica em outros (vide a discussão por trás da estabilidade do átomo). Cerca de 25 anos foram necessários para que se criassem novos alicerces que, apesar de abstratos, têm o mérito de desfazer essas inconsistências. Faz-se referência aos trabalhos de Heisenberg (meados de 1925) e de Schrödinger (início de 1926). Como um alento, afirma-se que no próximo texto, a questão da realidade dos objetos quânticos surgirá de forma breve para, eventualmente, inspirar um ponto de partida para um novo trabalho na mesma estrutura (de contos).

Feito o pequeno aparte, volta-se ao problema e a revisão das noções que possibilitaram os passos adiante. Aborda-se o trabalho pioneiro de Max Planck que, em dezembro de 1900, apresentou à Sociedade Alemã de Física um trabalho no qual afirmava que a solução para os desajustes observados no problema do irradiador ideal estava na quantização das energias de oscilação dos átomos que o compõe. Acredita-se que a conexão entre os termos “quântica” e “quantização” já sugira ao aluno, de cara, a importância do trabalho de Planck para o “surgimento” da Teoria Quântica. Entretanto, é preciso explicar: o que significa tratar a energia como uma grandeza quantizada?

Para diminuir a dimensão deste fosso, faz-se um paralelo entre “trocas energéticas” e “trocas monetárias”. Compara-se o quantum de energia ao quantum monetário – para nós, brasileiros, o centavo de real. Finalmente, comenta-se que quantizar uma grandeza significa garantir que seus valores sejam expressos a partir de combinações que envolvam quantidades fundamentais e números inteiros. Uma noção revolucionária, que encontrou respaldo quando Albert Einstein, em 1905, fez o mesmo (isto é, propôs uma interpretação teórica que envolvia hipóteses de quantização) para a energia transportada por um feixe de luz para explicar toda uma série de nuances vinculadas ao Efeito Fotoelétrico. Com este trabalho de Einstein, aliás, recupera-se a natureza corpuscular (de partícula) para a luz e uma grande confusão se estabelece sobre a interpretação de seu caráter. Oras, se as duas leituras são excludentes, reacende-se o debate que opôs Newton a Huygens no século XVII: qual o aspecto fundamental da luz? Onda ou partícula? Estas questões serão adequadamente abordadas, junto aos alunos, no texto a seguir.

5.3.7. Sexto conto: “Abrindo os olhos para uma nova noção de realidade”

Neste último conto (entre aqueles que compõem a série principal), o “mistério” lançado no texto anterior será resolvido: o que é a luz? Onda ou partícula – em sua natureza fundamental?

Na Física Clássica, os conceitos de onda e partícula detêm valores geométricos muito fortes. Tanto que, se a tarefa de diferenciar for lançada a um conjunto de alunos, muito provavelmente eles não darão conta de conduzir tal distinção via palavras, mas tenderão a dar um “primeiro passo” por meio de um desenho ou diagrama. E, apelando para o visual, apresentarão as primeiras diferenças.

Motivado por esta suposição, este último conto trouxe, novamente, os alunos para a cena principal. A proposta era a de, partindo de objetos clássicos (como esta folha retangular, um lápis cilíndrico, uma lente esférica etc.), requerer que os alunos representassem:

- a luz que incide sobre uma superfície;
- os átomos que compõem o seu corpo;
- os elétrons, prótons e nêutrons que formam estes átomos.

As respostas, conforme esperado, foram todas clássicas – alinhadas, portanto, com tudo o que já aprenderam acerca dessas noções. Apresentam, entretanto, diferenças quanto ao grau de complexidade e, conseqüentemente, nas ideias correlatas nelas imbuídas. Neste sentido, optou-se por fragmentar o *corpus* de análise em duas categorias: “primeiras imagens” e “representações complexas”. As “primeiras imagens” trazem a luz na forma de raios que se propagam de forma retilínea, sem qualquer sugestão para a sua estrutura elementar (alunos 1A e 1H) ou a partir de perfis ondulatórios próximos daqueles vistos no terceiro conto (aluno 1K); os átomos desenhados como bolinhas de tamanhos fixos (aluno 1A, por exemplo) e partículas subatômicas expostas de igual forma, sem uma representação capaz de apontar os seus respectivos lugares no átomo (aluno 1M). À medida que os esquemas traziam, explicitamente, conceitos físicos neles inseridos, observava-se maior ou menor grau subjacente de complexidade, fatores que, portanto, os aproximavam da segunda categoria. O aluno 1K, dotado

de um bom conhecimento de Física e de grandes habilidades artísticas, uma lâmpada e a luz que ela emitia para o espaço e que incidia na superfície de uma mesa. Em seguida, tratou de aplicar um “zoom” no feixe de luz exibido para, em um desenho ao lado, mostrar a constituição fundamental deste. Terminou com o desenho de diferentes perfis ondulatórios, com diferentes distâncias “pico a pico” (isto é, diferentes comprimentos de onda) – fazendo questão de apontá-las na figura. Conclusão: há a alusão para a natureza ondulatória, a explicitação do significado de comprimento de onda, a possibilidade do uso deste conceito para a diferenciação de cores e, por fim, o reconhecimento de que a luz emitida, enquanto branca, é verdadeiramente policromática. Como exemplo de atitude similar, vale apontar que o aluno 1M, ao representar os “átomos que compõem o seu corpo”, fez 4 bolinhas de tamanhos diferentes (e corretos, em termos comparativos e estritamente qualitativos) para ilustrar elementos químicos distintos, especificamente o carbono (C), o hidrogênio (H), o oxigênio (O) e o nitrogênio (N), os majoritariamente presentes em nosso corpo (constituído quase que integralmente de matéria orgânica) e organizou-os para representar a molécula de serotonina. As imagens por eles concebidas para cada um dos referidos conceitos estão representadas logo a seguir.

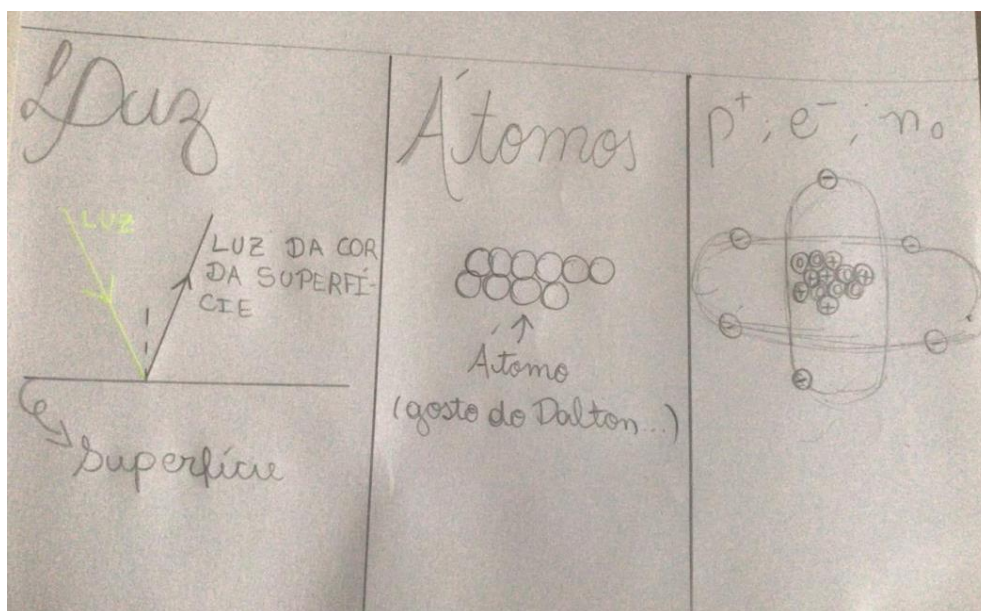


Imagem 5.1.: Reprodução dos conceitos de luz, átomos e partículas subatômicas segundo o aluno 1A. Acervo pessoal.

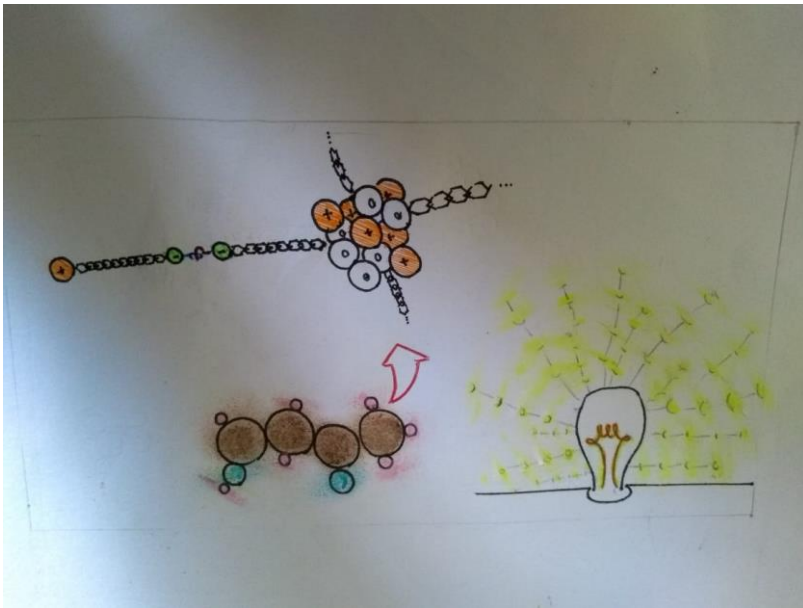


Imagem 5.2.: Reprodução dos conceitos de luz, átomos e partículas subatômicas segundo o aluno 1H. Acervo pessoal.

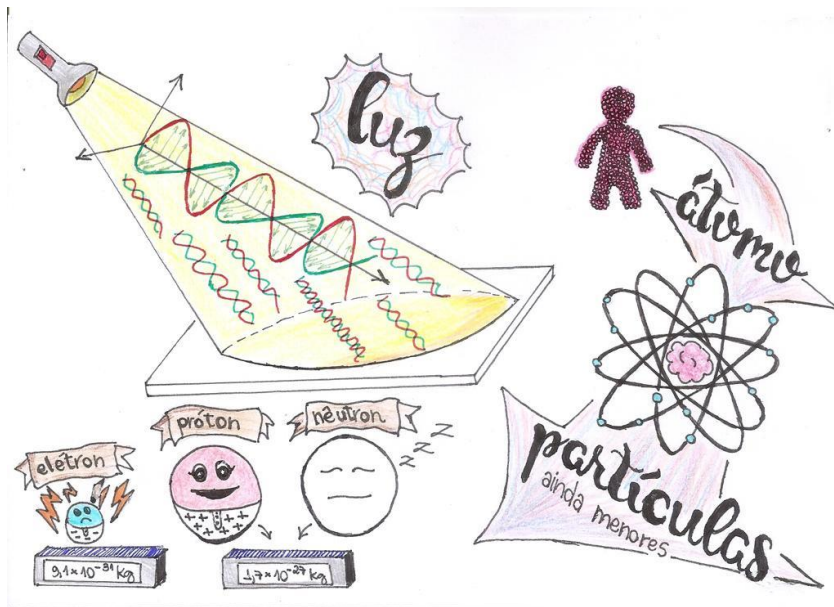


Imagem 5.3.: Reprodução dos conceitos de luz, átomos e partículas subatômicas segundo o aluno 1K. Acervo pessoal.

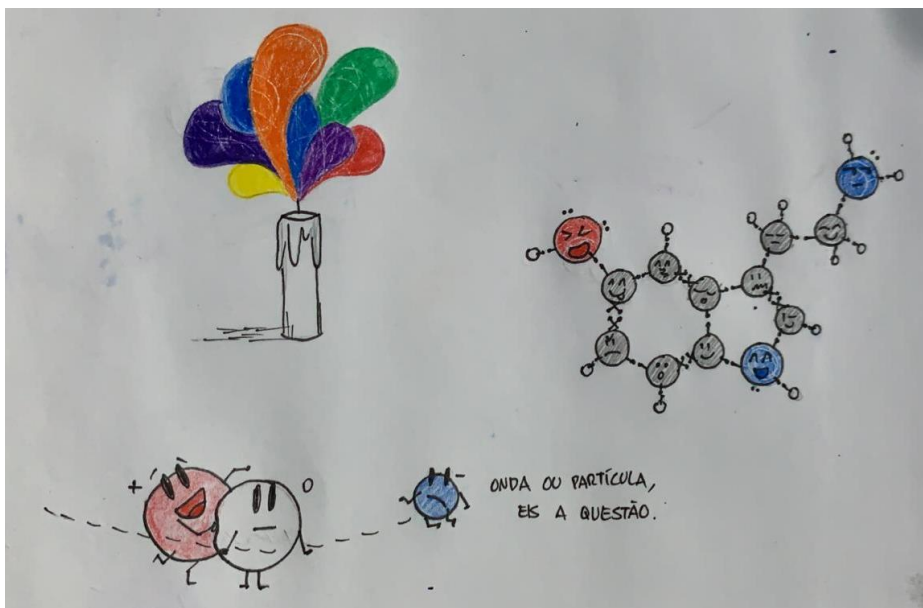


Imagem 5.4.: Reprodução dos conceitos de luz, átomos e partículas subatômicas segundo o aluno 1M. A molécula reproduzida à direita é a serotonina (fórmula química $C_{10}H_{12}N_2O$). Acervo pessoal.

Com os resultados em mãos, passou-se à discussão de todo o material coligido. Em primeiro lugar, entende-se como extremamente válida a valorização de toda a produção apresentada, pois, mais do que representar algo autêntico (ou, também, a reprodução de algo que lhes fora ensinado até certo estágio), ela reflete muito da evolução do pensamento científico (até certo estágio, é claro). Note-se que, como já fora apontado, a Teoria Quântica conseguiu se mostrar bem-sucedida na resolução de certos problemas a partir de uma abordagem que envolvia um “mix” de novas hipóteses à Física Clássica já existente. Caso explícito é o do átomo de hidrogênio na leitura de Bohr: admita a existência de órbitas circulares estacionárias, considere a quantização do momento angular orbital do elétron e a Física Clássica já conhecida se encarrega de (quase) todo o resto. As energias se mostram bem aceitáveis, as séries espectrais são bem reproduzidas, mas... O que dizer das intensidades das linhas/termos que formam cada série? Como conciliar o elétron acelerado em trajetória circular com a estabilidade do átomo? Pois é! Alguns bons passos foram dados; outros, porém, precisariam sucedê-los. E alcançá-los dependeria de um apego a novas representações, da consideração de uma nova noção de realidade. Aqui, entra a segunda parte do processo: a correção da produção dos alunos.

Entender como funciona a dinâmica por trás do funcionamento deste mundo de entidades minúsculas significa substituir as geometrias clássicas das folhas de papel retangulares, dos lápis cilíndricos e das órbitas circulares de Bohr por... Equações! No geral, bem complexas em suas facetas, aliás! Mas o benefício é claro: garantir que a Mecânica Quântica seja uma teoria coesa em seus pontos de partida e que seja “invicta” em suas previsões. Resolver o problema das intensidades das linhas espectrais do hidrogênio pode ser feito com as “distâncias de dois índices” na perspectiva de Heisenberg – que nada têm a ver com as distâncias classicamente mensuráveis (com uma régua, por exemplo); a estranha ideia de órbitas estacionárias e circulares estáveis para um portador de carga (um elétron) pode ser totalmente abandonada em favor de uma equação diferencial no espaço e no tempo (a equação de Schrödinger) e de uma conveniente interpretação para as funções ψ que emergem a partir de sua resolução. Um adendo: estas funções ψ não admitem nenhum paralelo com qualquer noção clássica concebível.

Bachelard trata desta questão em sua obra epistemológica. Neste sentido, reconhece que o conhecimento científico representa uma versão aproximada da realidade – como admite em seu texto *Ensaio sobre o Conhecimento Aproximado*. Esta tese era, inclusive, compartilhada entre filósofos franceses da mesma época, como Pierre Duhem o faz em seu livro *A Teoria Física*. Diferentemente de Duhem, entretanto, Bachelard reconhece duas ordens de aproximação e se coloca como um dos pioneiros em reconhecer novidade na objetividade instituída pela Ciência Contemporânea. Enquanto a Ciência típica da Idade Moderna representa uma primeira aproximação da realidade, aquela que se coloca de forma imediata e perceptível aos sentidos, a Ciência Contemporânea “inaugurou uma nova era, a da segunda aproximação” (BULCÃO, 2009, p. 86). De forma ainda mais específica, para melhor caracterizar esta ordem, Marly Bulcão escreve:

“As teorias da ciência contemporânea como a relatividade ou a mecânica quântica e a mecânica ondulatória são exemplos claros dessa segunda ordem de aproximação, segundo Bachelard, pois fizeram retificação nos conceitos e métodos clássicos, apresentando conhecimentos novos,

dentro de uma perspectiva totalmente diferente. Para Bachelard a ciência contemporânea inaugurou uma nova etapa na história das ciências, pois a segunda aproximação representa um progresso muito grande, sendo um passo novo para o aperfeiçoamento técnico e experimental da observação, da medida e da verificação, além de construir uma evolução da racionalidade científica” (BULCÃO, 2009, p. 87).

Posto que as Mecânicas Matricial de Heisenberg e Ondulatória de Schrödinger são intangíveis para o ensino básico (elas o são, inclusive, para alunos nos primeiros anos de graduação), tentou-se trazer esta ideia de forma mais simples, a partir do exemplo do fóton. O que é o fóton? Fóton é um quantum de luz (de qualquer radiação eletromagnética, na verdade), uma entidade elementar de características corpusculares que “carrega” uma energia $E_f = h \cdot f$ – em que h é a chamada constante de Planck e f é a frequência da radiação que lhe corresponde. Referir-se ao fóton, neste momento, mostrou-se extremamente oportuno para a resolução de um enigma: a identidade de Peter Pan, revelado, finalmente, como um fóton de luz verde! A escolha da cor tem a motivação óbvia da inspiração que empresta de seu “irmão” mais famoso: Peter Pan, repleto de vestes verdes da cabeça aos pés. A ela, soma-se feliz coincidência científica: em condições de visão fotópica (ou seja, em condições de intensidade luminosa minimamente suficientes para a distinção de cores), a sensibilidade do olho humano é máxima para o comprimento de onda de 555 nm – que corresponde ao verde! Sensibilizar os olhos do interlocutor ao máximo para lhe permitir enxergar os mecanismos próprios deste universo diminuto dos átomos e das partículas subatômicas é o maior entre os objetivos aqui propostos. Em nossa concepção, um fóton verde, pela sua qualidade de ator importante neste domínio e pela sua especial interação com o olho humano, pareceu mostrar-se adequado para este propósito.

5.3.8. Atividade Complementar: “Medindo a Constante h de Planck”

Com o intuito de permitir que os alunos tivessem um contato prático interessante com o assunto, desenvolveu-se uma atividade experimental com LED's que visava o alcance de dois objetivos:

- Permitir um entendimento suficiente da tecnologia LED para defender a sua viabilidade como alternativa às lâmpadas incandescentes (já discutidas no terceiro conto).
- Oferecer um caminho para a determinação experimental da constante de Planck h , de valor tão pequeno e, em primeira imagem, aparentemente distante de qualquer aplicação cotidiana que se julgue acessível.

Para isso, serviu-se de um roteiro experimental construído, originalmente, por cientistas do Perimeter Institute (localizado em Waterloo, no Canadá) e cuidou-se de adaptá-lo para a estrutura de conto (para manter o estilo original e para assegurar a presença de Peter Planck) e, também, de empreender pequenas modificações técnicas para adequá-lo aos equipamentos, utensílios e aparatos disponíveis.

A proposta fundamental consistia em associar um LED de dada cor em série a um resistor ôhmico de resistência predefinida e conectar o conjunto a uma pilha de 9 V. A partir de um potenciômetro, dever-se-ia regular a tensão entregue ao LED e, com muito cuidado, registrar, com o auxílio de um multímetro, a tensão necessária para fazer o LED começar a acender. Esta tensão específica, variável de acordo com a cor do LED, guarda relação com a energia dos fótons característicos a serem emitidos e possibilitam, portanto, a obtenção de um valor experimental para h .

Na ocasião, os alunos foram divididos em grupos de 2 a 3 pessoas para lidar com a proposta experimental. A parte que lhes parecia mais difícil era a montagem do aparato. Por serem de 9º EF II ou, no máximo, do 1º EM, jamais haviam mexido com a montagem de circuitos elétricos neste nível. Ainda assim, deixou-se a execução fluir de forma livre e ajudas pontuais foram prestadas aos grupos presentes (6 conjuntos ao todo). Em toda a sequência de passos, as maiores dificuldades estavam nos cuidados e acertos com o potenciômetro –

especialmente em relação à situação do cursor móvel e aos contatos elétricos nos 3 pinos – e na identificação do momento em que os LED's começam a acender. Resolvidas estas dificuldades para as primeiras tomadas de dados, notou-se que a repetição para os LED's de outras cores foi feita de forma totalmente autônoma e independente.

Após a tomada de dados, passou-se à discussão relacionada à representação gráfica destes. Ensinou-se sobre os elementos essenciais presentes em um gráfico (eixos cartesianos, nomes dos eixos, unidades de medida consideradas para as grandezas envolvidas, título do gráfico e, principalmente, a consideração de escalas adequadas para a plotagem de pontos) e, posteriormente, permitiu-se aos estudantes a construção dos seus gráficos – que, neste caso, caminhou até conversão dos dados coletados em pontos experimentais. Por mais que tenha sobrado tempo, optou-se por conduzir o tratamento e a análise dos gráficos construídos, via técnicas de ajuste linear (feito no “olhômetro” ou segundo um “Método de Mínimos Quadrados” executado por calculadoras científicas), na semana seguinte. No tempo livre, os jovens tiveram a oportunidade de montar arranjos experimentais diferentes daquele sugerido pelo roteiro que guiava a atividade. Como os brilhos dos LED's produzem efeitos estéticos interessantes, os alunos quiseram associar LED's de diferentes cores em série ou em paralelo para fazê-los acender em conjunto. Também interagiram com LED's RGB disponíveis para simulações experimentais.

A seguir, serão apresentadas algumas imagens que documentam a aplicação da atividade experimental em questão, ilustrando um pouco do seu desenrolar e, também, expondo um pouco dos resultados dela extraídos.

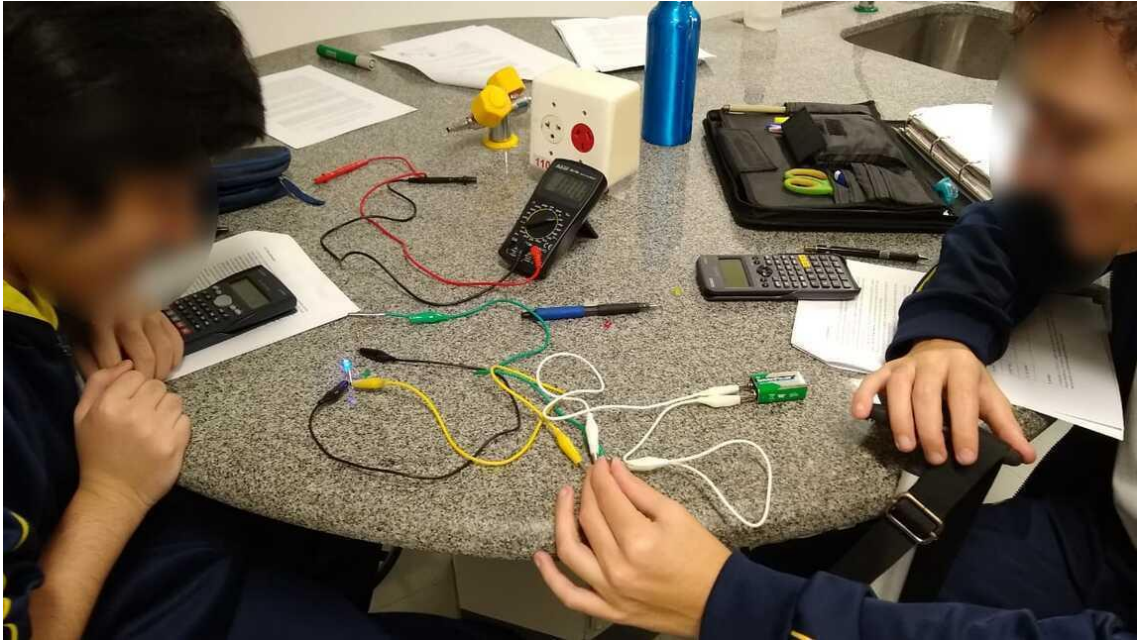


Imagem 5.5.: Alunos trabalhando na extração de dados que lhes permitissem a determinação experimental da constante h de Planck. Acervo pessoal.

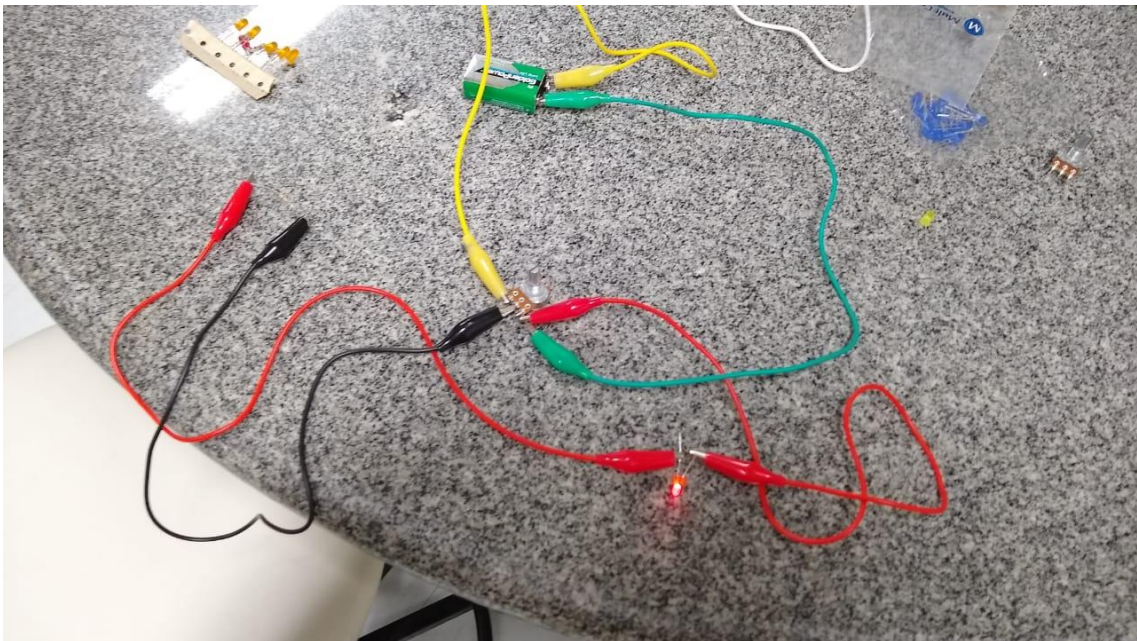


Imagem 5.6.: Circuito montado (sem o multímetro) para a obtenção de dados a partir da análise de um LED vermelho. Acervo pessoal.



Imagem 5.7.: Alunas, com os dados já tomados, trabalham para tratá-los para, finalmente, construírem os gráficos que permitirão a determinação de h . Acervo pessoal.

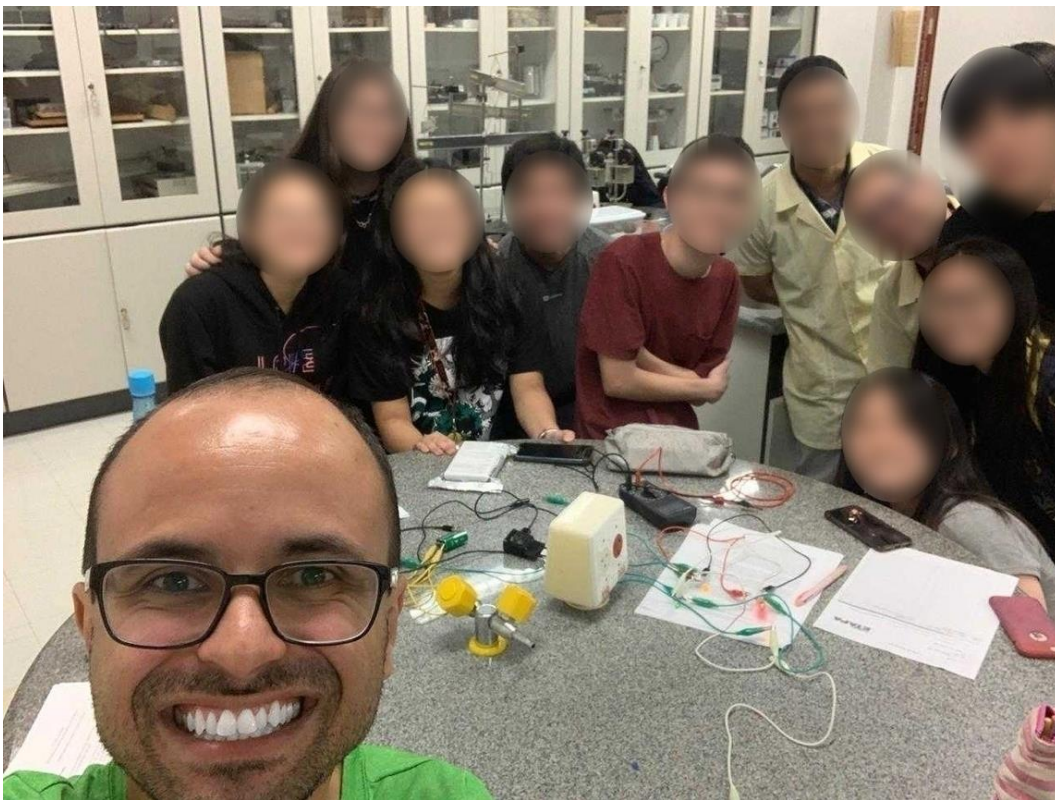


Imagem 5.8.: Professores e parte dos alunos envolvidos na execução da atividade experimental proposta. Acervo pessoal.

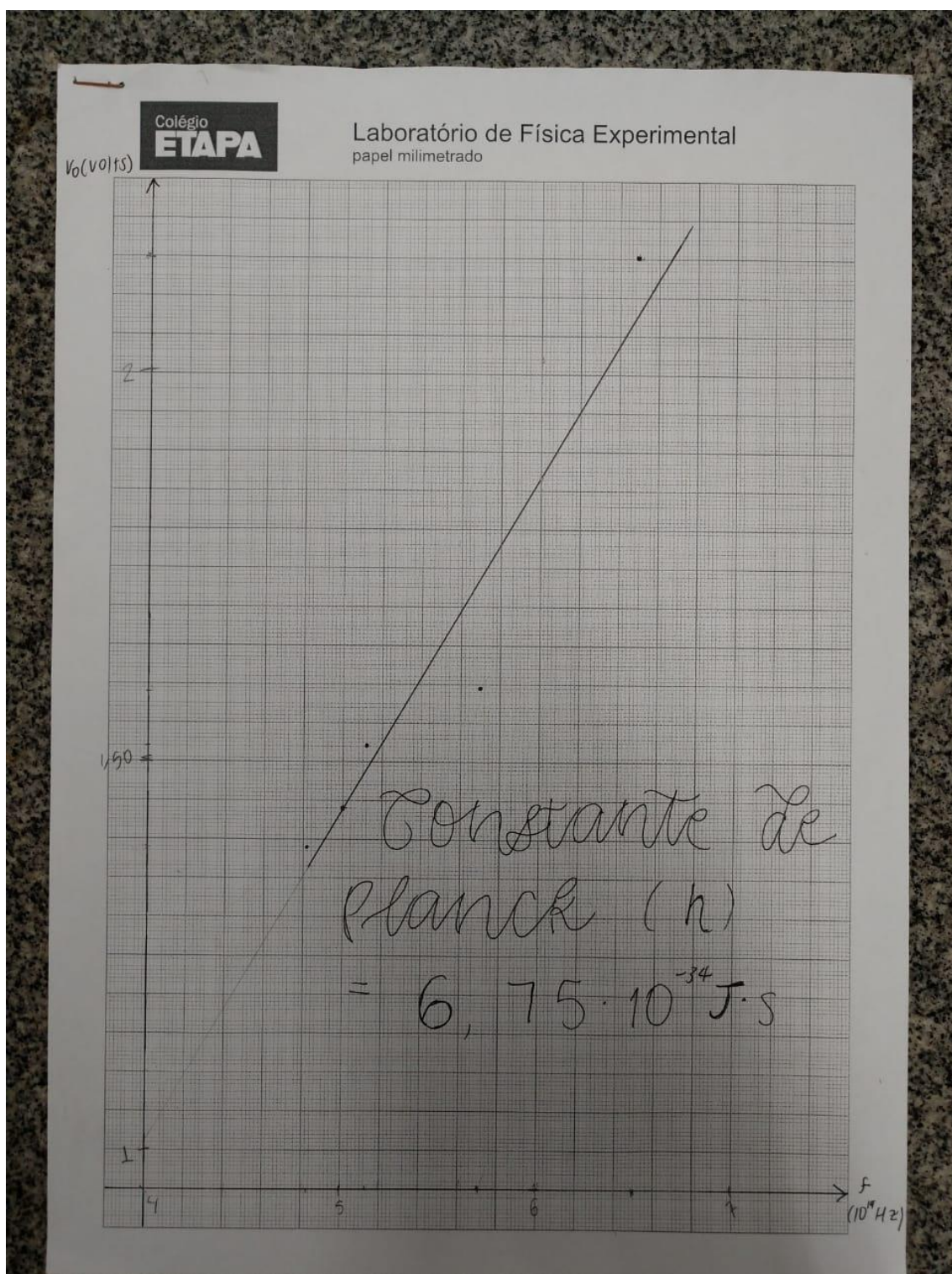


Imagem 5.9.: Gráfico obtido por uma das alunas da foto anterior, com destaque para os pontos experimentais, para a reta média (determinada visualmente) e, finalmente, para o respectivo valor da Constante h de Planck – parte integrante do coeficiente angular da reta ajuste. Acervo pessoal.

Capítulo 6

6. Transformando o Efeito Fotoelétrico em Narrativa

Com o intuito de colocar o aluno no centro do processo de ensino-aprendizagem e, também, de estender a exploração do potencial das estruturas narrativas (agora admitidas como instrumento de avaliação de apreensão de conteúdo), este trabalho, apoiado no referencial de Gurgel, Pietrocola e Watanabe (2017), propõe uma última atividade (dita “Atividade de Fechamento”), na qual os alunos, depois de terem um contato mínimo com o Efeito Fotoelétrico e com as dificuldades que decorriam da aplicação da Física Clássica para o alcance do seu pleno entendimento, apoiar-se-iam nas ideias de quantização já ensinadas para criar narrativas nos mesmos moldes daquelas usadas por Peter Planck para lhes guiar por aventuras no universo quântico.

O roteiro que orienta a execução desta tarefa parte de uma sugestão indireta ao professor: que este se valha do início da aula para, por meio de uma curta apresentação de slides (e, se preferir, de recursos didáticos complementares), introduzir aspectos técnicos referentes ao Efeito Fotoelétrico. No produto educacional que acompanha esta dissertação, anexa-se um exemplo de apresentação que poderia ser útil na condução deste momento.

Depois de apresentar o fenômeno, de discorrer sobre a aplicação da Física Clássica (apresentando os seus acertos e erros) e, finalmente, de inserir a quantização da energia das ondas eletromagnéticas como solução capaz de suplantiar os esquemas teóricos anteriores, reforçando os aspectos por eles já cobertos e, principalmente, “tapando os buracos” que eles não preenchem, passa-se o bastão do protagonismo ao aluno, incentivando-o a criar histórias fictícias (quanto ao enredo, aos personagens, aos ambientes etc.) que sejam capazes de estabelecer paralelos com a Física e que se convertam em mecanismos úteis e apropriados para, por exemplo, explicitar a utilidade da noção de quantização para o fenômeno em questão.

Para orientar o aluno na produção deste trabalho, o roteiro sugere algumas opções textuais possíveis (texto corrido, diálogos, histórias em quadrinhos,

histórias ilustradas, versos sequenciais e rimados) e, por fim, apresenta alguns atores reais existentes neste fenômeno: átomos (e suas respectivas funções trabalho) e ondas eletromagnéticas. Entende-se que, como o Efeito Fotoelétrico envolve a interação entre fótons e elétrons, é importante que o aluno saiba quanto cada elemento químico “exige”, em termos energéticos, para “liberar” o elétron mais fracamente ligado ao seu núcleo. Desta forma, para oferecer ao aluno a liberdade de escolha destes atores, fornecem-se duas tabelas: a primeira, contendo alguns elementos químicos e as suas respectivas funções trabalho; outra, parcialmente preenchida, formada pelos componentes do espectro eletromagnético e as respectivas frequências mínima e máxima (quando existentes) que os definem para que, sabendo o valor da constante de Planck h , pudessem calcular as energias dos fótons correspondentes. A ideia é incentivar o aluno a comparar estes últimos valores com as funções trabalho indicadas na primeira tabela para que, enfim, escolham os melhores personagens para o seu enredo. Vale ressaltar que os alunos, em suas construções, poderiam referir-se aos elementos químicos e os componentes do espectro eletromagnético por meio de suas designações reais ou, se assim preferissem, poderiam escondê-los por trás de nomes alternativos.

Dez alunos participaram desta fase final e entregaram trabalhos primorosos que serão comentados, um a um, nas próximas linhas – respeitando-se a ordem alfabética de identificação usada durante todo o desenvolvimento da Análise Textual Discursiva. Todas as atividades serão disponibilizadas, na íntegra, no Apêndice que acompanha esta dissertação (especificamente, no Anexo J).

- Aluno 1A

O aluno inicia a sua descrição apresentando o seu personagem: John, que diz ser um amigo próximo de Peter. Afirma que dará continuidade ao trabalho de Peter, explicando sobre um assunto importante nas quais a ideia/noção de quantização toma lugar: o Efeito Fotoelétrico.

Sua abordagem, de início, é técnica (ou seja, se vale de termos típicos da Física) e comete alguns deslizes – talvez aceitáveis para um primeiro contato com o fenômeno. A seguir, a transcrição de alguns deles em uma mesma sentença:

“... o Efeito Fotoelétrico consiste em remover os elétrons da camada de valência de uma placa metálica a partir incidência de uma onda eletromagnética sobre ela, claro que isso só irá acontecer se a Energia fornecida pela onda (que varia de onda para onda) for pelo menos igual a Demanda energética pedida pelo elétron (que varia de metal para metal).” (aluno 1A)

Neste trecho, o estudante emprega a expressão “remover os elétrons da camada de valência”. A remoção não precisa, obrigatoriamente, envolver um elétron de valência; elétrons mais internos podem ser ejetados, desde que se ofereça uma energia própria para tal. Ademais, a interação é fundamental: 1 fóton para 1 elétron, fato distorcido quando se fala que a ejeção depende da comparação da função trabalho com a “Energia fornecida pela onda”. Os equívocos podem estar associados a um obstáculo epistemológico verbal ou de experiência básica pois, no contato com termos novos, os alunos tentam vinculá-los a termos antigos ou a imagens concretas que não correspondem, plenamente, ao universo abstrato dos fenômenos quânticos.

Prossegue com a correção de um dos problemas constatados, fazendo, agora, a comparação entre a energia de um fóton e a “demanda do elétron”. Detalhe é que, ao se referir a “demanda do elétron”, o aluno poderia aludir a qualquer elétron no átomo – desde que reconhecesse que elétrons diferentes (ou seja, descritos por um conjunto de diferentes números quânticos) impõem “demandas” distintas. Entretanto, como se perceberá em outra passagem de seu conto, fica clara a associação direta entre “demanda do elétron” e “função trabalho”.

Para trazer a compreensão a termos mais afáveis, surge uma analogia que envolve dinheiro uma “quantia E de dinheiro” e um cofrinho a ser comprado em uma loja. A dita quantia e o preço do cofrinho representam, respectivamente, a energia do fóton e a função trabalho do elemento químico. Da mesma forma que as lojas impõem diferentes preços sobre um mesmo cofrinho, os átomos exigem diferentes quantias energéticas para “liberar” um elétron de valência. Desta forma, levar à loja uma quantia insuficiente de dinheiro significa não ser capaz de “remover” (no sentido de comprar) o cofrinho disponível. De outra forma, com quantias suficientes, compra-se o cofrinho – ou seja, consegue-se a ejeção do elétron de valência. Aliás, quanto maior a diferença entre a quantia disponível e

o preço cobrado pelo cofrinho, maior o conteúdo que nele pode ser depositado. Isto é: o cofrinho (elétron) é comprado (removido da loja) e, adicionalmente, sai com mais conteúdo interno (o dinheiro excedente, que representa aqui a energia cinética do fotoelétron ejetado). A analogia ainda tem o mérito de ressaltar o caráter fundamental da interação (corrigindo, em parte, o problema apontado no início da construção textual), advertindo o leitor “que não faz o menor sentido comprar mais que um cofrinho, pois, se sobrar dinheiro, guardarei no primeiro cofrinho que comprei”.

Estendida a analogia ao seu máximo, encerra com a retomada da parte técnica – dessa vez com viés explicitamente matemático.

- Aluno 1B

Em seu trabalho, o aluno parte de uma pequena contextualização histórica (começa em “meados do século XIX”), demonstrando ter feito uma pequena pesquisa bibliográfica para iniciar o seu trabalho ou que, eventualmente, esteja manifestando um aprendizado adquirido com os contos que antecederam esta atividade final. Apesar de cometer um pequeno deslize ao afirmar que “a Europa ainda sofria com as consequências da Grande Guerra” (uma vez que esta se deu entre 1939 e 1945), a opção por tentar inserir um pano de fundo histórico para o seu trabalho mostra o poder das narrativas em reproduzir um aprendizado amplo e multidisciplinar, pautado pela fusão de interesses que tendem a reproduzir os interesses dos alunos. Atesta em favor de um instrumento de avaliação que, mais do que entregar a suficiente apreensão dos conteúdos trabalhados, explicita um pouco do perfil do aluno envolvido no processo de ensino-aprendizagem por meio de suas predileções e dos saberes acumulados em outras oportunidades ao longo de sua contínua trajetória enquanto sujeito aprendiz.

Seu personagem, Max, é uma clara referência Max Planck, algo confirmado pelo fato de ser “um jovem alemão, 6º filho da família”. Pensa o pequeno Max como um garoto que coleciona e, também, vende pedras para todos os interessados. Em sua leitura, as pedras possuem valores diferentes e as tidas como “mais valiosas” são dispostas mais próximas a Max. Aqui, é clara a intenção em

associar Max a um núcleo atômico e as pedras aos diferentes elétrons na eletrosfera – com diferentes demandas energéticas para se desvencilharem da atração nuclear.

Em primeira análise, o aluno 1B parece associar os primeiros trabalhos com o efeito fotoelétrico ao alemão Max Planck, uma vez que cada pedra (elétron) exige um valor diferente (quantum de energia) para ser comprada (removida da coleção do jovem Max). Ademais, a partir do trecho “vendendo as mais exteriores antes, que apresentam função trabalho menor”, transmite a impressão de que a ejeção de um elétron interno só se dará depois que todos os externos forem extraídos. Tal leitura pode decorrer de uma imagem mal construída ou incompleta do que seria a eletrosfera de um átomo.

Finalmente, ele introduz um novo personagem que seria um “amigo de Max”: Albert. A função deste é a de definir uma escala de valores baseada na cor do objeto que será usado na troca por uma pedra, sendo que os objetos azuis são os mais valiosos e os vermelhos, os menos. Apesar de sugerir a ideia de que os valores crescem com as frequências na região do visível, o aluno 1B não faz nenhuma asserção explícita a respeito. Conclui, apenas, afirmando que, se um objeto mais valioso for entregue para a aquisição de uma pedra de menor valor, o “troco” será retribuído na maior velocidade de entrega da pedra ao novo dono – da mesma forma que, quanto maior a diferença entre a energia do fóton e a demanda energética do elétron a ser extraído, maior a velocidade do fotoelétron ejetado.

- Aluno 1C

Procedendo de forma muito próxima daquela considerada pelo aluno 1B (pelo aspecto monetário que coordena a construção do seu raciocínio, algo já trabalhado no quinto conto desta série – A luz é uma partícula!(?) – e, possivelmente, a fonte de inspiração para ambos e para outros alunos que, eventualmente, se valham desta metáfora), o aluno 1C construiu uma narrativa sem personagens, mas desenrolada em um ambiente muito específico: um mercado não-convencional. Este funciona como se fossem vários átomos com muitas mercadorias à disposição (itens que fornecem a analogia para os elétrons

disponíveis para ejeção). Mas as regras para aquisição dos produtos são diferenciadas – e são elas, justamente, que conferem um caráter alternativo a este mercado.

Na tentativa de ilustrar que nem toda onda eletromagnética é capaz de extrair elétrons de uma amostra de átomos de certo elemento químico, o aluno 1C diz que, da mesma forma que “não é possível comprar na feira de bairro com euro”, não é qualquer dinheiro que compra as mercadorias disponíveis. Um ponto fraco desta sua comparação é que moedas são conversíveis (é possível, por exemplo, ir a uma casa de câmbio, trocar euros por reais e, assim, resolver o problema do feirante), enquanto que as ondas eletromagnéticas – entidades físicas representadas pelo dinheiro no raciocínio do aluno – não são passíveis da mesma propriedade. Supõe-se que o aluno 1C, enquanto típico aluno do 1º EM, ainda não teve a oportunidade de edificar uma bagagem física suficiente que lhe permitisse perceber este detalhe.

Prossegue afirmando que a compra de mercadorias respeita o seguinte padrão: para melhor organização do caixa, são consideradas bolsinhas que, em seu interior, possuem dinheiro de uma cor fixa – sendo que variar a cor significa, portanto, varia o valor da quantia ali inserida. Percebe ainda que, no real brasileiro, a cor está intimamente vinculada ao valor da nota e que, coincidentemente, a nota azul de 100 reais vale mais que uma nota vermelha de 10 reais, como se quisesse associar uma ordem crescente de valores monetários a uma ordem crescente de frequências no espectro visível. Entretanto, é fácil perceber que a nota lilás de 5 reais, quando comparada à vermelha de 10 reais, já constituiria um contraexemplo para esta relação.

Já próximo do final, preocupa-se em descrever o mecanismo de operação do mercado. Diz que, nele, existem mercadorias com diferentes valores (quantias, estas, associadas à função trabalho) e que a compra destas envolve a seguinte dinâmica: “A quantidade de “bolsas” de energia, digo, de dinheiro, varia de mercadoria para mercadoria”, sendo que não há margens para trocos. A compensação oferecida pelo mercado para as eventuais situações de troco consiste na maior agilidade na entrega dos objetos adquiridos. A rapidez na entrega (velocidade dos fotoelétrons) segue a mesma postura daquela já comentada no trabalho do aluno 1B. Como último comentário, porém, fica a não-

atenção ao necessário caráter fundamental da interação: 1 fóton para 1 elétron, algo que não é obedecido a partir do momento que se permite adquirir uma mercadoria (um elétron) com várias “bolsas de energia”.

- Aluno 1E

Com um trabalho muito bem delineado, intitulado “Efeito Fotoelétrico - Robin Hood”, o aluno 1E leva o interlocutor para a Idade Média para contar um pouco da história do herói mítico inglês de um ponto de vista alternativo. Mais uma vez, portanto, nota-se a presença do aspecto histórico e cultural nos trabalhos entregues, o que reforça a percepção das narrativas como ferramentas apropriadas para os alunos vincularem estas novas experiências a fatos e assuntos que lhes despertam atenção e fascínio, abrindo caminho para a inclusão destes novos saberes aos seus respectivos arcabouços de interesses e, finalmente, otimizando o significado da aprendizagem.

Ricardo, rei, fora capturado por forças inimigas durante as Cruzadas e João, o seu irmão, assumiu em seu lugar. Sob o pretexto de pagar o resgate de Ricardo, João instituiu um aumento na cobrança de impostos, mas, verdadeiramente, queria aumentar a riqueza do reino e perpetuar-se no trono. Percebendo a manobra, Robin Hood e seu bando mantiveram-se à espreita na floresta que separa as vilas do castelo para abordar os cobradores de impostos e exigir a entrega de parcela do ouro para, em parte, devolvê-lo à população e, em outra, armazenar quantia suficiente para livrar Ricardo. Só que o processo de captura do ouro seria feito de um jeito minimamente original. E é neste ponto que as comparações são iniciadas.

Os vários baús de ouro carregados são, em seu raciocínio, os elétrons, enquanto que as carruagens que os transportam são os átomos. Os heróis, aqui, não empunhavam armas; eles mesmos eram lançados rumo às carruagens – cumprindo, portanto, com o papel de fótons. Para que um herói lançado fosse bem-sucedido no resgate de um baú (e poderia ser apenas um baú, pois com os seus dois braços não poderia dar conta de algo além deste feito), deveria ter grande energia. Inclusive, quanto maior a sua energia, maior a chance de resgate de um baú e, fosse este o caso, maior a velocidade do baú ao ser retirado

da carruagem. Com esta associação (muito bem descrita em palavras e, adicionalmente, muito bem ilustrada com desenhos caprichosos), nota-se o respeito ao caráter fundamental da interação (1 fóton para 1 elétron), a exigência de uma energia mínima para a extração dos fotoelétrons e, adicionalmente, a interpretação adequada para a energia cinética destes como a diferença entre a energia do fóton e a energia exigida pelo átomo para liberar dado elétron. Enfim, para atentar ao fato de que átomos distintos exigem diferentes esforços para a liberação dos elétrons, considera que as carruagens (átomos) provêm de diferentes lugares do reino, uns mais humildes e outros mais abastados. Por determinação real, as carruagens provenientes de vilas mais ricas deveriam trazer os baús em condições de maior proteção, com uma maior quantidade de cadeados que dificultassem o roubo ou extravio. Encerra a sua história ilustrada com a representação de 4 carruagens provenientes das vilas A, B, C e D e organizadas segundo uma ordem decrescente de arrecadação (isto é, A é a região mais rica; D a mais pobre). Insere diferentes quantidades de cadeados nos baús e conclui que remover um baú proveniente da vila A vai exigir mais energia do que um que chega de D. Escreve $E_A > E_B > E_C > E_D$ e faz um paralelo com as respectivas funções trabalho da platina (*Pt*), do ferro (*Fe*), do alumínio (*Al*) e do cobalto (*Co*), fornecidas no roteiro que orientou a elaboração desta atividade e que, aqui, também estão organizadas em ordem decrescente de valor.

Apesar de alguns pequenos equívocos cometidos durante a construção da proposta, como a sugestão implícita de que um fóton lançaria outro (“João pequeno, com toda a sua força e tamanho, lançará Robin contra a carruagem”) e a representação do átomo planetário (já discutida em atividade anterior), a atividade parece demonstrar a apreensão de vários aspectos importantes do Efeito Fotoelétrico enquanto fenômeno, por meio de uma abordagem extremamente criativa e incrivelmente cuidadosa em sua elaboração.

- Aluno 1F

Colocando-se possivelmente como uma pesquisadora (Isabela) que troca correspondências com os seus pares do meio científico (entre os quais, um amigo seu chamado Henrique), o aluno 1F cria um enredo no qual, depois de escrever a Henrique sobre aspectos do Efeito Fotoelétrico, recebe uma curiosa

resposta do filho deste, César, que, apesar de ter apenas 10 anos de idade, gostaria de entender um pouco mais sobre este fenômeno físico tão peculiar. Dirigindo-se ao pequeno, Isabela cuida de levá-lo para uma cidade fictícia: a grande “Ambrellândia” que, apesar de ser costumeiramente afetada por chuvas, não conhece a existência de guarda-chuvas ou de outros utensílios específicos para a proteção contra as gotas d’água. Toda vez que chove, os habitantes são forçados a correr para os abrigos residenciais, formados por materiais diversos e que, em função disso, oferecem diferentes resistências às gotas de chuva. Nesta cidade tão distinta, o “dano” que uma gota pode oferecer a um abrigo é medido pelo seu tamanho. Ou seja: encontrar um abrigo resistente significa estar protegido por um ambiente capaz de tolerar gotas de grandes tamanhos.

Eis que chove na cidade e as pessoas procuram logo os seus abrigos. Se gotas muito pequenas caem sobre um abrigo muito resistente, nenhum “dano” será causado ao abrigo – independente da quantidade de gotas incidentes com este perfil – e as pessoas, conseqüentemente, ali permanecerão. Do contrário, se o tamanho mínimo necessário para afetar a resistência do abrigo for superado, as pessoas sairão de lá e migrarão imediatamente para as suas casas, garantindo que, neste caso, “quanto maior o tamanho das gotas, mais rápido as pessoas (que se molharam) irão para as suas casas”.

A ideia de Isabela é sugerir a gota como onda eletromagnética e atestar que a quantidade de gotas e o tamanho de cada uma destas representem, nesta ordem, a intensidade e a frequência das ondas incidentes. Além disso, as pessoas abrigadas seriam os elétrons e o abrigo, em si, corresponderia ao átomo. Pela sua história, portanto, cobre-se o fato de que o Efeito Fotoelétrico não ocorre para qualquer onda eletromagnética (há de se respeitar um tamanho mínimo para que a resistência do abrigo seja afetada e as pessoas, conseqüentemente, demovidas de seus lugares; gotas de tamanhos menores que o mínimo não danificam o abrigo – independentemente da intensidade da chuva). Adicionalmente, garante que, uma vez superada a frequência de corte, a velocidade dos elétrons ejetados será tanto maior quanto o for a frequência das ondas incidentes e que a quantidade de elétrons extraídos depende da intensidade das ondas consideradas.

Os aspectos comentados no parágrafo anterior conferem grande mérito ao trabalho do aluno, pois mostram a captação de algumas propriedades interessantes do fenômeno proposto – alguns deles estritamente compreendidos apenas depois da introdução da quantização da energia transportada pela radiação eletromagnética (algo devido a Einstein). É curioso, entretanto, apontar que, em sua comparação, o fóton (ou quantum de energia da radiação) não tem qualquer lugar e não é sequer citado no texto. Acredita-se que o aluno poderia ter admitido a própria gota como representante material do fóton, mas não o fez por eventual falta de familiaridade com o novo termo. Esta seria uma constatação que poderia abrir espaço para obstáculos epistemológicos bachelardianos, tais como a interferência da experiência básica (uma vez que lidar com o termo “onda”, já introduzido no seu repertório de conteúdos, lhe parece muito mais cômodo do que se apoiar em outro conceito mais novo e recente, para o qual ainda não criou sólida estrutura de vinculação).

Finalmente, por mais que o roteiro desta atividade ou os contos anteriores não tenham aludido para a questão de gênero na Ciência, a inserção da mulher no papel de pesquisadora (mérito exclusivo do aluno) abre uma janela importante para a possibilidade de aproveitamento das narrativas para a introdução paralela de discussões e debates sociais relevantes – como já fora feito, aliás, no segundo conto (quando se tentou instigar reflexões acerca da importância social da pesquisa científica), amplificando o alcance do aprendizado que, neste caso, extrapola o sentido técnico concernente ao Efeito Fotoelétrico e suas propriedades e o aspecto epistemológico de como se processa o desenvolvimento científico.

- Aluno 1H

De início, o aluno 1H investe em uma perspectiva mais técnica e, de cara, já introduz o Efeito Fotoelétrico e investe nos conceitos físicos úteis para a sua explicação (“elétron”, “última camada de um metal”, “onda eletromagnética”, “fótons” etc.). Apesar de cometer alguns pequenos equívocos, como o de restringir a ejeção de elétrons apenas àqueles situados na camada de valência e o de se apoiar em falas tais quais “A luz e todas as ondas eletromagnéticas que conhecemos são compostas de fótons” – aparentemente misturando os comportamentos ondulatório e corpuscular dos diferentes componentes do

espectro, suas falas iniciais têm muito mais acertos do que erros e já sugerem uma boa compreensão do fenômeno. As corretas comparações entre as energias dos fótons de radiação nas faixas do infravermelho, do visível e do ultravioleta, por exemplo, colocam-se a favor desta percepção.

Para investir na percepção de outros aspectos interessantes, constrói não propriamente uma narrativa, mas sim um paralelo com interações humanas, especificamente com as tentativas de uma pessoa “alto astral” em levantar a autoestima de um amigo eventualmente triste. A opção por este caminho, muito provavelmente, está relacionada a características pessoais do aluno 1H: reconhecidamente meigo, simpático e acolhedor. Atende, com justeza, o papel da pessoa “alto astral” na condução desta tarefa. Na comparação com o Efeito Fotoelétrico, esta pessoa corresponde ao fóton, cuja energia é tão maior quanto o for a sua animação. Por outro lado, a pessoa a que se pretende ajudar (com “carga emocional” negativa e confinada em um estado de tristeza) retrata a figura do elétron carregado negativamente e, a priori, confinado no átomo. Dependendo de como se dá a interação entre as pessoas, pode ser que a “pessoa alvo” permaneça imersa na sua condição de tristeza ou que, por outro lado, seja conduzida a um estado de plena alegria e contentamento. Complementando o seu raciocínio, afirma: “... em outros momentos quando a energia positiva proveniente de nós ultrapassa o mínimo necessário, nós podemos não só tirar o rosto triste, mas deixá-los animados, agitados (ou para o elétron, com velocidade)”.

Por mais que a maioria das características importantes do Efeito Fotoelétrico sejam abarcadas por essa abordagem humana (o que reforça a compreensão em nível bem interessante para um aluno do 1º EM), a comparação traz algumas limitações. De início, vale ressaltar que a caracterização de uma pessoa com “alto astral” ou não é, em termos práticos, qualitativa e relativa – isto é, não pode ser quantificada e, também, depende do referencial a partir do qual se emite alguma opinião acerca de suas características. Haja vista que tal caracterização é importante para refletir a ideia de energia de fóton (quantificada e absoluta, uma vez especificada a sua frequência), nota-se um pequeno descompasso entre a noção física e a imagem de que se vale para representá-la. Além disso, no âmbito das relações humanas, nada impede que uma pessoa, retirada de

uma condição de tristeza por outra “super alto astral”, seja veículo de alegria para outra pessoa desanimada. Pela analogia sugerida, seria como se este indivíduo, originalmente triste (um elétron), pudesse ser transformado em um fóton capaz de impactar a vida de outro sujeito. Resta a pergunta: o que teria motivado a transformação aparentemente espontânea da “pessoa-elétron” para a “pessoa-fóton”? Esta é uma lacuna a ser preenchida.

Finalmente, o aluno 1H, depois de explorar ao máximo o paralelo construído, retoma o discurso físico e conclui o seu trabalho da seguinte forma:

“Resumindo, se na incidência de uma onda eletromagnética o fóton tiver uma energia maior do que a força trabalho de um elétron, este será liberado com uma velocidade a qual é proporcional à diferença entre a energia fornecida e a função trabalho do elétron; e se for menor, ele [elétron] continuará preso ao metal.” (aluno 1H)

Admite-se que esta fala é passível de ser interpretada à luz de alguns obstáculos epistemológicos, a começar pela comparação entre a energia do fóton e a “força trabalho” do elétron. Como a imagem clássica do processo remete à ideia de remoção/extração de um objeto (um elétron, no caso), o aluno, em seu processo cognitivo, constrói a noção de que uma força se faz necessária e acaba por relacioná-la à energia a ser entregue por outro agente (aqui, um fóton). São termos diferentes para grandezas físicas distintas, o que torna inconsistente a sentença “uma energia maior do que uma força”. Poder-se-ia extrair, daqui, um obstáculo epistemológico específico: o verbalismo, gerado pela apropriação incorreta de um termo com viés científico muito bem definido. Finalmente, a passagem “... com uma velocidade a qual é proporcional à diferença entre a energia fornecida e a função trabalho do elétron” parece incorrer em uma matematização precoce ou em outro verbalismo, uma que vez que, fora do domínio relativístico, espera-se que o quadrado da velocidade seja proporcional à dita diferença. Vale apontar que, no Ensino Básico, é muito comum a confusão entre “grandezas (diretamente) proporcionais” e “grandezas positivamente relacionadas”, noções matematicamente distintas que, normalmente, são tomadas como sinônimas.

- Aluno 11

Recorrendo a uma história em quadrinhos chamada “Elétron valente” (e muito bem construída em seus aspectos textuais e ilustrativos, diga-se de passagem), o aluno 11 nos leva ao chamado “Reino Metálico”, onde os “elétrons valentes”, localizados em sua superfície, são distribuídos para a defesa de todo o território. Por vezes, o reino se vê ameaçado pelos ataques de dragões de luz, dotados de uma propriedade denominada “frequência” e intimamente ligada à cor do próprio dragão (relação que, ainda que não seja explicitamente comentada, respeita a mesma verificada para o espectro eletromagnético na região da luz visível). Em seus ataques, os dragões de luz disparam pequenos pacotinhos de energia denominados fótons. Estes, interagindo com os elétrons valentes, podem ou não comprometer a estrutura defensiva do Reino Metálico.

Depois de experimentar diversos ataques, percebia-se que “dragões de luz de frequências muito baixas não causavam danos. Porém, certos dragões mandavam os elétrons valentes aos ares! Removendo-os do reino metálico”. Prossegue, complementando: “Os elétrons eram removidos de forma a gerar um fluxo ordenada, uma corrente elétrica”. No último quadrinho, deixa a imagem fictícia de lado para, de forma apropriada, trazer particularidades importantes do Efeito Fotoelétrico enquanto fenômeno.

Em suma, a narrativa construída pelo aluno 11 é primorosa no mais amplo dos sentidos: na metáfora escolhida para comparação, na execução do trabalho textual, ilustrativo e de diagramação e, finalmente, na abordagem técnica do fenômeno. Esconde, é verdade, pequeníssimos equívocos, como o fato já comentado (nos trabalhos de outros alunos) de que a interação fotoelétrica só se dá exclusivamente com os elétrons de valência. Mas o saldo da proposta é excepcionalmente positivo!

Como sugestão para projetos futuros, vale apontar que a proposta pode ser ampliada para abranger outros aspectos interessantes do fenômeno, tais como a extensão para dragões que representem outras regiões do espectro eletromagnético além da luz visível, a relação entre as velocidades dos elétrons valentes e as “frequências dos dragões” e a criação de uma estrutura de defesa mais robusta para o Reino Metálico que envolvesse, além dos elétrons valentes,

outras camadas de bloqueio mais difíceis de serem vencidas, mas, ainda assim, passíveis de “rompimento”. Fato é que, postas todas as qualidades que conferem grande mérito ao trabalho, nota-se grande potencial para a sua intensiva exploração – algo que, inclusive, pode convertê-lo em instrumento auxiliar de ensino-aprendizagem deste tema para públicos escolares mais jovens.

- Aluno 1J

Inspirado pelo mesmo espírito que baseou a criação de Peter Planck enquanto personagem, o aluno 1J também recorreu a Peter Pan para trazer à cena a sua atriz principal: Tinker Rogick (uma fusão de Tinker Bell com um dos sobrenomes do autor). É ela a responsável, agora, por guiar o interlocutor pelas nuances do Efeito Fotoelétrico. Começa, a propósito, pela hipótese de Planck para a quantização de energia emitida/absorvida pelos átomos ressonadores. Em seus termos:

“Se fôssemos comparar com algo da minha casa, a Terra do Nunca, é como se, quando usamos pozinho mágico (lembrando que cada cor de saquinho de pozinho mágico tem uma quantidade de pó fixa) só podemos usar uma quantidade de pó múltipla da quantidade que tem em cada saquinho” (aluno 1J).

Desta forma, é clara a preocupação em garantir que saquinhos de cores diferentes (representado quanta vinculado a diferentes regiões do espectro) possuam diferentes quantidades de pozinho mágico (o que, verdadeiramente, indica que o quantum fundamental de energia varia de acordo com a radiação eletromagnética considerada).

Em seguida, propõe que a ejeção de elétrons de um átomo seja comparável à tarefa de fazer uma pessoa voar na Terra do Nunca: da mesma forma que se deve entregar uma energia superior a um mínimo para remover um elétron do seu “confinamento atômico”, fazer uma pessoa voar, nesse mundo encantado, depende de uma quantidade de pozinho mágico também superior a um mínimo (este variando de pessoa para pessoa). Uma vez superado o mínimo, o excesso de pozinho mágico será empregado em fazer com que a pessoa voe mais rápido, do mesmo modo que o elétron, ao ser ejetado, terá a sua energia cinética

(intimamente vinculada à sua velocidade) definida a partir da diferença entre aquilo que lhe foi entregue e a quantia que ele já aproveitou para se “desvencilhar” do átomo. Metáfora simples e extremamente apropriada (principalmente pelo vínculo entre as figuras inspiradoras para os personagens, pela adequação de várias das ideias físicas apresentadas e pelo potencial de exploração), mas que exige algumas correções. É importante “costurar” melhor a relação entre “pessoas” (elétrons) e “saquinhos de pozinho mágico” (quanta) para não corroborar para a construção da imagem da “pessoa acumuladora de pozinho mágico”, pois, pelo texto apresentado, basta que se supere a quantidade mínima exigida pela pessoa e o resultado, então, será a observação do voo – independente da pessoa ter recebido “muitos saquinhos pouco preenchidos com pó” ou “poucos saquinhos preenchidos, cada qual, com muita quantidade de pó”. Aos olhos da Física Clássica, as situações anteriores seriam equivalentes; no referencial da Teoria Quântica, que abrange corretamente todos os matizes do Efeito Fotoelétrico, não. A não percepção deste aspecto pode ser consequência de fatos ou fenômenos cotidianos (algo que, inclusive, pode ser usado para defender eventual obstáculo epistemológico associado à experiência básica): ao adquirir uma torta de morango que me custa 20 reais, é indiferente, para todos os envolvidos no processo de compra, empregar 1 nota de 20 reais ou 10 notas de 2 reais. O resultado será o mesmo: a torta será comprada! No domínio da interação elétron-fóton, o mecanismo é diferente: se um átomo de dado elemento químico possui uma função trabalho de 4 eV , bombardear um elétron de valência deste átomo com 4 ou mais fótons de 1 eV não permitirá a constatação do fenômeno. Esta é a principal precaução que, somada a outros cuidados já manifestos, pode acertar o trabalho apresentado e revelar o potencial que lhe é inerente.

- Aluno 1K

Sem se identificar nominalmente como um personagem (mas atuando, possivelmente, como Peter Planck em mais uma de suas aventuras), o aluno 1K

se coloca na posição de narrador e guia o leitor a partir de histórias do seu tio Alberto, um “entusiasta da Física” capaz de resolver um problema que houvera tirado o sono de vários cientistas mais velhos que ele.

De início, cuida de descrever o Efeito Fotoelétrico enquanto evento, já conhecido pela comunidade científica na segunda metade do século XIX. Nesta primeira parte, tenta mostrar o que a Física Clássica pensava acerca do fenômeno: a ocorrência para qualquer onda eletromagnética (desde que esperado tempo suficiente), os efeitos provocados pelo aumento da intensidade do feixe incidente de radiação (maior energia cinética dos fotoelétrons e maior corrente fotoelétrica) etc. Em seguida, aponta o conflito entre estas expectativas e a execução experimental e “deixa no ar” a necessidade de ajustes para que teoria e prática andem em compasso.

É na resolução deste conflito que o tio Alberto entra em cena. Na leitura do aluno 1K, Alberto teve o mérito de entender que “a luz pode ser interpretada como “pacotinhos de energia” (chamados de fótons), não sendo necessariamente contínua”. Erra, em seguida, ao afirmar o tio Alberto “usou a descoberta de meu pai, Max Planck, sobre as frequências de luz serem “quantizadas” (ou seja, seguem uma quantidade ou valor específico, seguem uma multiplicidade)”. Não são as frequências que são quantizadas, mas sim as energias das radiações eletromagnéticas, todas múltiplas de uma quantidade fundamental: as energias dos respectivos *quanta* (nome original concebido por Einstein para a tal quantidade fundamental, o *quantum*; a denominação “fóton(s)” só se firmou a partir de 1926 com o trabalho do químico norte-americano Gilbert Newton Lewis).

Para comentar melhor a noção de quantização, recorre a uma variante do exemplo monetário já considerado em um dos contos da série “Um conto, um quantum” e, também, adaptado por alguns de seus colegas durante a elaboração desta atividade de fechamento. Porém, obtém, em verdade, maior sucesso em mostrar porque em algumas situações dado elétron é extraído e, em outros casos, não o é. Em suas palavras:

“O que ele [tio Alberto] disse pode ser basicamente explicado com uma analogia a um supermercado: quando alguém vai às compras, quanto mais dinheiro tem, mais coisas consegue “retirar” do

mercado (comprar), mas existe também um valor mínimo para que ela possa retirar alguma coisa: o preço do produto mais barato. Assim, se o produto custa 5 “dinheiros” e você tiver 4 ou 4,5 ou qualquer valor menor que esse mínimo, não consegue levar nada desse mercado, passando reto por ele; mas se vocês tem a partir de 5 “dinheiros”, já consegue levar um produto do mercado e se for o caso, com o dinheiro que sobrar você pode comprar uma cestinha melhor para ajuda-lo carregar mais rápido o que você comprou.”
(aluno 1K)

Note-se que, no trecho em destaque, só se alude às possibilidades de extração ou não do elétron e, eventualmente, o que pode ser feito com o excesso caso se ofereça uma energia maior do que a mínima necessária (entende-se que o “carregar mais rápido o que você comprou”, tenta-se abrir espaço para uma relação com a energia cinética do elétron). Não há, entretanto, menção à quantização da energia e ao caráter fundamental da interação – que sempre envolve a interação de um fóton com um elétron.

Parte, já no final, para a conexão entre o exemplo do supermercado e o Efeito Fotoelétrico, em si. Neste momento, além de carregar vários méritos, comete, infelizmente, outros deslizos. De início, confunde “energia de ligação” com “energia de ionização” (afinal, remover elétrons significa transformar o átomo neutro em íons – especificamente cátions). Posteriormente, estabelece uma conexão direta entre energia cinética dos fotoelétrons com a intensidade da corrente fotoelétrica, afirmando que, obrigatoriamente, que os fatores são positivamente relacionados (ou seja, quanto maior um deles, obrigatoriamente maior também é o outro). É possível, por exemplo, aumentar a intensidade da corrente elétrica pelo simples aumento do número de fótons incidentes – sem alterar a frequência da radiação incidente. Neste caso, mais fótons (com energia superior a um mínimo, claro) significará mais elétrons ejetados, mas a velocidade máxima dos fotoelétrons não será alterada – o mesmo se afirmando, portanto, para a energia cinética máxima estritamente correlata.

Termina de forma graciosa, conversando com o leitor sobre a fama alcançada pelo seu tio Alberto, certamente mais conhecido entre o público pelo seu sobrenome – que o aluno 1K, na figura de narrador-personagem, esqueceu. Em

suas lembranças, suspeita que comece com “E” (o mesmo “E” da sua famosa equação $E = m \cdot c^2$) e que o final lembre algo associado a “pedra” (só não faz menção ao idioma)! Seria... Einstone, pensando no inglês? Einstein, apoiando-se no alemão? Resposta do narrador: “Não sei...”. Pelo visto, será o interlocutor o responsável por solucionar este mistério!

- Aluno 1L

O aluno 1L narra, em 3ª pessoa, a história de um grupo de jovens que “desejavam se tornar estudantes de Física”. Para entrar em boas universidades, deveriam passar no vestibular e entregar um desempenho que fosse igual ou superior ao mínimo estipulado por cada instituição – um valor que, medido na forma de uma quantidade mínima de acertos em uma prova, por exemplo, varia de local para local. E este é o curto paralelo que faz para abordar o Efeito Fotoelétrico, um fenômeno físico que, consistindo na ejeção de elétrons a partir de um metal a partir da incidência de ondas eletromagnéticas, só é possível se uma energia mínima (ou uma frequência mínima – a dita “frequência de corte”) for superada. Na comparação, a “frequência de estudos” dos alunos seria comparada à frequência da onda eletromagnética incidente e a nota de corte faria o papel da “frequência de corte” característica para cada metal alvo (assim como as notas de corte, na visão do aluno, variam entre as diferentes universidades). Qualitativamente, uma comparação interessante que, em primeira vista, é motivada essencialmente pela semelhança dos termos quando comparados dois a dois: “frequência de estudos” e “frequência de ondas”; “nota de corte” e “frequência de corte”. Entretanto, carecem de profundidade, pois enquanto a frequência de uma radiação pode ser comparada a uma frequência de corte (ambos correspondem à mesma grandeza física e, no Sistema Internacional, são medidas em Hz), “frequência de estudos” e “nota de corte” não admitem a mesma comparação, pois são mensuradas em “unidades diferentes”. Vejamos: como comparar “eu estudo, em média, 10 horas por dia” com “a nota de corte para o curso de Medicina (Pinheiros) na FUVEST 2020 foi 78”? Não há como!

Acredita-se que a narrativa poderia ser desenvolvida para abranger aspectos adicionais do Efeito Fotoelétrico, principalmente ao fato de como a introdução da hipótese de quantização da energia “fecha” as lacunas anteriormente existentes e confere completude na plena descrição do fenômeno.

Capítulo 7

7. Conclusões e Considerações Finais

A aplicação da série sequenciada de narrativas “Um conto, um quantum – Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica” forneceu considerável amostra de dados qualitativos que, tratados sob o referencial da Análise Textual Discursiva, referendam várias observações importantes.

De início, vale notar que o estímulo ao pensamento narrativo como forma alternativa (às estruturas lógica-científicas) para norteamento do processo de ensino-aprendizagem de Ciências pode se mostrar extremamente frutífero quanto à qualidade e excelência dos resultados alcançados. A partir das produções acadêmicas retornadas pelos alunos, pôde-se verificar que, em média, a apropriação do conteúdo científico superava, por larga margem, os níveis mínimos aceitáveis e, além disso, refletia, adicionalmente, aspectos substancialmente relevantes, tais como a situação da Ciência em um contexto histórico, os vínculos com as manifestações culturais que lhes despertam encantamento, algumas janelas para a abordagem paralela de temas sociais importantes etc. Apesar de dotadas de um eixo principal muito bem definido, os projetos estruturados em narrativas, além de serem flexíveis em relação à forma, permitem ricas conexões com os cenários culturais próprios dos alunos envolvidos. Neste sentido, acredita-se que a vasta obra de Jerome Bruner concernente à análise e estudo dos esquemas narrativos constitui importante referência para orientar leituras e possibilidades interessantes, capazes de nortear atividades e práticas pedagógicas que invoquem a narrativa como instrumento facilitador e agregador em alguma etapa do processo de ensino-aprendizagem: no início, como introdutor de estímulo; durante, como recurso que prepara o caminho para o advento de construções mentais mais abstratas; no final, como mecanismo de avaliação; paralelamente às estruturas lógico-científicas tradicionais, para, por exemplo, aproximar o conteúdo dos contextos particulares dos alunos com quem se interage etc. Em suma, nota-se que as

representações narrativas carregam consigo múltiplas possibilidades de exploração (definidas de acordo com conteúdo, características do professor, da turma de alunos, dos objetivos atrelados ao processo etc.) e, ao final, tendem a contribuir, independente da forma, com a potencial introdução de ganhos na aprendizagem.

No que diz respeito ao emprego dos obstáculos epistemológicos bachelardianos como dispositivos capazes de orientar ponderações acerca de eventuais desvios ou causas de estagnação e inércia na condução processual dos atos de ensinar/aprender, tem-se, neles, um primeiro referencial endossar interpretações importantes que, por sua vez, podem encaminhar soluções interessantes para as dificuldades constatadas. Parece ser fato, entretanto, que tais obstáculos (enquanto objetos explicitamente classificados em diferentes tipos e manifestações) também não esgotam todas as inferências que podem ser compreendidas depois da constatação de erros durante a interação aluno-professor. Neste sentido, algumas posturas podem ser adotadas: inicialmente, pode ser que a barreira constatada se alinhe à concepção bachelardiana de obstáculo epistemológico, mas que, por um motivo ou outro, não seja passível de ser enquadrada em qualquer dos tipos por ele identificados. Acredita-se que, neste caso, é possível interpretar o equívoco como um legítimo obstáculo epistemológico sem que se preocupe, entretanto, com a sua associação a qualquer das categorias elencadas. Assim, por exemplo, o fazem Pietrocola e Pessanha (2013). Alternativamente, pode-se pensar em estender a classificação original para, por ventura, prover novas categorias e aumentar a possibilidade de “aprisionar” dada dificuldade em uma estrutura reforçada e mais robusta. Um caminho norteador para esta perspectiva pode ser, por exemplo, a noção de *obstáculo didático-epistemológico* de Pietrocola (2010).

De qualquer forma, a epistemologia de Bachelard (explorada além da noção-chave de obstáculo epistemológico) se mostra extremamente adequada para referenciar o ensino-aprendizagem de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC), provendo entendimento para os entraves registrados. Por meio dela, entende-se a ausência de continuidade (a nomeadamente configurada “ruptura epistemológica”) existente entre os esquemas clássico e contemporâneo, identificada, por exemplo nas diferentes “ordens de

aproximação” (conceito bachelardiano) existentes as Ciências que lhes correspondem e o mundo que nos rodeia. Sua obra subsidia uma conclusão importante, capaz de fundamentar, epistemologicamente, as dificuldades que nós, professores, enfrentamos quando nos dispomos a ensinar tópicos de FMC: a de constantemente sermos obrigados a recorrer a conceitos que estimulem uma primeira ordem de aproximação para com o mundo exterior quando, em verdade, a legítima FMC está apoiada em objetos científicos característicos de uma segunda ordem de aproximação. Reconhecer este empecilho pode, ao menos, nos oferecer a chance de levar aos alunos uma FMC mais próxima de sua real estrutura, prevenindo-os das limitações existentes por trás de cada analogia clássica concebida para explicar fenômenos do domínio quântico (como a do átomo planetário, a das órbitas eletrônicas, a das partículas como “bolinhas” etc.) e alertando-os de que a verdadeira essência dos objetos e conceitos deste universo está encapsulada em objetos matemáticos que, por vezes, são extremamente abstratos e intangíveis ao nível escolar correspondente às suas respectivas faixas etárias.

Apresentadas as principais constatações, encerra-se com o seguinte desejo: que estes entraves e que as luzes providas pela Epistemologia de Bachelard acerca destes bloqueios não representem, para o professor, elementos de dissuasão ante à prática pedagógica relacionada à FMC. Que eles, contrariamente, municiem e orientem o docente com cuidados e estratégias adequadas para lhe permitir uma melhor delimitação do alcance das imagens empregadas e, conseqüentemente, lhe ofereçam um caminhar mais seguro por este terreno alagadiço, lamacento e traiçoeiro que, metaforicamente, representa o ensino de tópicos de Física Moderna e Contemporânea. Da mesma forma que a travessia de áreas atoladiças, este “passeio” pode revelar grandes aventuras e ótimas oportunidades de aprendizagem. Em suma: faz-se necessário atravessar o pântano! É preciso aventurar-se! E as narrativas, acredita-se, são instrumentos de enorme potencial para guiar professores e alunos por essa empreitada!

8. Bibliografia

BACHELARD G., *A formação do espírito científico*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996 (1ª edição).

BACHELARD G., *A Epistemologia*. Lisboa: Edições 70, 2006.

BASSALO, J. M. F. *Crônicas da Física*, Tomo 1. Belém: Gráfica e Editora Universitária UFPA, 1987.

BERGÉ, P., POMEAU, Y., DUBOIS-GANCE, M. *Dos ritmos ao caos*. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1996.

BOGDAN, R., BIKLEN, S. K. *Qualitative Research for Education*. Boston, Allyn and Bacon, Inc., 1982.

BORN, M. *Atomic Physics*. New York: Dover Publications, Inc, 1989 (8ª edição).

BRUSH, S. G. *The kind of motion we call heat: a history of the kinetic theory of gases in the 19th century (Book 1, Physics and the Atomists)*. New York: North-Holland Publishing Company, 1976 (a).

BRUSH, S. G. *The kind of motion we call heat: a history of the kinetic theory of gases in the 19th century (Book 2, Statistical Physics and Irreversible Processes)*. New York: North-Holland Publishing Company, 1976 (b).

BRUNER, J. S. *Uma nova teoria de aprendizagem*. Rio de Janeiro: Bloch, 1969 (1ª edição), 1976 (2ª edição).

BRUNER, J. S. *Pourquoi Nous Racontons-nous des Histoires?: Le Récit au fondement de l'aculture et de l'identité individuelle*. Paris: Agora, 2002.

BULCÃO, M. *O racionalismo da Ciência Contemporânea: uma análise da epistemologia de Gaston Bachelard*. São Paulo: Editora Ideias e Letras, 2009.

CHIZZOTTI, A. *Pesquisa qualitativa em ciências humanas e sociais*. Petrópolis: Vozes, 2014.

EINSTEIN, A., INFELD, L. *A evolução da Física*. Rio de Janeiro: Zahar, 2008.

FORATO, T. C. M; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. A.; *Historiografia e Natureza da Ciência na sala de aula. Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, n. 1, p. 27 – 59, 2011.

GODOY, A. S.; *Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. Revista de Administração de Empresas*, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 57-63, Março/Abril de 1995.

GURGEL, I. *Elementos de uma poética da ciência: fundamentos teóricos e implicações para o ensino de ciências*. 2010. 301 p. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

GURGEL, I. *A elaboração de Narrativas em Aulas de Física: A Aprendizagem em Ciências como Manifestação Cultural* – Ivã Gurgel, Graciella Watanabe, Maurício Pietrocola (org). São Paulo: Editora Livraria da Física, 2017 (1ª edição).

LEFRANÇOIS, G. *Theories of human learning: what the old man said*. Estados Unidos: Wadsworth/Thomson Learning, 2000 (4ª edição).

LIMA, M. A. M.; MARINELLI, M.; *A epistemologia de Gaston Bachelard: uma ruptura com as filosofias do imobilismo. Revista de Ciências Humanas*, Florianópolis, v. 45, n. 2, p. 393-406, Outubro de 2011.

MARQUES, J. *CNPq suspende oferta de 4,5 mil bolsas ociosas*. O Estado de São Paulo, São Paulo, 15 ago. 2019. Disponível em: <https://ciencia.estadao.com.br/noticias/geral,cnpq-suspende-oferta-de-4-5-mil-bolsas-ociosas,70002969466>. Acesso em: 09 jan. 2020.

MARTINS, R. A., ROSA, P. S. *História da Teoria Quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie*. São Paulo: Editora da Livraria da Física, 2014.

Measuring Planck's Constant. <https://resources.perimeterinstitute.ca/collections/quantum/products/measuring-plancks-constant?variant=36262297990>. Acesso em: 15 jan. 2020.

MONTEIRO, M. A.; NARDI, R.; BASTOS FILHO, J. B. Dificuldades dos professores em introduzir a Física Moderna no Ensino Médio: a necessidade de superação da racionalidade técnica nos processos formativos. In: NARDI, R. org. *Ensino de ciências e matemática, I: temas sobre a formação de professores*. São Paulo: Editora UNESP; São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009. Páginas 145 – 159.

MORAES, R. Uma tempestade de luz: a compreensão possibilitada pela Análise Textual Discursiva. *Ciência & Educação*, v. 9, n. 2, p. 191 – 211, 2003.

MOREIRA, M. A. *Teorias de aprendizagem*. São Paulo: EPU, 1999.

OLIVEIRA, F. F.; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. *Revista Brasileira de Ensino Física*, v. 29, n. 3, p. 447 – 454, 2007.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Física Contemporânea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 18, n. 3, p. 391 – 404, 2000.

PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F. Sobre o Ensino de Física Moderna e Contemporânea: Uma Revisão da Produção Científica Recente. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 14, n. 3, p. 393 – 420, 2009.

PESSANHA, M.; PIETROCOLA, M. Obstáculos epistemológicos e didáticos no estudo de conceitos de física moderna e contemporânea. *Atas*

do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação e Ciências – IX ENPEC, 2013.

PhET Interactive Simulations. <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/photoelectric>. Acesso em: 15 jan. 2020.

PIETROCOLA, M. *Inovação curricular e gerenciamento de riscos didático-pedagógicos: o ensino de conteúdo de Física Moderna e Contemporânea na escola média*. Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Recuperado de: <http://docplayer.com.br/22288236-Inovacao-curricular-e-gerenciamento-de-riscos-didatico-pedagogicos-o-ensino-de-conteudos-de-fisica-moderna-e-contemporanea-na-escola-media.html>. Acesso em: 14 jan. 2020.

PLANCK, M. *Autobiografia científica e outros ensaios* – César Benjamin (org.). Rio de Janeiro: Contraponto, 2012.

SANCHES, M. B.; NEVES, M. C. D. *A Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio – Uma reflexão didática*. Maringá: Editora UEM, 2011.

SILVA, C. S.; MARTINS, R. A.; A teoria das cores de Newton: um exemplo do uso da História da Ciência em sala de aula. *Ciência e Educação*, v. 9, n. 1, p. 53 – 65, 2003.

SILVA, C. S.; MOURA, B. A.; A natureza da ciência por meio do estudo de episódios históricos: o caso da popularização da óptica newtoniana. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 1, p. 1602.1 – 1602.10, 2008.

STAKE, R. *Qualitative case studies*. In: DENZIN, N. K. & LINCOLN, Y. S. (orgs.). *The sage handbook of qualitative research*. 3ª edição. Thousand Oaks, CA: Sage, p. 443 - 466

STENHOUSE, L. *Case study methods*. In: KEEVES, J. P. *Educational research methodology and measurement*. Oxford, UK: Pegamon, 1988.

SHORE, B. Keeping The Conversation Going: An Interview with Jerome Bruner, *Ethos*, v. 25, n. 1, p. 7 – 62, 1997.

TAKAYA, K. *Jerome Bruner – Developing a Sense of the Possible*. Nova Iorque: Springer, 2013.

TOLEDO PIZA, A. F. R. *Schrödinger e Heisenberg – A Física além do senso comum*. São Paulo: Odysseus Editora, 2003.

TORRES, J. R.; GEHLEN, S. T.; MUENCHEN, C.; GONÇALVES, F. P.; LINDEMANN, R. H.; GONÇALVES, F. J. F. Resignificação curricular: contribuições da Investigação Temática e da Análise Textual Discursiva. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 8, n. 2, 12 fev. 2011.

TRIVIÑOS, A. N. S. *Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação*. São Paulo: Atlas, 1987.

YIN, R. K. & CAMPBELL, D. T. *Case study reasearch: Design and methods*. Thousand Oaks, CA: Sage, 2002.

Capítulo 9

9. Apêndices

9.1. Anexo A – Texto de Introdução

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primórdios da Teoria Quântica

Introdução/Apresentação

Viajar... Ah! Viajar é muito bom, não é mesmo? Desbravar novos lugares, ter a chance de visitar outros já conhecidos (e, quem sabe, olhá-los sob uma perspectiva diferente), viver aventuras, registrar e lembrar momentos e experiências etc. Mas... Nem sempre há tempo ou condições de sair passeando por aí, não é mesmo?! São nesses momentos que “pedimos socorro” à nossa imaginação para viajar sem sair do lugar! Ela, extremamente criativa, está sempre ali, acessível e pronta para nos carregar por diferentes roteiros que, ao final, nos conduzem a terras mágicas, a lugares maravilhosos... A universos jamais explorados pelo homem!

Eu, Peter Planck, quero carregá-lo numa dessas viagens. Ou melhor: por uma viagem que, apesar de não ter nada de mágica, é incrivelmente deslumbrante! “Viagem deslumbrante sem magia? Como pode?” – você me perguntaria. Oras! Podemos aproveitar andanças por um universo cheios de fenômenos fascinantes ao senso comum, mas que, realmente, possuem uma explicação coerente sustentada por uma teoria científica poderosíssima! Para você ter uma ideia do mundo que pretendemos investigar, vamos já começar por um experimento mental. Com a tecnologia presente nos dias atuais (e também com um pouco de treinamento físico, é claro), vou fazer de você um astronauta e vou levá-lo à Lua. Chegando lá, vou pedir que você compartilhe comigo, a partir de

algum meio de comunicação, a sua visão da Terra a partir da superfície lunar. O que você enxerga? Quer, por favor, descrever o que o seu “olhar” diz no espaço abaixo?

Em seguida, quero que você faça a sua viagem de retorno à Terra e me conte quais os resultados de suas observações à medida que vai se aproximando do nosso planeta. Tenho certeza de que novos “itens” vão surgindo à medida que você fica mais pertinho da superfície, não é mesmo? Quais novos objetos você passa a ver à medida que fica mais pertinho do solo terrestre? Divida essa experiência comigo nas linhas a seguir! Por favor! Estou ansioso pelo seu relato!

Ótimo! Vamos, enfim, a uma reflexão mais profunda: já pensou que, se os seus olhos fossem extremamente sensíveis, você deveria experimentar sensação muito parecida quando os aproximasse bastante dessa folha de papel que está lendo nesse momento? Ou, de repente, de qualquer objeto a seu redor? Todo objeto que se coloca ao seu redor (essa folha, a cadeira onde está sentado, o celular que se esconde no seu bolso, o seu próprio corpo etc.) é um universo formado por uma quantidade incrível de porções menores – tal como o universo que você conhece é formado por quantidade enorme de galáxias, estrelas,

planetas, satélites naturais, asteróides e tantos outros corpos celestes. Conhecer essas “porções menores” de forma mais íntima e próxima é a grande aventura da viagem que lhe proponho.

Humm... Algo me veio à mente: talvez você esteja achando estranho viajar com um “quase-completo” desconhecido. “Quase-completo” porque você sabe o meu nome! E só! Para que você se sinta um pouco mais confortável, vou usar algumas linhas para falar a meu respeito. E vou começar por um detalhe que vai lhe surpreender: eu sou um pequeno garoto que se recusa a crescer! E tenho um propósito por trás disso: ter a capacidade de passear tranquilamente por esse universo das “porções menores” que existem por trás de todos os objetos que estão ao nosso redor e, assim, carregar muitos amigos e amigas em viagens fantásticas por esse “mundão minúsculo” que esconde uma série de fenômenos intrigantes e extremamente úteis para entendermos fatos do seu dia-a-dia. “Eita! Quão pequeno você é para dar conta de “passear” por esse universo? Qual o seu tamanho?”. Há uma chance enorme de que esta pergunta tenha lhe ocorrido. Por enquanto, fica uma resposta imprecisa: sou muito, MUITO pequeno! E completo com uma garantia: à medida que as nossas aventuras forem se passando, você vai ter a chance de criar uma ideia melhor e cada vez mais real a respeito. Esteja certo(a) de que, na condição de guia turístico, serei criativo, inventivo e cheio de energia – tal como uma criança. Por outro lado, terei sempre o cuidado de me manter fiel à Ciência que pergunta e que também responde sobre tudo o que acontece no domínio destas partes minúsculas da matéria. Esta é uma lição que me foi ensinada pelo meu pai, Max Planck, um grande cientista alemão que você também terá a chance de conhecer melhor.

Neste momento, fica o convite: vamos juntos? Preparado(a) para embarcar nesta viagem extraordinária? Venha! Tenho certeza de que você não vai se arrepender!

9.2. Anexo B – Primeiro conto: Eu, um universo de átomos! Um átomo no universo!

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Primeiro conto: “Eu, um universo de átomos! Um átomo no universo!”

Sempre que a ideia de uma nova viagem nos surge, é extremamente conveniente buscar informações prévias sobre os lugares a serem visitados para que possamos aproveitar o máximo deles quando estivermos por lá. Por mais que esta nossa proposta seja um tanto quanto “excêntrica” em relação a uma excursão tradicional... Convém fazermos o mesmo! É chegada a hora, então, de traçarmos um roteiro de viagem!

Opa! As semelhanças param por aí! Ou você achou que os roteiros para essa nossa viagem seguiriam a mesma estrutura daqueles convencionais?! Doce engano! Esta, aliás, é uma das grandes lições que aprendi com meu pai. Certa vez, ele me ensinou que, na prática científica, o planejamento da rota é, em geral, feito por muitas pessoas (de forma independente ou respeitando um esquema de colaboração), montado em uma estrutura de perguntas e respostas e ajustado continuamente à medida que a viagem vai ocorrendo!

“Olha lá! Que loucura! Quem já viu? Um guia de viagens repleto de perguntas! Quem quer saber de colocar perguntas num papel onde só deveriam aparecer os lugares, em sequência, a serem visitados dentro do tempo disponível? Que coisa mais... Sem sentido!”. Acredite: eu te entendo perfeitamente! Mas a jornada que eu, **Peter Planck**, quero lhe propor é tal qual a de um cientista. E um cientista, via de regra, desbrava mares nunca antes navegados. Ele(a) sempre tem, diante de si, uma verdadeira caixa preta que esconde os mais profundos mistérios. Definir, com precisão, o que existe no seu interior depende, antes de tudo, da formulação elaborada e minuciosa de questionamentos que, quando devidamente respondidos, trarão luz aos olhos que antes não enxergavam!

Portanto, perguntar, de forma precisa, é decisivo e muito importante para que, em função das respostas, possam ser feitos ajustes regulares na trajetória de pesquisa.

Para melhor explicar essa parte, quero lhe proporcionar, talvez, a mais estranha dentre as aventuras científicas que você já viveu! E vou fazer isso propondo uma experiência que você pode conduzir com um material muito simples: ovos! Numa pequena amostra de ovos, você seria capaz de descobrir quais os que estão crus e quais estão cozidos? Muito importante: SEM QUEBRÁ-LOS! Faz ideia das experiências a serem conduzidas para, além de separá-los, identificar quais são os crus e quais são os cozidos? Que tal expressar as suas sugestões no espaço abaixo?

Talvez as suas propostas, trazidas nas linhas acima, estejam ligadas mais a ações do que a perguntas. Mas, esteja certo: espera-se que tudo o que você escreveu possa ser traduzido para uma sequência de perguntas que, enquanto conjunto, compõe um...

... ROTEIRO (veja só) a ser respeitado! Imagina-se que, entre uma pergunta e outra, você seja capaz de conduzir uma experiência ou um raciocínio teórico estruturado em linguagem matemática para construir uma resposta e passar à pergunta seguinte (ou mesmo modificá-la, caso o questionamento perca sentido depois dos resultados obtidos anteriormente).

Posso, eu, agora, guia-lo por um passeio científico? O plano da vez é refletir sobre a pergunta: “Do que você e todos os objetos a seu redor são feitos?”. Em outros termos: se pegarmos um objeto – um pão, por exemplo – e se tivermos, à nossa disposição, uma faca incrivelmente poderosa (mais afiada que as famosas lâminas orientais e capaz de cortar em partes tudo o que se coloca

diante dela)... Conseguiremos, para cada porção menor obtida, continuar com infinitas divisões? Ou chegaremos a uma parte última da matéria – que não poderá ser mais dividida? Humm... Talvez você queira expressar o seu entendimento! E... Quer saber? Ele é MUITO IMPORTANTE para mim, pois vai me ajudar bastante a te guiar pelos próximos passos. Por isso, refaço a pergunta: do que você acha que somos feitos? Acha que, se invadíssemos o interior desta folha... encontraríamos ou não um “pedacinho” último impossível de ser dividido? Vamos lá! Agora é com você!

Bom... Pode-se dizer que estas reflexões acompanham a humanidade há milênios, desde os tempos da Grécia Antiga – obviamente, com um rigor filosófico mais apurado e sem referências a facas/lâminas orientais afiadas! No século V a.C., já se havia instalado o debate entre os defensores da matéria contínua (aqueles que acreditavam que os corpos poderiam ser divididos sem qualquer limite, *ad infinitum* – entre os quais citamos Parmênides e Zenão) e os apoiadores do descontínuismo (Leucipo e seu discípulo Demócrito sendo os principais), que acreditavam fielmente na ideia de uma divisão com limite que, ao final, atingiria um bloco de partes *indivisíveis* às quais denominaram *átomos* (plural de *átomo*, versão grega para o termo “indivisível”). “E aí? Quem venceu essa disputa?” – você deve estar perguntando. Olha! Nenhum entre os personagens gregos citados viveu tempo suficiente para descobrir, em vida, o lado vitorioso. Quer mais? MUITAS gerações de cientistas brilhantes nasceram, pesquisaram e morreram sem contribuir ou simplesmente testemunhar uma solução para este embate que prevaleceu vivo por quase 2 500 anos. A definição do time vitorioso coube a personalidades que estão muito mais próximas de nós no tempo – gente que atuou nos séculos XIX e XX como o italiano Amedeo Avogadro, o britânico Robert Brown, o alemão Albert Einstein e o francês Jean

Perrin. Os vitoriosos? Sim, os atomistas! Provou-se, a partir do movimento errático de grãos de pólen em água, que átomos (já muito diferentes daqueles pensados por Leucipo e Demócrito, é verdade) são essenciais para explicar esta movimentação incessante e tantos outros fenômenos científicos.

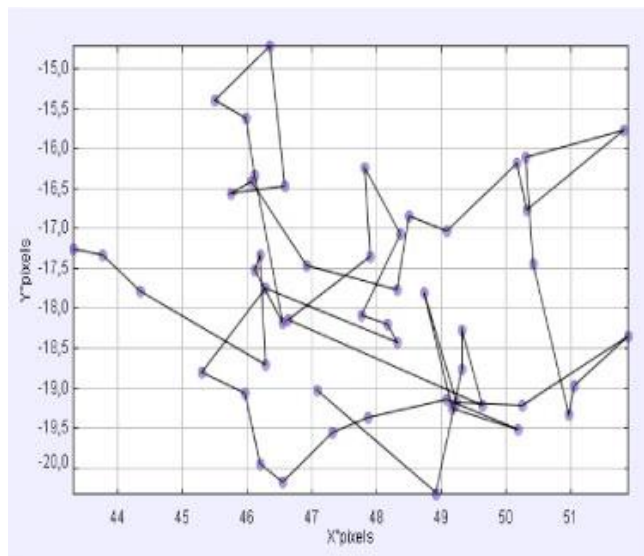


Figura 1: Movimento típico de uma partícula browniana (um grão de pólen, por exemplo) em suspensão na água. Extraído de: “Movimento browniano: uma proposta do uso das novas tecnologias no ensino de física”. (http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172011000400015).

“Humm... O pão do nosso exemplo é composto de átomos?” – você perguntaria. Sim! “Quantos átomos existem num pão francês?” – você insistiria. Da ordem de 10^{24} átomos (ou seja, um número 1 seguido por 24 zeros). “Eita! Se o mesmo vale para nós, seres humanos... A quantidade de átomos que existe no nosso corpo deve ser ainda mais absurda” – você concluiria! Pois é! Está certíssimo! No seu caso, haveria cerca de 10^{27} deles. Será que, diante destes números absurdos, você consegue entender a poesia do título deste conto? Vale ressaltar, aliás, que este título não é criação minha, mas é, sim, obra da mente incrivelmente imaginativa do físico norte-americano Richard P. Feynman (1918 – 1988)! Uma pequena mostra em tamanho, mas gigante em significado de que a vida do físico extrapola, por larga margem, as experiências de laboratório, os cálculos de escritório e o ensino em sala de aula.

Fim da linha para a nossa viagem? Óbvio que não! Ela está só começando! O próximo passo é... INVADIR O PÃO FRANCÊS! Ops! Até parece que estou te convocando para uma revolução, não é mesmo? Aliás, Revolução Francesa, diga-se de passagem! Não! Definitivamente não é isso! Quero, sim, te

acompanhar por uma viagem pelos constituintes básicos do pão, do seu corpo...
Enfim, de todos os objetos que nos rodeiam. Por que? Por que são nesses
corpos minúsculos que as leis quânticas atuam. Entender um pouco de Mecânica
Quântica significa compreender a Física no nível destas parcelas muito
pequenas da matéria. Vamos juntos?

9.3. Anexo C – Segundo conto: Uma conversa entre (á)tomos e a dinâmica do progresso científico

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Segundo conto: “Uma conversa entre (á)tomos e a dinâmica do progresso científico”

No final do conto anterior, comentei com você sobre os átomos que compõem os corpos situados ao nosso redor. Aliás... Que compõem o seu corpo inclusive! Hoje, entretanto, sabemos que estes átomos “não são tão átomos assim”!

Eita! Que conversa maluca, não é mesmo? Mas... Fique tranquilo! Eu te explico! Você, por acaso, se lembra que o termo “átomo” tem uma origem grega que significa “indivisível”? Pois bem! De acordo com o significado do termo, não deveríamos ser capazes de dividi-lo e ele seria, portanto, aquilo que chamamos de “parte mais íntima da matéria”, certo? Bom... É, ao menos, o que a palavra parece sugerir. Mas... Acredita que a Ciência descobriu que existem “tipos de átomos” que podem ser diferenciados justamente...

... pela quantidade de outras partículas nele presentes? É assim que surgem personagens dos quais você já deve ter ouvido falar: prótons, nêutrons e elétrons. São estes novos atores da Teoria Atômica que, aparecendo em diferentes quantidades em átomos, permitem diferenciar um átomo de hidrogênio (H) de outro de oxigênio (O) – aqueles que se juntam para formar a chamada molécula de água, H₂O. Em miúdos: a Ciência foi capaz de mostrar que o átomo pode ser “cortado” (ou melhor, que existem partes menores que ele).

Percebendo que, ao longo do tempo, a própria Ciência se viu diante da necessidade da revisão do conceito de “átomo” (pois pensava, em primeiro momento, que tinha chegado às menores frações da matéria e, anos depois, acabou reconhecendo a existência de entidades ainda menores), você, quase

como um legítimo cientista, se faz alguns questionamentos importantes – extremamente legítimos, aliás. Eu, habitante natural deste “mundo do muito pequeno”, te ajudo com as respostas e, então, estabelecemos o seguinte diálogo:

- E os prótons? Podem ser divididos? – você pergunta.

- Sim – eu respondo.

Um pouco furioso (achando que essa brincadeira não vai acabar mais), você prossegue: E os nêutrons? São formados por “coisas” ainda menores?

- Sim – eu retruco, já temendo que você esteja totalmente desconfiado de mim.

Por uma última vez, realmente bravo pela aparente enganação na qual lhe envolvo, você persiste: podemos dizer o mesmo para os elétrons?

- Não, os elétrons não podem ser divididos em entidades menores – digo, agora, com voz trêmula e temerosa, por vê-lo não só FURIOSO, mas também CONFUSO a partir de agora.

Antes que você desista de mim, peço que se acalme, respire e se acostume com essa realidade. Não, veja bem: não tentarei pregar peças em você de forma constante. Lembre-se que, como lhe disse na introdução dos meus contos, tenho o dever de ser fiel à Ciência! E o serei! Juro! Não só a ela, aliás, mas também à sua história – toda cheia de construções e reconstruções, de avanços e recomeços que nos trazem aqui e que, também, estão prontos para nos levar além. Tenho, inclusive, a impressão de que você, a partir do que vê e aprende em sala de aula, tem uma visão muito particular sobre o desenvolvimento científico. Para aprender um pouco com você, convido-o(a) a escrever um pouco a respeito. Para te ajudar, coloco algumas perguntas para você orientar uma reflexão:

1. Como você acha que a Ciência “é feita”? Por pessoas isoladas? Por grupos de pessoas que se ajudam? Em casa? Nos laboratórios? Em que lugares?

2. Conduzir pesquisas científicas é importante? Por que?

3. Existe uma orientação mais adequada para a pesquisa científica? Ops! Acho que essa depende de uma explicação mais detalhada. E, para isso, utilizarei um exemplo. Você acha que a pesquisa científica:

Bom... Depois destas linhas, acho que tenho bastante material para aprender um pouco com você. Vou encerrar este conto por aqui, pois preciso refletir sobre o que você escreveu. E, também, quero lhe oferecer a chance para refletir sobre tudo que lhe disse até aqui para, assim, garantir que você consiga aceitar a ideia de “átomos divisíveis” (expressão estranha, não?) e de que a Ciência progride a partir de caminhos tortuosos, como em uma montanha-russa que, às vezes, faz curvas bruscas e, em outros momentos, faz movimentos suaves e bem comportados; que, em tempos, avança vagarosamente (como nas subidas) e, em outros instantes, evolui rapidamente (agora, como nas descidas). E mais importante: uma montanha-russa que, em estágios decisivos, se vê obrigada a retroceder, a voltar para rever alguns dos seus conceitos para, aí sim, seguir seu movimento progressivo, sua rota de progresso – exatamente como nos loops! Emocionante, não?! Os próximos contos, aliás, guardam uma relação com esses capítulo-chave que, pela minha metáfora, são representados pelos loops de uma montanha-russa: o nascimento da Teoria Quântica. E sabe quem é o grande personagem por trás desta “nova” história? Humm... Não vou te contar agora, não. A revelação será feita e descrita daqui a alguns contos!

Vamos juntos continuar navegando pelas páginas intrigantes desta história?

9.4. Anexo D – Terceiro conto: A luz é uma onda!(?)

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Terceiro conto: “A luz é uma onda!(?)”

Ei! Psiu! Preparado para retomar a nossa viagem? Opa! Eu espero que sim – afinal, há muita estrada pela frente, há muita coisa a ser aprendida. Mas... Espere! Será que você vai estranhar se eu me propuser a te levar... para trás? Para o passado, digo? Pois é! Neste nosso “roteiro de viagem” (lembra que já conversamos a respeito?), pensar o passado é MUITO importante! Extremamente fundamental para respondermos algumas perguntas.

- Por que surgiu a Teoria Quântica?
- Como ela nasceu?
- Quais são as ideias básicas que a sustentam?
- Qual é o domínio no qual ela se aplica?
- Ela surge como teoria substituta ou complementar àquelas que já existiam anteriormente?

Bom... Chega de questões! Acho que já fui convincente! Está na hora de ligar os motores da nossa “máquina do tempo” – que, aliás, existe e tem nome: IMAGINAÇÃO! Vamos usá-la para passear rapidamente pela Europa da 2ª metade do século XIX (1851 – 1900). 50 anos em poucos parágrafos – uma aventura MUITO mais ousada que a do nosso ex-presidente JK²! Neste período, a nossa Física se apoiava em 3 pilares:

² Juscelino Kubitschek de Oliveira (1902 - 1976) foi presidente do Brasil entre 1956 e 1961. Reconhecido pelos seus programas e ideais desenvolvimentistas, tinha, em seu governo, a clara proposta de conduzir o país através de sólido e rápido crescimento econômico. “50 anos em 5” era o lema pelo qual ficou famoso o seu “Plano de Metas” de caráter progressista.

- a Mecânica Clássica, sustentada pelas famosas “Leis de Newton” e por uma série de conceitos obtidos a partir de noções elementares.
- a Termodinâmica, a parte da Física responsável por lidar com a “Teoria do Calor” e por abranger toda o conjunto de fenômenos térmicos (para os quais a temperatura, enquanto grandeza, desempenha papel importante).
- o Eletromagnetismo Clássico, área onde se insere tudo o que está relacionado a fenômenos elétricos e magnéticos.

Naquela época, acreditava-se fortemente na ideia de que a Física, enquanto Ciência ancorada na Mecânica, na Termodinâmica e no Eletromagnetismo, estava “resolvida”. “Consolidada”, alguns diriam. A partir daquele momento, o papel do físico, segundo alguns importantes cientistas, seria o de trabalhar no aprimoramento tecnológico derivado desta Ciência já pronta e feita. Seria o de refinar técnicas que permitissem a execução de experimentos mais e mais precisos. Poderiam surgir novos fenômenos até então não problematizados? Claro! Claro que sim! Mas, conforme a crença da época, se este fosse o caso, as soluções para estes eventuais fenômenos estariam em uma Física já construída e inquestionável.

Ah! Doce ilusão, viu?! E quem trouxe esta ilusão à tona foi o problema chamado “A Radiação Térmica dos Corpos Aquecidos”. Que tal gastarmos as próximas linhas para descrevê-lo um pouco melhor?

Atire uma pedra de carvão para churrasco ao fogo. O que você vê?

Esquente uma peça metálica com a ajuda de um maçarico para amolece-la e forjá-la segundo uma forma que te interesse. O que acontece com o aspecto do metal enquanto é aquecido?

Observe uma estrela. Por que você acha que algumas delas parecem mais avermelhadas e outras mais azuladas?

Coloque-se diante uma lâmpada de filamento de tungstênio. Ops! Talvez você não a conheça. Por isso, compartilho com você, logo ao lado, uma pequena representação desta lâmpada. Como a comercialização destas lâmpadas aqui no Brasil foi completamente proibida desde 2017... É possível que ela esteja



Figura 1: Lâmpada de filamento de tungstênio aquecido.

fora do seu contexto próximo. Mas, ainda assim, vamos deixar uma pergunta relacionada ao seu funcionamento: o que nela se faz responsável pela produção da luz como resultado?

Situações diferentes, respostas equivalentes. Todos os corpos que se encontram à temperatura $T > 0 K$ (*kelvin*)³ irradiam. E, quando aquecidos... Irradiam mais ainda!

Epa! EPA! Devagar, devagar! Afinal, os primeiros termos técnicos estão surgindo. “Irradiar”, aqui, significa enviar/emitir algo. “Você irradia alegria para todos a seu redor!” é, por exemplo, uma frase que, apesar de envolver outro contexto, traz a mesma ideia “do envio/da emissão” da qual a Ciência se apropria. No caso científico, entretanto, o que se irradia são...

... ONDAS ELETROMAGNÉTICAS!

Estas ondas são as responsáveis pelas telecomunicações, pelos sinais 4G captados pelo celular, pelo sinais de WiFi presentes em diversos lugares, pelo transporte das informações que chegam à sua televisão, pelas ondas de rádio que te permitem sintonizar a sua rádio favorita, pelas micro-ondas que esquentam a sua comida de forma prática, pelos raios-X tão importantes no diagnóstico de doenças etc. Deu pra ter uma ideia da importância destas ondas? Pois... Sente na cadeira e prepare-se para o mais importante exemplo: são graças a ondas eletromagnéticas que... VOCÊ ENXERGA! Sim! A luz é uma onda eletromagnética!

Todas essas ondas “passeiam” pelo espaço vazio a uma incrível velocidade. A maior entre aquelas que podem ser fisicamente registradas: 299 792 458 *metros/segundo* (valor que é comumente aproximado para 300 000 000 *metros/segundo*). Tão grande que, sem embarcássemos numa viagem a bordo de um feixe de luz, seríamos capazes de descrever 7,5 voltas no Equador terrestre em apenas 1 SEGUNDO! UAU! Incrível, não?

³ “kelvin” (representação: *K*) corresponde a uma unidade de temperatura dita “absoluta”, uma vez que os valores de temperatura expressos nesta escala são todos positivos. Uma vez que a temperatura guarda relação com o grau médio de agitação das partículas (átomos e/ou moléculas) que compõem um corpo, o 0 *K* (zero kelvin) corresponde à temperatura associada ao estado teórico no qual estas partículas estariam completamente “paradas”, sem agitação (esta temperatura seria próxima de $-273,15^{\circ}\text{C}$). Dada uma temperatura *C* em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$), diz-se que a sua correspondente temperatura *T* em kelvin é dada por: $T = C + 273,15$.

Se todas as ondas eletromagnéticas têm na velocidade de propagação pelo espaço vazio um item comum... Elas também mantêm algumas diferenças entre si. Entre tantas, começaremos por duas delas: comprimento de onda (representado pela letra grega λ – lê-se “lambda”) e frequência (f). Considerando esta onda como um “vai-e-vem” que se repete, cheios de picos (pontos de máximo) e vales (pontos de mínimo) que se alternam, entende-se o comprimento de onda λ como a distância entre dois picos consecutivos (ou entre dois vales seguidos). A frequência f , por outro lado, corresponde à quantidade de ciclos realizados/descritos em cada segundo, em cada minuto... Enfim... Em cada unidade de tempo! Por exemplo, falas do tipo “eu vou à escola 5 vezes à cada semana” ou “eu pedalo por 4 vezes no mês” representam informações de frequência. Nas ondas eletromagnéticas (assim como em qualquer outra onda), a comparação entre as frequências de duas ou mais ondas que mantêm as mesmas velocidades pode ser feita a partir da quantidade de picos (ou vales) presentes ao longo de uma distância ou de um intervalo de tempo escolhido: quanto mais picos/vales, maior a frequência da onda!

A figura abaixo ilustra duas ondas 1 e 2 que possuem a mesma velocidade de propagação – e que, desta forma, percorrem as mesmas distâncias à medida que o tempo avança. Apesar das velocidades serem as mesmas (por hipótese) existem algumas diferenças. Humm... Será que você concorda com os comentários que a seguem?

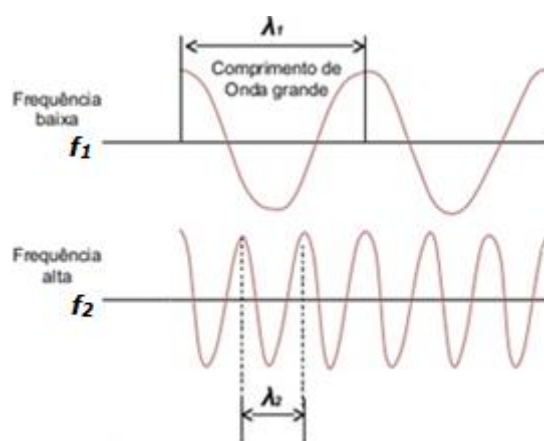


Figura 2: Comprimento de onda (λ) e frequência (f) em ondas periódicas.

- A distância entre picos seguidos é maior na onda 1 do que na 2. Desta forma, temos: $\lambda_1 > \lambda_2$.

- Entre os extremos esquerdo e direito dos perfis ondulatórios traçados, é possível perceber uma quantidade menor de picos na onda 1 do que na 2. Sendo assim, concluímos: $f_1 < f_2$.

E aí? Notou?! Acho que sim, né?! Quanto maior o comprimento de onda λ , menor a frequência f . E são estas propriedades que utilizamos para separar em diferentes tipos as ondas eletromagnéticas conhecidas (a luz visível, as micro-ondas, as ondas de rádio, os raios X já citados nos exemplos de aplicação). A classificação, aliás, nos leva ao seguinte quadro:

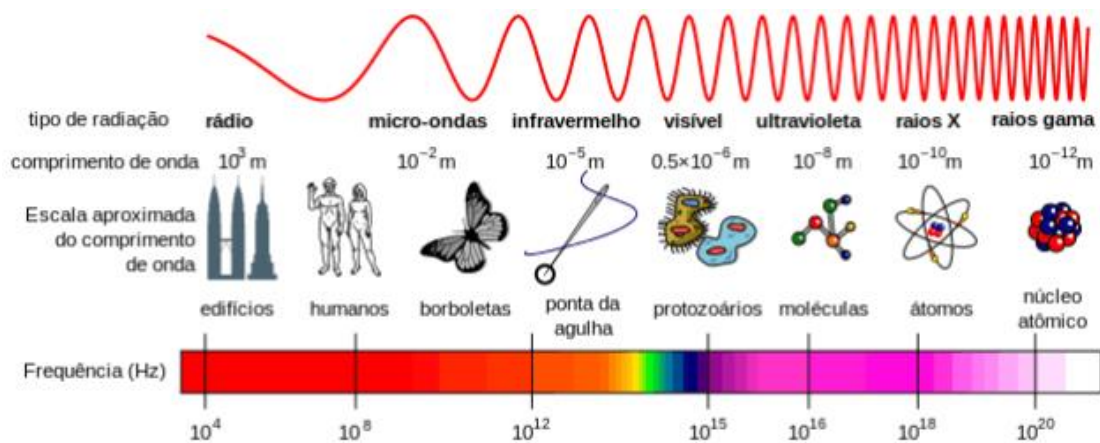


Figura 3: Diferentes tipos de ondas eletromagnéticas e as correspondentes ordens dos valores de seus comprimentos de onda (λ) e frequências (f).

Reforçando: é muito importante perceber que, à medida que passamos na figura acima desde as ondas de rádio e micro-ondas até os raios X e raios gama, o comprimento de onda diminui e, como “compensação” a frequência aumenta. Desta forma, comprimento de onda e frequência servem para identificar tipos de ondas eletromagnéticas. São úteis para diferenciar, por exemplo, uma onda de rádio de uma luz visível.

E aí? Tubo bem até aqui? ÓTIMO! Porque o próximo passo é voltar aos corpos aquecidos que discutimos há pouco. E sabe quando iremos fazer isso? Não, não é agora! Vamos deixar isso para um próximo capítulo. “Segure um pouco a sua onda!” Em breve, você descobrirá coisas fascinantes sobre o comportamento da luz e de outras “ondas eletromagnéticas”! Até a próxima, meu (minha) amigo(a) viajante!

9.5. Anexo E – Quarto conto: Crise sombria projetada pela luz de uma lâmpada

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Quarto conto: “Crise sombria projetada pela luz de uma lâmpada”

No conto anterior, aprendemos, juntos, algumas coisas importantes sobre “irradiação”. O termo tem, sim, uma aparência meio assustadora (se você assistiu a série “Chernobyl”... tem uma breve ideia do que quero dizer, não é mesmo?!). Existe, sim, uma relação científica entre “irradiar” e “radioatividade”. E este “link”, inclusive, envolve um pouco do nosso contexto que, anteriormente, abriu caminho para as chamadas “ondas eletromagnéticas”. O “irradiar” está associado à emissão de ondas eletromagnéticas por um corpo aquecido. Melhor ainda: por um corpo que esteja a qualquer temperatura acima do zero absoluto. Fato é que, quando maior for a temperatura do corpo emissor... maior a quantidade dessas ondas emitidas por ele a cada segundo que se passa.

Algumas das ondas eletromagnéticas citadas (principalmente os raios X e os raios gama) surgem a partir de processos radioativos. Mas... Não é essa a discussão que queremos colocar aqui. Para ela podemos, quem sabe, reservar uma OUTRA série de contos. Quero, por outro lado, trazer à tona uma outra verdade intrigante: neste momento, você e todos os corpos a seu redor estão emitindo ondas eletromagnéticas para o espaço. Não consegue vê-las, não é mesmo (e por isso, talvez, duvide, inicialmente da minha fala)?! Perfeito! Você está atuando de forma próxima a de um cientista genuíno! Legítimo! Desconfiar é sempre o primeiro passo na orientação dos questionamentos que, se bem feitos, levarão às respostas necessárias à compreensão de fenômenos científicos.

Você não vê pois, de todo o conjunto de ondas eletromagnéticas, só uma fração pequeníssima pode sensibilizar o seu olho: a luz visível. Boa parte daquilo que você emite está na faixa do infravermelho – nas chamadas “ondas de calor”. Para melhor lidar com ela, faço-lhe uma proposta: reúna um conjunto de amigos para, juntos, enfrentarem um metrô lotado por um tempo razoável. Por mais que você permaneça sempre no mesmo lugar, sem fazer nada além de respirar, vai passar por um desconforto térmico enorme, pois seu corpo está absorvendo aquilo que todos ao seu redor estão emitindo na forma de ondas no infravermelho. Ou seja: pode não ver, mas certamente pode sentir as ondas eletromagnéticas emitidas por todos aqueles a seu redor!

Os físicos da segunda metade do século XIX sabiam que, quanto maior a temperatura (em kelvin) de um corpo, maior a QUANTIDADE TOTAL de ondas eletromagnéticas emitidas por unidade de tempo (mais uma vez: a cada segundo, minuto etc.). Foi, então, que eles resolveram se perguntar: e se quisermos definir experimentalmente e prever teoricamente (ou seja, por cálculos matemáticos), as quantidades emitidas para cada tipo de onda eletromagnética? Isto é: dada a temperatura T de um corpo...

... seria possível definir o quanto ele emite na faixa das ondas de rádio? Das micro-ondas? Da luz visível? Do infravermelho? Do ultravioleta? Fazendo uma analogia com dinheiro: sabendo a sua condição financeira, os físicos do final do século XIX sabiam definir, com boa precisão, o total de dinheiro que você carrega na carteira. O próximo passo, mais audacioso, seria definir como se distribui esse total em moedas de 1, 5, 10, 25 e 50 centavos de real, moedas de 1 real e, enfim, notas de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 reais. E foi neste ponto em que a crise se instalou! Não, não me refiro à crise financeira (até porque, com essa, eu e você já estamos acostumados, né?!). Menciono, sim, a crise na Física Clássica.

A seguir, à esquerda, vemos algumas curvas de emissão para corpos em diferentes temperaturas (em kelvins). No eixo horizontal, nota-se o comprimento de onda – que define o TIPO de onda eletromagnética que é emitida. No eixo vertical, coloca-se a intensidade – que expressa a QUANTIDADE emitida de dada onda eletromagnética. À direita, tem-se um zoom para um objeto cuja temperatura é $3\,000\text{ K}$ (cerca de $2\,727^\circ\text{C}$), algo que, na realidade, corresponde muito bem àquelas lâmpadas de filamento de tungstênio que já não são mais

vendidas aqui no Brasil. Quer, aliás, saber o motivo por trás dessa proibição?!
Opa! Vem comigo!

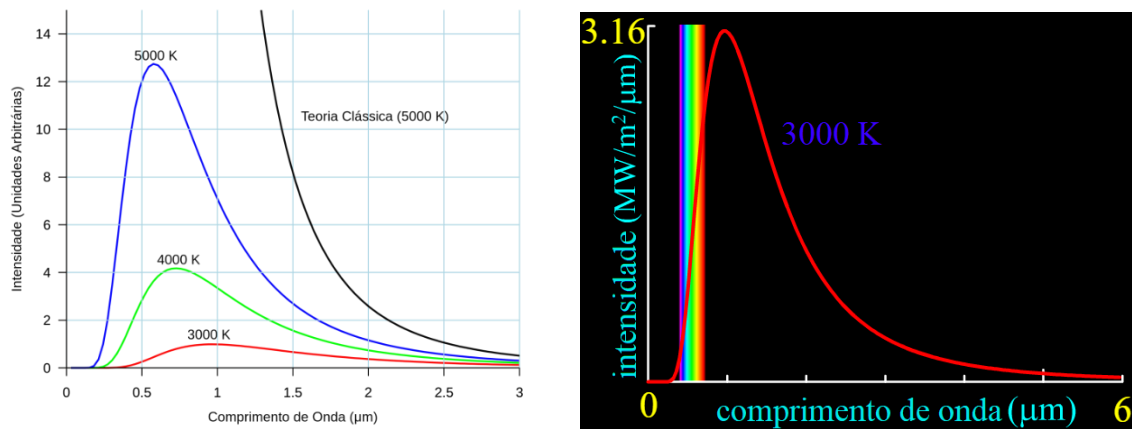


Figura 1: Curvas de emissão para corpos a diferentes temperaturas (esquerda). À direita, zoom na curva de emissão de uma lâmpada incandescente (de filamento de tungstênio), cuja temperatura é próxima de 3 000 K.

Na curva da direita – lâmpada a 3 000 K de temperatura – é possível definir uma figura geométrica entre a curva vermelha e o eixo horizontal (onde surgem os comprimentos de onda). Essa região tem a forma de uma montanha, com um pico muito bem definido. Como ela corresponde a uma figura “fechada”, pode-se definir uma área para ela. E esta área tem um significado muito importante pra gente: ela representa o quanto de energia a lâmpada emite a cada segundo que se passa!

Tudo certo? Agora, um detalhe importante: se você observar com carinho, vai perceber que uma fração MUITO PEQUENA dessa área embaixo da curva vermelha está pintada com as 7 cores do arco-íris. Achou? Sabe o que representa a área dessa pequena porção colorida? Exatamente! A energia luminosa (ou seja, na forma de luz) que aquela lâmpada emite, a cada segundo, para o espaço onde é colocada. Muito pequena quando comparada ao todo do parágrafo anterior, não é não?! Pois é! Isso significa que, com aquelas lâmpadas, você paga por MUITA ENERGIA e, como retorno, obtém uma fração PEQUENÍSSIMA de luz para iluminar qualquer ambiente! Um completo incentivo ao desperdício de energia e, conseqüentemente, um grande estímulo ao gasto abusivo de dinheiro (afinal, você paga por toda energia que a lâmpada emite – e não só por aquilo que ela está emitindo na forma de luz). É neste sentido que

tecnologias mais econômicas estão chegando para ficar. Os LED's, aliás, correspondem ao “exemplo do momento”!

Para encerrar, vamos voltar ao gráfico da esquerda? Tudo porque é ele quem vai trazer a grande cereja deste conto! Analisando-o, vai perceber a existência de 4 curvas sendo que duas delas estão associadas à mesma temperatura de 5 000 K. Por que, hein?! O que significa isso? Uma, a azul, é obtida com dados experimentais, coletados diretamente em laboratório; a outra, negra, corresponde ao que a Teoria Clássica previa para um corpo naquela temperatura. Ou seja: se você “junta” as leis da Mecânica, da Termodinâmica e do Eletromagnetismo clássicos e desenvolve um trabalho matemático que relacione, graficamente, intensidade e comprimento de onda... Você obtém, como resultado, a curva preta “Teoria Clássica (5 000 K)”. Curva que, convenhamos... NÃO TEM NADA DE PARECIDO COM A CURVA AZUL ESPERADA! Sabe o que isso indica?! SABE?!

QUE A FÍSICA CLÁSSICA NÃO SE MOSTRA ADEQUADA PARA EXPLICAR ESTE FENÔMENO! Tudo porque teoria e experiência não se ajustam! A enorme diferença entre estas curvas (que poderia ser registrada para qualquer temperatura – e não só nos 5 000 K) é que responde pela crise instalada (e já comentada) na Física do fim do século XIX. Para superá-la, ideias novas precisaram ser lançadas. E são justamente essas ideias as que abrem caminho para a Teoria Quântica a que tanto nos referimos! O responsável por trazer estes novos conceitos? O físico alemão Max Ernst Karl Ludwig Planck – conhecido na comunidade científica simplesmente como Max Planck e a quem já me referi no conto de introdução (como meu pai, você lembra?). É neste momento que você fica bem pertinho de conhecer um pouco mais sobre Mecânica Quântica e, de brinde, mais próximo de resolver um mistério que há muito plantei em você: QUEM SOU EU?

Cenas para um próximo capítulo! Até lá!

9.6. Anexo F – Quinto conto: A luz é uma partícula!(?)

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Quinto conto: “A luz é uma partícula!(?)”

Eis que chegamos a um ponto crucial de nossa viagem: a busca pela solução em tempos de crise. Conforme vimos no conto anterior, a chamada “Física Clássica” não se ajustava aos dados experimentais coletados para o problema. E mais: previa a emissão de ondas eletromagnéticas de pequenos comprimentos de onda (λ) com intensidades... INFINITAS (ou seja, em quantidades INCRIVELMENTE grandes em cada segundo de tempo).

Diante desta situação, diríamos desesperados: “E agora? Quem poderá nos defender?”. Não esperemos a chegada do Chapolin Colorado! Vamos, sim, analisar a situação com cuidado. Uma visão inicial talvez sugira que TODA a Física Clássica construída por gerações e gerações de cientistas precise ser apagada e reconstruída do zero. De acordo com esse jeito de olhar o problema, ou temos uma construção científica (a nossa “Física”) estruturada em leis fundamentais e universais dos quais são deduzidos resultados que explicam tudo o que nos cerca ou... Não temos nada! Entretanto, se olharmos para o passado e considerarmos a correta adequação da Mecânica, da Termodinâmica e do Eletromagnetismo clássicos a inúmeros fenômenos físicos e as consequentes contribuições sociais e econômicas que este conjunto clássico nos trouxe, seremos levados a uma postura um pouco mais prudente e diremos: o ponto, aqui, não é jogar toda a Física já construída no lixo! Definitivamente não! A atitude mais honesta é reconhecer que ela tem uma “região de aplicação”, um “domínio de validade”.

Epa! Hora de parar um pouco, pois acho que os termos estão ficando difíceis. “Região de aplicação? Domínio de validade? Não entendi “bulhufas” do que foi dito!”. É o que se passa na sua cabeça agora, não é? Tudo bem! Totalmente

aceitável! E é por isso que eu tenho uma proposta bem simples para você. Olhe para o seu redor e me diga:

- Qual a porcentagem dos seus amigos que, neste momento, carrega um celular consigo?

- Qual a porcentagem dos seus amigos que, agora, estão usando um par de tênis ou de qualquer outro calçado fechado?

- Qual a cor da lousa da sua sala?

- Pelo que você conhece da sua escola: qual(is) a(s) cor(es) das lousas das salas de aula vizinhas à sua (aquelas situadas no mesmo andar, por exemplo).

Veja! Eu não sei a realidade na qual você vive, mas posso imaginar que uma das respostas abaixo tenha surgido a partir da observação do SEU conjunto universo (seu conjunto de amigos e de lousas da sua escola).

- 100% dos meus amigos tem, neste momento, um celular consigo.

Ou seja: TODOS os alunos têm aparelhos celulares.

- 100% dos meus amigos usa, agora, um calçado fechado.

Ou seja: TODOS os alunos usam calçados fechados.

- TODAS as lousas são _____ (verdes, negras, brancas, azuis... Outra cor? Qual?)

Mas... Você acha que qualquer dessas respostas pode ser EXTRAPOLADA para todas as escolas do Brasil? Dificilmente, não é mesmo?! É exatamente neste ponto que eu gostaria de chegar: as falas acima (qualquer delas) não são completamente descartáveis. Elas são válidas, mas dentro de certo contexto. Este contexto é o “domínio de validade” a que me referi mais cedo.

Na prática científica, esses domínios também existem, com a diferença de serem, é verdade, MUITO MAIS AMPLOS. Senão... Seria uma bagunça! “Esta Ciência é válida apenas na minha escola!”! “Opa! Esta Física só vale aqui dentro do meu país!”. Não são estas fronteiras que estabelecem os limites de aplicação da Física Clássica. A questão está, sim, nas escalas de tamanho envolvidas. E quando chegamos no “mundo do muito pequeno”, dos objetos de dimensões atômicas... Humm... Algumas coisas precisam ser revistas.

O primeiro a revê-las foi o físico alemão Max Planck – como já antecipado no conto anterior. Ele foi o primeiro a abordar o fenômeno da Radiação dos Corpos Aquecidos a partir do ponto de vista atômico, afirmando que o conjunto emitido de ondas eletromagnéticas tinha origem na oscilação das cargas elétricas presentes nos muitos átomos que formam qualquer corpo. Em termos mais simples: dada uma temperatura, os muitos átomos que compõem qualquer corpo se encontram em um grau médio de agitação, movimentando-se para lá e para cá com certa frequência (f) – tal como uma bolinha presa a uma mola elástica. “Oscilar” é o termo que usamos na Física para descrever esse movimento. Bem... Existem portadores de cargas elétricas (prótons e elétrons) dentro destas bolinhas que representam os nossos átomos e estas partículas, quando oscilam, geram ondas eletromagnéticas como resultado – um fato que já era conhecido a partir da Física Clássica, inclusive. Então... “Onde está a novidade?” – você me perguntaria. Ótimo! Chegamos ao ponto chave!

Quando aumentamos a temperatura do corpo, esse movimento de oscilação, em média, se torna mais frenético e incessante. A frequência de oscilação dos átomos (e dos portadores de carga no seu interior) aumenta. A energia de oscilação dos átomos aumenta. MAS... “Aumenta, sim, mas não está autorizada a assumir qualquer valor!” – diria o meu pai, Max Planck. Para ele, oferecer uma solução para o problema da Radiação dos Corpos Aquecidos só seria possível se assumíssemos que...

... as energias de oscilação dos átomos que formam o corpo fossem quantizadas!

Quantizar a energia de oscilação dos átomos significa garantir que ela **NÃO PODE** assumir qualquer valor, mas apenas **múltiplos inteiros de uma quantidade fundamental** – chamada, neste caso, de **quantum de energia**. Isto é, a energia de oscilação de cada átomo em um corpo a certa temperatura T só pode ser uma, duas, três, quatro, ..., dez, ..., cem, ... Enfim, um número inteiro de vezes maior que uma quantidade mínima. Este fato abre margem para algo incrivelmente novo e corresponde ao “start” para as ditas “Mecânica Quântica”, “Física Quântica”, “Teoria Quântica” e afins... Em resumo: uma estrutura montada em cima de grandezas físicas quantizadas, às quais se pode associar um quantum fundamental.

Para entender melhor o conceito de “energia quantizada”, vamos partir para uma analogia bacana: vamos substituir “trocas energéticas” por “trocas monetárias”. Sim! Quando você, por exemplo, compra dado objeto, você, na verdade, troca certa quantidade de dinheiro pela posse do bem em questão. Vamos investigar melhor estas trocas? Ao comprar uma bala na doceria, pago 10 centavos de real; em um dia muito quente na maravilhosa João Pessoa, preciso pagar 2,00 reais (ou seja, 200 centavos de real) para poder tomar uma deliciosa água de coco; quando me disponho a comer um saboroso pastel de queijo, deixo na barraquinha a quantia de 4,00 reais (igual a 400 centavos de real) para matar a minha vontade; em uma noite de confraternização familiar, compramos aquela pizza toscana sensacional por 31,99 reais (valor equivalente a 3 199 centavos de real). O que eu quero com estes exemplos? Não, definitivamente não quero abrir o seu apetite! Quero, sim, mostrar que todos os processos de compra envolvem **quantidades inteiras positivas de centavos de real!** Afinal, 10, 200, 400 e 3 199 são números inteiros positivos, não é mesmo? De modo alternativo, poderíamos afirmar: é impossível, nestes processos, considerar trocas financeiras que envolvam $1,5$, $\sqrt{5}$, π etc. em centavos de real. O “**um centavo de real**” representa, no Brasil, a troca monetária mais básica. E qualquer troca econômica imaginável envolve uma **quantidade inteira positiva desta troca fundamental!** Pronto! Uma troca que respeite essa última condição em destaque se diz **quantizada** e o “um centavo de real” poderia ser chamado de **quantum monetário fundamental**. Entendeu melhor? Espero que sim!

A proposta da quantização de energia de oscilação dos átomos surgiu, pela mente de Max Planck, no final do ano 1900. Como era uma hipótese revolucionária, precisava ser testada na explicação de outros fenômenos. Se fosse bem-sucedida, a ideia da quantização ganharia força e, assim, Teoria Quântica se tornaria cada vez mais sólida em sua base. Em 1905, outro físico alemão – Albert Einstein, este um pouco mais famoso, acho – quantizou a energia transportada pelas ondas eletromagnéticas e, assim, obteve sucesso na explicação teórica de outro problema que atormentava a mente dos físicos do final do século XIX: o efeito fotoelétrico, que consiste na possível remoção de elétrons de uma placa metálica “bombardeada” pela incidência de luz ou de outras ondas eletromagnéticas. Reconhecer a luz como um conjunto de

“pacotinhos de energia” (cada “pacotinho” correspondendo a um quantum de energia) consistia em algo perturbador para a comunidade científica da época, afinal a luz estava sendo tratada como...

... um conjunto de partículas.

- “Mas... Você não havia dito que a luz era uma ONDA eletromagnética?”, você questiona.

- “Sim”, respondo de forma direta.

- “Como, então, resolvemos este impasse: a luz é onda ou partícula?”, você retruca.

- “Vamos com calma! Muitas novidades surgiram no conto de hoje! Está na hora de digeri-los BEM DEVAGAR para que, no próximo conto, possamos dar um desfecho a essa novela. E acredite: nesse capítulo final, a capacidade imaginativa da sua mente vai ser usada como nunca. Vamos, por meio dela, viajar até as profundezas do mundo quântico. Desta forma, um grande mistério se resolverá: quem é Peter Planck, este piloto maluco que se aproveita da minha imaginação como meio de transporte para me guiar pelas loucuras do mundo quântico? Prepare-se para as últimas cenas da nossa aventura! Até lá!”, despeço-me colocando um pouco de suspense no ar.

9.7. Anexo G – Sexto conto: Abrindo os olhos para uma nova noção de realidade

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Sexto conto: “Abrindo os olhos para uma nova noção de realidade”

- “Oba! Até que enfim! Chegamos no último conto e o suspense será desfeito! Está na hora de resolver aquela confusão: a luz é uma onda ou uma partícula?”
– você me aborda de supetão, sem me dar qualquer margem para respiro.

A sua curiosidade me encanta! Para mim, ela é, respeitadas as devidas proporções, uma boa representação do genuíno espírito científico, insaciável, inquieto, ansioso por novos feitos e descobertas! Adicione-se doses aceitáveis de abstração... E teremos em você a versão miniatura de um cientista. Aliás, é dessa abstração que vamos precisar neste momento, porque entrar no mundo quântico significa se apoiar em outras expressões de realidade que não condizem com aquelas indicadas pelos nossos sentidos (principalmente pela visão, o sentido que mais contribui para a imagem do exterior que nos envolve).


Veja (um simples verbo que já aciona o mais ligeiro entre os seus sentidos): ao observar esta folha, onde registro as linhas deste último conto, você pode afirmar que ela apresenta uma geometria claramente retangular, certo?! Pois bem... Talvez exista um lápis aí ao seu redor, certo?! Aposto que a geometria dele é basicamente cilíndrica, sim?! Óbvio: com um cone que vai afilando até a ponta. Humm... Sabe as lentes dos óculos que o seu colega míope usa? Ótimo! Elas são obtidas a partir de cortes feitos em esferas transparentes. Esferas que poderiam ser bem representadas por bolas de pingue-pongue, de tênis, de basquete e de tantos outros esportes. Vamos, agora, ao que interessa! Se você fosse representar geometricamente...

... a luz que incide sobre uma superfície: que geometria usaria?

... os átomos que compõem o seu corpo: que figura desenharia?

... os elétrons, prótons e nêutrons que formam estes átomos: como faria?

Vou-lhe pedir um favor: só continue a leitura depois de colocar as suas impressões no espaço abaixo.



Os seus registos são incríveis! E tenho certeza de que eles acompanham o mesmo processo de construção da Ciência que nos trouxe até aqui, até este momento atual! É muito importante que você tenha real consciência desse fato, aliás!

Será que o que você colocou no espaço anterior corresponde à última imagem que a Ciência tem acerca da luz, dos átomos e de todas as coisas menores que eles? Acho pouco provável, a menos que você tenha preenchido o tal espaço com **equações matemáticas** que descrevam cada um desses “objetos da Física”. Pois é! Quando se fala que a luz é uma onda, não se deve pressupor que a sua representação fiel seja igual a da onda em uma corda, por exemplo. Há alguns contos, usamos essa imagem apenas para definir duas propriedades: comprimento de onda (λ) e frequência (f). Mas nunca, nunca mesmo, quisemos construir uma identidade entre estas. A verdade é que a possibilidade de associar estas propriedades a um feixe de luz faz com que ele “carregue” características típicas de ondas e obedeça a funções matemáticas que são

respeitadas por perfis ondulatórios. Da mesma forma, quando se defende a luz como um conjunto de partículas, não se deve encará-la como uma sucessão de bolinhas esféricas – cada qual transportando um quantum de energia. Deve-se, sim, entender que ela obedece a equações próprias de objetos que, no mundo macroscópico e perceptível aos nossos sentidos, poderiam ser assimiláveis a partículas de tamanhos desprezíveis. Que fique bem claro: no nosso “mundo do muito pequeno” a realidade não é representada por um desenho, por uma geometria, pela similaridade a objetos que ocupam o mesmo ambiente em que nos encontramos. A verdadeira realidade é melhor expressa por um conjunto de equações matemáticas! Essa é a abstração para a qual queria lhe convidar!

Pois se achegue mais que eu vou lhe dar um “exemplo concreto de algo abstrato” (acho que você já percebeu que eu adoro esses contrastes de linguagem, não?!). Sabe a luz a que nos referimos no último parágrafo? Entende-se, hoje em dia, que ela é composta por um conjunto de “pacotinhos de energia” – os quanta (plural de quantum) de energia que lhe apresentei no conto anterior e que, desde 1926, são chamados **fótons**. Cada pacotinho transporta uma quantidade de energia (E_f) MUITO PEQUENA e que pode ser calculada por:

$$E_f = h \cdot f$$

A letra f na equação acima já lhe é bem familiar: trata-se da frequência da radiação eletromagnética considerada (aqui falamos em “luz”, mas poderia ser rádio, micro-ondas, infravermelho, ultravioleta, raios X e raios γ). Agora... O que é esse “ h ”? Algum palpite? Bem... O “ h ” representa pra gente uma constante de proporção, é um valor que não muda e que é muito importante quando o assunto é lidar com fenômenos quânticos. Recebe o nome de **constante de Planck** – para homenagear o físico que a revelou ao mundo pela primeira vez. Seu valor? Ah! É muito, MUITO pequeno – e justamente por isso ela sempre aparece nas expressões matemáticas que descrevem os objetos que habitam o domínio tipicamente quântico. Inclusive... Na minha descrição, enquanto objeto quântico! Lembra-se que eu te falei, logo de início, que eu era/sou BEM pequenino? Isso mesmo! Sou, inspirado num personagem fictício (cujo nome eu empresto, quase totalmente), um **fóton de luz verde**! E... Quer saber? Os motivos por trás da minha cor vão muito além da inspiração ficcional. Você sabia que o olho humano apresenta máxima sensibilidade para a cor verde? Pois é! De todo o conjunto de

ondas eletromagnéticas (chamamos esse conjunto de “espectro eletromagnético”), o nosso olho é sensível a uma fração pequeníssima. Essa fração, como você bem sabe, é chamada de “luz visível”. E todas as cores que em conjunto formam o “espectro visível” sensibilizam o nosso olho de diferentes formas e taxas, o máximo ocorrendo na região onde se situa o verde! Quando você, então, combina todos esses fatos, fica a um passo de entender as intenções por trás das minhas propostas de viagem: eu, na qualidade de fóton de luz verde, tenho o claro intuito de interagir com você, interagir especialmente com os seus olhos para, sensibilizando-os ao máximo, permitir a você enxergar um pouco das maravilhas aparentemente escondidas neste universo minúsculo.

Até aqui... Eu te trouxe pelos olhos! Você, agora, já tem um pouquinho de bagagem para começar as suas próprias investidas nesse mundo mágico dos objetos quânticos. Espero ter te oferecido coragem e estímulo suficientes para que você possa seguir viagem. E, claro: torço MUITO para que você, um dia, me procure de volta para contar um pouco das suas aventuras pelo Universo Quântico. Esteja certo que, para mim, será um tremendo prazer trocar papéis com você. Afinal, depois de muito aprender, será você o responsável por me guiar pelas suas descobertas!

Obrigado, amigo/amiga viajante! Até a próxima! ☺

9.8. Anexo H – Atividade complementar: Medindo a constante de Planck h

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Atividade Complementar: “Medindo a constante de Planck h ”

1. Proposta.

Achou que eu me despediria assim, tão rápido?! Ah! Claro que não, poxa! Não sem antes lhe fazer uma última proposta. Vamos lá?!

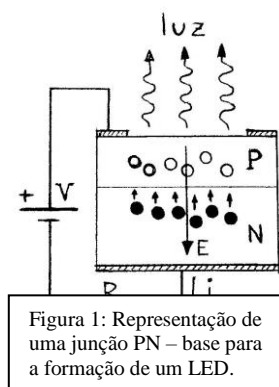
Você percebeu que, no último conto, eu mencionei a importante “constante de Planck h ”, fiz comentários sobre ela, mas... Não lhe falei nada sobre o valor dela? Tenho quase certeza que você pensou que eu, por não fornecer o seu valor, tivesse cometido um grande deslize, não é mesmo?! Errou! Este já era, na verdade, um passo previsto, pois muito me interessaria que VOCÊ conduzisse uma experiência para determiná-la (pelo menos com a ordem de grandeza correta)! Assim, poderá perceber, pelos próprios olhos, o quão pequena ela é. Venha! Está na hora de começar!

2. LED's.

Você, certamente, já ouviu falar da tecnologia **LED**. Hoje em dia, o emprego dela é bem amplo e passa desde a provável aplicação na tela e na lanterna do seu celular, nos monitores de computador e aparelhos televisores até às várias lâmpadas que existem na sua casa. O seu nome é, na verdade, resultado de uma sigla para *light emitting diode* (ou “diodo emissor de luz”, no nosso idioma). Mas... O que seria um “diodo”?

Em circuitos elétricos/eletrônicos, um diodo é um dispositivo que privilegia a condução de corrente elétrica através dele em um único sentido. Ou seja: é muito, MUITO mais fácil permitir a condução de corrente elétrica em um dos sentidos permitidos. Desta forma, ele se diferencia bastante de um resistor convencional – que permite a passagem da corrente elétrica através dele em qualquer dos sentidos e de igual forma (bastando-se a inversão dos polos da bateria que o alimenta).

Os LED's mais comuns são formados por materiais semicondutores em junções chamadas PN. O esquema ao lado mostra, de forma BEM simplificada, a configuração esquemática de uma junção destas: na porção P, existe um material semicondutor fortemente preenchido (em termos científicos, diz-se fortemente dopado) com átomos de um elemento químico capaz de “aceitar” elétrons; isto é, eles fornecem estados eletrônicos desocupados



(chamados tecnicamente, vejam só, de “buracos”) que poderiam ser preenchidos por elétrons vindos de outro lugar. “De outro lugar? Como assim? De onde, exatamente”? Neste caso... Da outra parte da junção: a porção N, formada também por um semicondutor fortemente dopado com átomos de outro elemento químico capaz de fornecer elétrons em excesso. Se aplicarmos um campo elétrico no sentido correto (o que equivale a conectar uma pilha com as polaridades “+” e “-” corretamente ajustadas), podemos promover o deslocamento dos MUITOS elétrons em excesso presentes no lado N para os MUITOS buracos disponíveis no lado P e, então...

... a “combinação” elétron-buraco gera luz como resultado! Incrível, não?!

3. A hora e a vez da... abordagem matemática!

Dizemos que, a partir de certo momento, a “promoção” de um elétron da porção N para a P da junção vai exigir um esforço externo – é aí em que a bateria entra em cena. Ela deve fornecer uma tensão mínima V_0 (medida em volts) para,

consequentemente, oferecer um ganho mínimo de energia $\Delta E_{\text{mín.}}$ para cada elétron. Este ganho é dado por:

$$\Delta E_{\text{mín.}} = e \cdot V_0$$

Na equação acima, e representa o módulo da carga elétrica de um elétron (valor conhecido como carga elétrica elementar e aproximadamente igual a $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ – “coulomb”, C , é a unidade padrão para esta grandeza).

Alcançado este ganho, o elétron se recombina com um buraco e o resultado, como já dito, é... LUZ! Na verdade, o resultado é um fóton de luz – cuja energia E_f ... Humm... Esta você sabe calcular! Lembra-se? Não? Opa! Eu te ajudo a lembrar! É assim:

$$E_f = h \cdot f$$

Recordando: f , aqui, é a frequência da luz produzida (característica da cor) e h é o nosso objeto principal de estudo! Aquilo cuja busca nos interessa: a constante de Planck. Se entendermos que o ganho de energia gerado pela bateria tem, como intenção final, gerar os fótons de luz de energias definidas, temos:

$$\Delta E_{\text{mín.}} = E_f \Rightarrow e \cdot V_0 = h \cdot f \Rightarrow V_0 = \frac{h}{e} \cdot f$$

É justamente nesta última relação em que vamos nos concentrar!

4. Mãos à obra!

Chegou o momento de fazermos as coisas funcionarem. Mas, antes de tudo, cheque a existência de um kit experimental com os seguintes itens e, caso não falte nada, tente organizá-los conforme ao diagrama também mostrado a seguir.

4.1. Materiais e montagem.

- 5 LED's de diferentes cores (e de frequências conhecidas).
- 1 bateria de 6 V ou de 9 V.
- 1 potenciômetro de 1 k Ω .
- 1 resistor de 330 Ω .
- 1 voltímetro.
- Cabos para conexão.

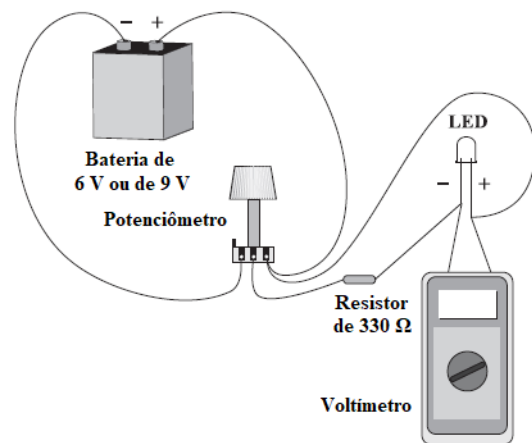


Figura 2: Esquema da montagem experimental.

4.2. Procedimento.

- i. Oriente os três terminais do potenciômetro de tal forma que eles fiquem voltados para os seus olhos. Antes de fazer as conexões, certifique-se de girar completamente o botão deste dispositivo no sentido horário.
- ii. Comece conectando os polos negativo e positivo da bateria, respectivamente, às extremidades esquerda e direita do potenciômetro. Use os cabos de conexão para cumprir com esta parte do roteiro.
- iii. Em seguida, ligue o resistor de 330 Ω ao terminal central do potenciômetro e ao polo negativo **de um LED de dada cor**. Tal polo é indicado pela “perna mais curta” do LED. Como de costume, use os cabos disponíveis para lidar com estas conexões.
- iv. O circuito será fechado pela ligação, via cabo, entre a polo positivo do LED escolhido ao terminal da direita do potenciômetro.
- v. Conecte um voltímetro aos polos do LED para acompanhar a variação da tensão nos seus terminais.
- vi. Girando lentamente o botão do potenciômetro no sentido anti-horário, determine o valor da tensão acusada pelo voltímetro no instante em que o LED começa a acender. Este será o valor de V_0 para a cor em questão. Para registrar esse momento com precisão, vale a pena colocar o LED em um ambiente escuro – você pode fazer uma “conchinha”/“casinha” com as suas duas mãos e, assim, envolver o LED. Repita esse passo por algumas vezes só para ter certeza de

que o valor de tensão acusado pelo voltímetro é mais ou menos o mesmo nas várias repetições.

vii. Registre o valor de tensão na tabela abaixo, gire completamente o potenciômetro no sentido horário, troque o LED e refaça toda a sequência de passos para o LED de nova cor. Siga procedendo desta forma até preencher TOTALMENTE a tabela abaixo exposta.

Cor do LED	Vermelho	Laranja	Amarelo	Verde	Azul
$f (10^{14} \text{ Hz})$					
$V_0 (V, \text{ volts})$					

5. Análise

i. A equação $V_0 = (h/e) \cdot f$ sugere que, se montássemos um gráfico de tensão V_0 no eixo y versus frequência f no eixo x , deveríamos obter uma reta como resultado. Quais seriam, teoricamente, os coeficientes angular a e linear b desta reta?

- Coeficiente angular teórico: $a =$
- Coeficiente linear teórico: $b =$

ii. Com os valores organizados na tabela, construa um gráfico de pontos que coloque valores de tensão V_0 (em *volts*) no eixo y e de frequência f (em 10^{14} Hz) no eixo x . Estes pontos estão, em boa aproximação, organizados em torno de uma reta?

iii. Trace a reta que melhor se ajusta ao conjunto de dados experimentais que você tomou. A partir das escalas consideradas no papel milimetrado, obtenha

uma estimativa para os valores experimentais dos coeficientes angular $a_{exp.}$ e linear $b_{exp.}$

- Coeficiente angular experimental: $a_{exp.} =$
- Coeficiente linear experimental: $b_{exp.} =$

iv. Lembra-se que, em Ciência, o casamento entre previsões teóricas e medidas experimentais é EXTREMAMENTE importante? Pois então... Chegou a hora de comparar os valores teóricos e experimentais dos coeficientes da reta para, assim, obter uma estimativa para a constante de Planck h . Faça isso! Cuidado: você vai precisar recordar que a carga elétrica elementar e é aproximadamente igual a $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

v. Um valor de referência para a constante de Planck é $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Qual a porcentagem de erro associada ao valor que você obteve? Para responder essa pergunta, considere que:

$$\% \text{ de erro} = \frac{|\text{valor medido} - \text{valor aceito}|}{\text{valor aceito}} \cdot 100$$

9.9. Anexo I – Atividade de Fechamento: Transformando o Efeito Fotoelétrico em Narrativa

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Atividade de Fechamento: “Transformando o Efeito Fotoelétrico em Narrativa”

1. Introdução

No último conto da nossa saga, eu, Peter Planck, me despedi de você com o desejo de, um dia, vê-lo me carregando pelo seu mundo quântico de aventuras. Na tentativa de lhe inspirar, vou lhe contar um pouco sobre uma das aplicações mais bacanas das ideias de quantização: o Efeito Fotoelétrico, cuja correta explicação rendeu, em 1921, um Prêmio Nobel de Física a ninguém mais, ninguém menos que...

... Albert Einstein!

Só que, agora, vou fazer um pouco diferente: não vou fazer isso textualmente! Vou, sim, pedir a ajuda do seu professor para te guiar por essa aventura. Vem com a gente?!

2. Proposta

Depois de ter visto um pouquinho sobre o efeito fotoelétrico... Será que você consegue transformá-lo em uma narrativa? Em uma história feita de personagens fantásticos, capaz de “capturar” e explicar as partes mais importantes do fenômeno e de guiar tantas outras pessoas pelo mundo mágico da Física Moderna? OPA! Tenho certeza que sim! E... Quer saber? Estou muito, MUITO ANSIOSO pelos seus relatos.

Vou te dar algumas dicas, ok?

1. Quanto à forma, você pode:

- Fazer uma narração, na 1ª ou 3ª pessoa do plural.
- Expressar-se do mesmo jeitinho que eu fiz, usando texto corrido.
- Apresentar uma sequência de falas, como se quisesse ilustrar uma conversa entre múltiplos personagens.
- Fazer uma história em quadrinhos – caso você goste bastante de desenhar!
- Uma sucessão de versos rimados e musicados.

Enfim.... Pode abrir margem para a sua criatividade! Fique à vontade! Mostre o que você aprendeu sobre o fenômeno e... Deixe o resto fluir!

2. Quanto aos atores/personagens:

Você aprendeu, graças a atuação excepcional do seu professor, que a interação fundamental no Efeito Fotoelétrico se dá entre fótons e elétrons (sendo que os mais fáceis de serem ejetados são os chamados “de valência”). Eles, portanto, são os sujeitos que devem “contracenar” na sua história! No verso desta página, dou sugestões de atores reais desse mundo quântico. São ondas eletromagnéticas (e as suas respectivas frequências) e átomos com as suas próprias funções trabalho (lembra o que elas representam?).

Veja: para você saber como interagem fótons e elétrons, você vai precisar calcular as energias dos fótons. Neste caso, utilize $h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ como uma aproximação para a constante de Planck (aqui expressa em unidades convenientes, sendo $1 \text{ eV} = 1 \text{ elétron} - \text{volt} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Eu, agora, quero ser o turista! Posso toma-lo como meu guia?! Bom trabalho! ☺

Radiação	f_{\min} (Hz)	f_{\max} (Hz)	$E_f^{\min.}$ (eV)	E_f^{\max} (eV)
Ondas de Rádio	-----	$3,0 \cdot 10^9$	-----	
Micro-ondas	$3,0 \cdot 10^9$	$3,0 \cdot 10^{12}$		
Infravermelho	$3,0 \cdot 10^{12}$	$4,3 \cdot 10^{14}$		
Vermelho	$4,3 \cdot 10^{14}$	$4,8 \cdot 10^{14}$		
Laranja	$4,8 \cdot 10^{14}$	$5,1 \cdot 10^{14}$		
Amarelo	$5,1 \cdot 10^{14}$	$5,3 \cdot 10^{14}$		
Verde	$5,3 \cdot 10^{14}$	$6,1 \cdot 10^{14}$		
Azul	$6,1 \cdot 10^{14}$	$6,7 \cdot 10^{14}$		
Anil/Índigo	$6,7 \cdot 10^{14}$	$7,1 \cdot 10^{14}$		
Violeta	$7,1 \cdot 10^{14}$	$7,5 \cdot 10^{14}$		
Ultravioleta	$7,5 \cdot 10^{14}$	$3,0 \cdot 10^{17}$		
Raios X	$3,0 \cdot 10^{17}$	$3,0 \cdot 10^{19}$		
Raios Gama	$3,0 \cdot 10^{19}$	-----		-----

Tabela 1: Ondas eletromagnéticas e suas respectivas frequências mínima e máxima. As energias dos fótons devem ser preenchidas considerando que a energia das ondas eletromagnéticas é quantizada (tal como nos disse Einstein em 1905).

Funções trabalhos de alguns metais	
Metal	ϕ (eV)
Na	2,28
Co	3,90
Al	4,08
Cu	4,70
Pb	4,14
Zn	4,31
Fe	4,50
Ag	4,73
Pt	6,35

Tabela 2: Funções trabalho de alguns metais (todas expressas em eV).

9.10. Anexo J – Produções acadêmicas dos alunos

9.10.1. Aluno 1A

EFEITO FOTOELÉTRICO

Olá para você que está lendo este conto, eu sou o John, amigo do Peter, e hoje vim apresentar um tema quem está relacionado ao que o Peter disse, o **Efeito Fotoelétrico**.

No geral, é importante você saber que o **Efeito Fotoelétrico** consiste em **remover os elétrons da camada de valência de uma placa metálica** a partir da **incidência de uma onda eletromagnética** sobre ela, claro que isso só irá acontecer se a **Energia fornecida pela onda** (que varia de onda para onda) for pelo menos igual a **Demanda energética pedida pelo elétron** (que varia de metal para metal). Podemos dizer, assim como Einstein, **que as ondas são formadas por inúmeras partículas** que, mais tarde, foram chamadas de **fótons**; estes são como potinhos de energia que, ao (um deles) interagir com um, não mais que um, não menos que um elétron pode ocorrer três situações:

1. Se a **Energia do Fóton** for **menor** que a demanda do elétron, o elétron não vai ser removido e o fóton também não será absorvido.
2. Se a **Energia do Fóton** for **igual** que a demanda do elétron, o elétron vai ser removido e o fóton será absorvido.
3. Se a **Energia do Fóton** for **maior** que a demanda do elétron, o elétron vai ser removido, além de que a sobra da energia que o fóton vai fornecer se transformará em energia cinética para o elétron, e o fóton será absorvido.

Observações importante: uma mesma onda pode tirar elétrons de um metal e não poder tirar de outro, pois sua energia fornecida é a mesma, mas a demandada pelo átomo do outro metal é diferente.

Ok, eu John, reconheço que minha explicação pode não ter ficado muito clara para todos, então imaginemos a seguinte situação: eu tenho uma quantia **E** de **dinheiro** e quero comprar um **cofrinho**. Como estamos no mundo real, existem várias **lojas** de cofrinhos, cada uma com um **preço** diferente sobre o **cofrinho**.

- Em certas **lojas** eu não consigo comprar nenhum **cofrinho**, pois não tenho **dinheiro** suficiente para comprá-lo;
- Em outras, consigo comprar e gasto exatamente a quantia **E** que posso, não sobrando nada;

- E, por fim, em outras **lojas** consigo comprar o **cofrinho** e ainda sobra **dinheiro** que guardarei no **cofrinho**.

Lembremos que não faz o menor sentido comprar mais que um **cofrinho**, pois, se sobrar **dinheiro**, guardarei no primeiro **cofrinho** que comprei.

Bom, nessa alusão, o:

- **Dinheiro** seria a Energia do fóton;
- **Cofrinho** seria o elétron;
- As diferentes **Lojas** seriam os diferentes metais;
- O **Preço** do cofrinho seria a energia que o elétron demanda para se desprender do elétron.

Espero que, depois dessa explicação, tenha ficado mais claro como o **Efeito Fotoelétrico** funciona.

Após essa breve explicação gostaria de introduzi-los rapidamente às nomenclaturas e parte matemática da coisa. Assim, temos que:

- * $E_{fóton} = h \cdot f$, onde $E_{fóton}$ é a Energia do fóton, h é a constante de Planck e f é a frequência da onda;
- * $E_{onda} = n \cdot E_{fóton}$, onde E_{onda} é a Energia da onda n é o número de fótons presentes nela;
- * W_0 é a função trabalho, ou seja, a energia que o elétron demanda para conseguir escapar.
- * f_{corte} é a frequência mínima que uma onda necessita para ter uma energia igual a W_0 ;
- * $E_{cin} = E_{fóton} - W_0$, onde E_{cin} é a energia cinética que o átomo pode adquirir.

É isto! Espero que tenha gostado dessa aventura no **Efeito Fotoelétrico** assim como eu gostei, espero também que minha pequena explicação sobre o assunto tenha sido suficiente para aumentar seu interesse sobre o assunto e feito-lhe entender um pouquinho mais sobre o mundo do muito pequeno.

S T Q Q S S D

30/10/19

Efeito Fotoelétrico

ERA MEADOS DO SÉCULO XIX, A EUROPA AINDA SOFRIA COM AS CONSEQUÊNCIAS DA GRANDE GUERRA, PORÉM NÃO SABIA O MUNDO O QUE AINDA ESTAVA POR VIR, DA MANEIRA EM QUE 2 HOMENS, COM SUAS IDEIAS, REVOLUCIONARIAM TODA A CIÊNCIA.

MAS NÃO ESTAMOS AQUI PARA FALAR DELES, E SIM PARA CONTAR A VIDA DE UM JOVEM ALEMÃO, 6º FILHO DA FAMÍLIA - MAX. SEU PASSA-TEMPO ERA COLECIONAR PEDRAS, AS QUAIS ENCONTRAVA EM SEU QUINTAL, E AS VENDIA PARA TODOS OS INTERESSADOS DO BAIRRO, RECEBENDO EM TROCA ALGO QUE ELE DAVA UM VALOR. PORÉM MAX, SENDO MUITO TRAPILHO, CRIOU SEU PRÓPRIO VALOR: O QUANTUM, E ELE NÃO ACEITA VÁRIAS COISAS COM UM BAIXO QUANTA, PARA MAX, SUAS PEDRAS SÓ PODEM SER TROCADAS POR UMA QUANTIDADE MÍNIMA DE QUANTA, A FUNÇÃO TRABALHO, QUE DEPEN- DIA DA PEDRA.*₁

E É NESTA HORA QUE INTRODUZO ALBERT, AMIGO DE MAX, QUE SUGERIU UMA IDEIA: O VALOR DE CADA OBJETO QUE SERIA TROCADO POS-SUI UMA QUANTIDADE DIFERENTE DE QUANTA, QUE ESTÁ RELACIONADO A COR. NESTA NOVA HIPÓTESE, O AZUL SERÁ O MAIS VALIOSO, POR OUTRO LADO - O VERMELHO, É O MENOS. ASSIM, DOIS COMPRADORES, COM UM MESMO OBJETO, PORÉM DE CORES DIFERENTES, NÃO NECESSARIAMENTE CONSEGUIRÃO ADQUIRIR A MESMA PEDRA.

"MAS E SE O OBJETO POSSUIR UM QUANTA MAIOR QUE A FUNÇÃO TRABALHO, O QUE OCORRE?" - PERGUNTARAM OS COMPRADORES, ALBERT, SENDO O MENINO PREPARADO QUE ERA, RESPONDEU: "A VELOCIDADE DE ENTREGA DA PEDRA À SUAS CASAS SERÁ MENOR!"

*₁: também era muito apegado, por isso de mantia suas pedras mais impor- tantes perto dele, vendendo as mais exteriores antes, que apresentam uma função trabalho menor

9.10.3. Aluno 1C

S T Q Q S S D

___/___/___

Efeito fotoelétrico

Para uma melhor compreensão do efeito fotoelétrico, imaginemos um mercado, que possui algumas regras específicas e definidas. Tais "regras do mercado" tiveram grandes cientistas como fundadores, entre eles Max Planck e Albert Einstein.

Colocando menos ênfase nos cientistas, ou melhor, nos "fundadores (ou descobridores) das regras", o efeito fotoelétrico se refere à retirada de mercadorias, a partir do uso do dinheiro. Nesse caso, as mercadorias seriam elétrons, e o dinheiro, ondas eletromagnéticas.

Contudo, o mercado possui regras específicas e determinadas (algumas não muito convencionais), conforme dito anteriormente. Uma das regras diz que não é possível realizar a compra da mercadoria com qualquer dinheiro (p. ex.: não é possível comprar na feira de bairro com euro), ou seja, nem toda onda eletromagnética é capaz de retirar elétrons.

A próxima regra de nosso mercado imaginário envolve de forma ainda mais específica o pagamento para a retirada de mercadorias. Digamos que o mercado, visando uma melhor organização para os pagamentos, definiu que devem-se utilizar pequenas bolsinhas com certa quantidade de dinheiro. O valor de cada uma dessas bolsas varia de acordo com a cor do dinheiro que está dentro dela. (Assim como o dinheiro do Brasil, a nota azul [peixe] vale mais do que a vermelha [papagaio]). Nesse exemplo, as bolsinhas são quanta, e a cor do fóton é a "cor do dinheiro".

Agora que sabemos como realizar o "pagamento", uma dúvida muito pertinente deve ter surgido: quanto é necessário pagar? A resposta é bem simples: depende da mercadoria! A quantidade de "bolsas" de energia, digo, de dinheiro, varia de mercadoria para mercadoria. Chamemos de função trabalho o valor mínimo necessário para retirar o produto.

Mais uma coisa: o mercado não trabalha com troco! Em vez disso, o "dinheiro" em excesso é convertido em uma maior facilidade para levar a mercadoria até a casa do comprador, digamos assim (energia em excesso do fóton é convertido em cinética).

spiral®

9.10.4. Aluno 1E

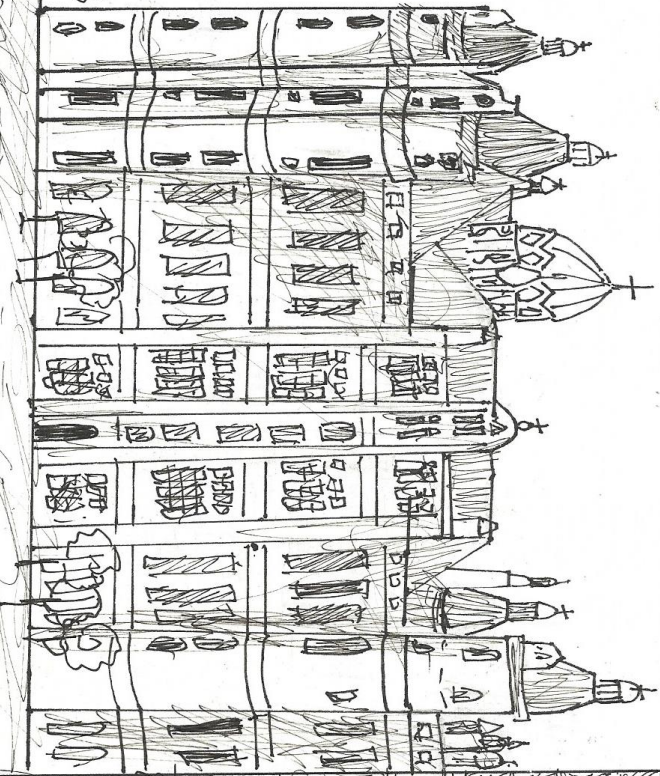
(copy)

Robin Hood

Robin Hood

O efeito fotoelétrico é algo extremamente complicado de se entender utilizando termos técnicos. Em suma seria a produção de eletricidade por um átomo metálico (matrícula metálica) por conta da emissão de luz. Porém como isso funciona? Tentaremos explicar por meio de uma analogia simples.

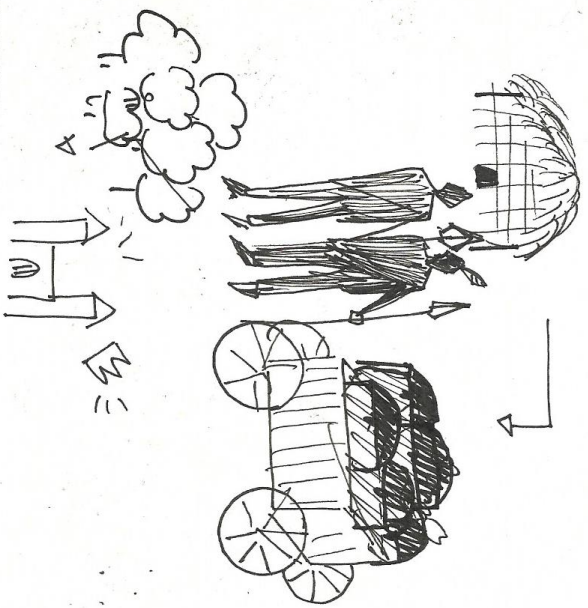
Há muito tempo, na Inglaterra, reinou Ricardo. Um honrado e com passivo sobe vamo.



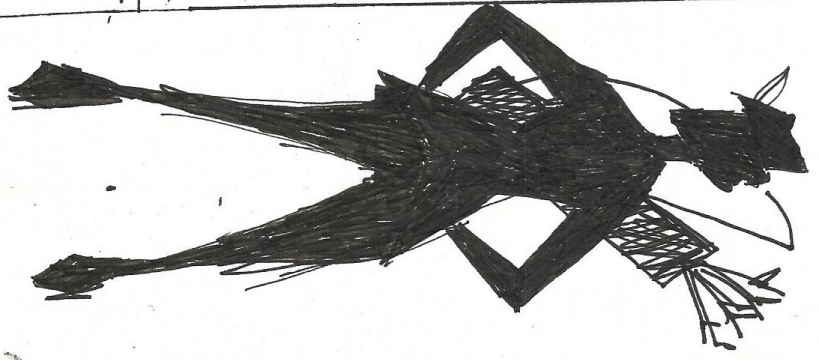
Mas, para o descontentamento do povo. Durante as incessantes guerras santas, capturaram-no, fazendo com que seu irmão, João, ascendesse ao trono.



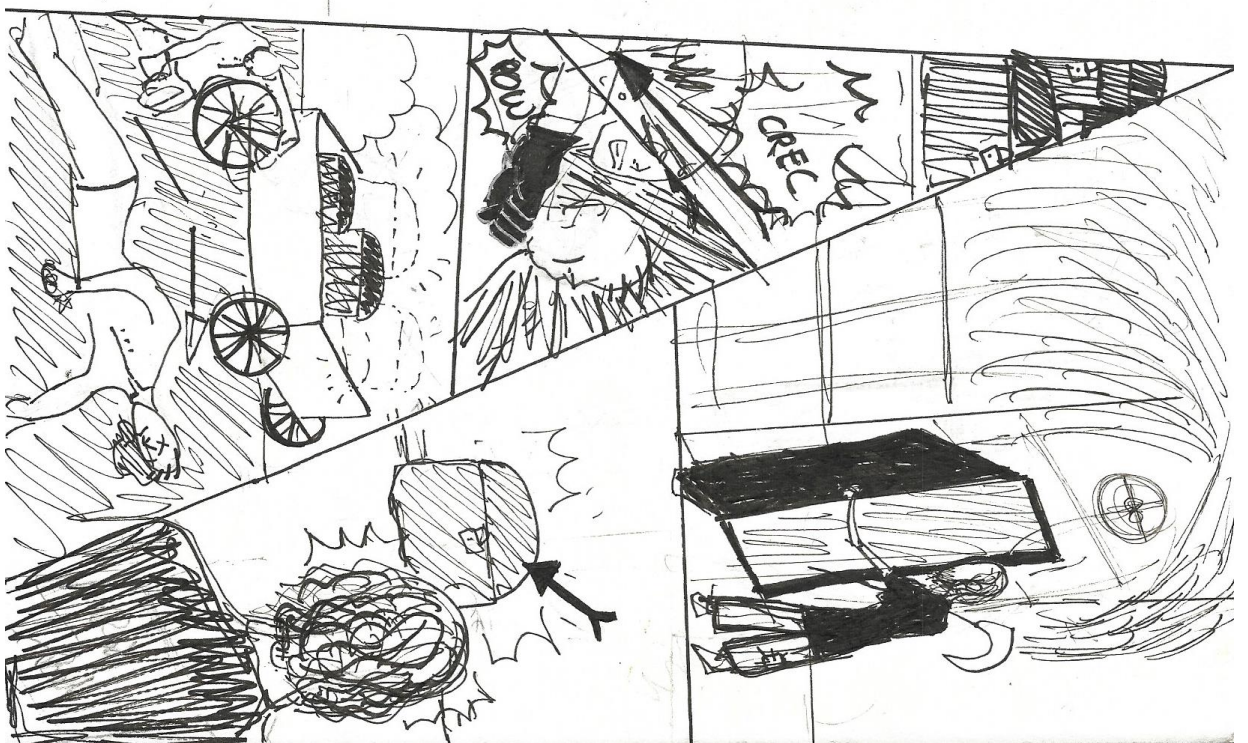
Sob o pretexto de pagar o resgate pedido aos camões, foi a cobrar impostos altíssimos sem, porém, a mínima intenção de libertar Ricardo, o almejado oreno.



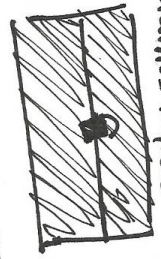
Sabendo que qualquer pessoa que desgras-
se entrar no castelo de uena, primeira-
mente passar pela floresta. Robin Hood,
um arqueiro que havia lutado pelo Rei
durante as cruzadas, reuniu uma mi-
lícia de camponeses, também indigne-
dos e montou vigia por entre as árvores.



Todo cobrador de impostos que
por a zar cruzasse com eles
deveria entregar-lhes parte do que
que seria devolvido ao povo para
compensação. E, armazenado para o
resgate no Rei Ricardo.

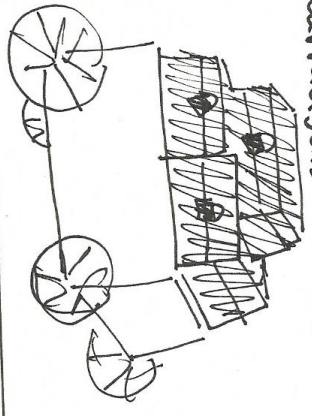


Você deve estar se perguntando qual seria a relação do efeito foto elétrico com Robin Hood. Suponhamos que:

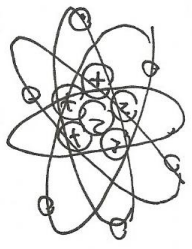


os bairros são os elétrons

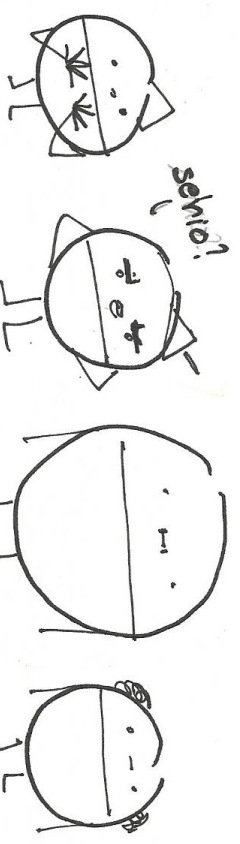
as carruagens com os pais semam.



= os átomos com os elétrons.

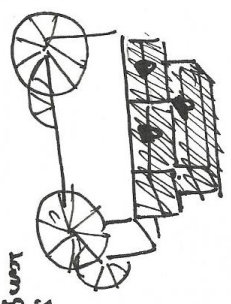


④

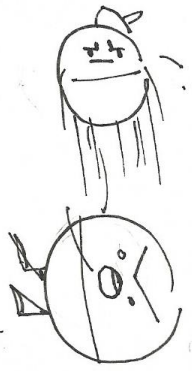


Eles serão os fótons.

A "missão" deles é recuperar o ouro dos bairros. Porém não têm acesso às suas armas, ~~então~~ teremos então que improvisar.



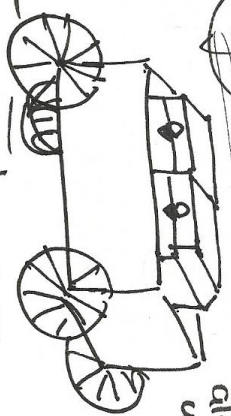
Jaco pequeno, com toda sua força, ataca e lança Robin contra a carruagem.



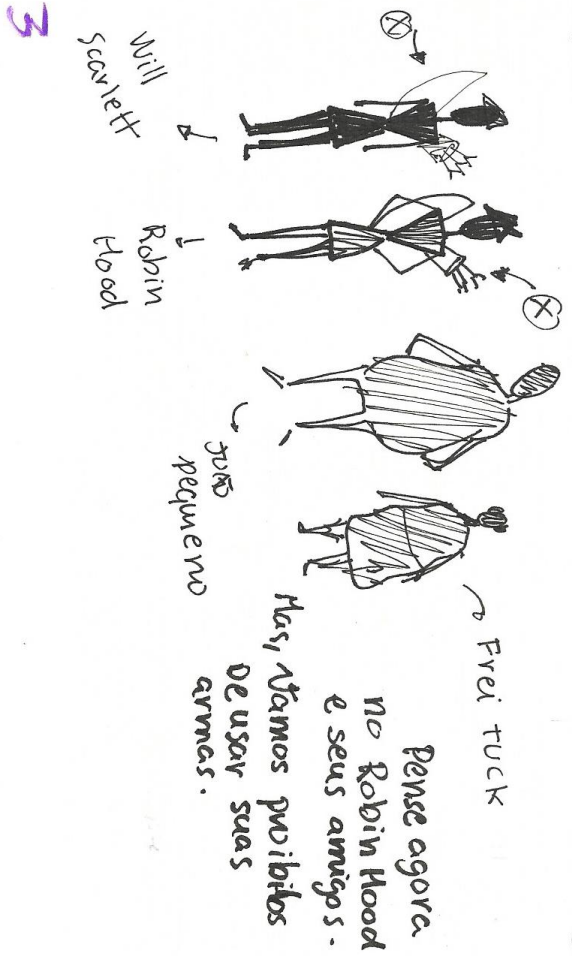
⑤



Ele, por sua vez, teve que, em movimento alcançar um baú e pegá-lo.



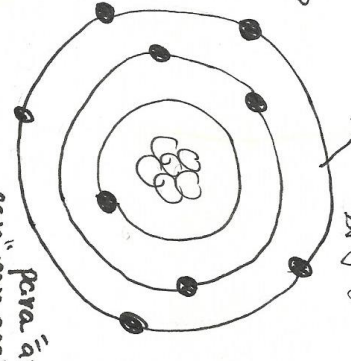
Resaltando que, como o hevíl tem apenas 2 mãos só conseguirá pegar 1 dos baús



Frei Tuck
Pense agora no Robin Hood e seus amigos. Mas, vamos proibidos de usar suas armas.

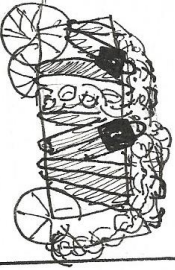
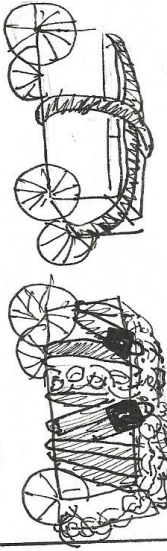
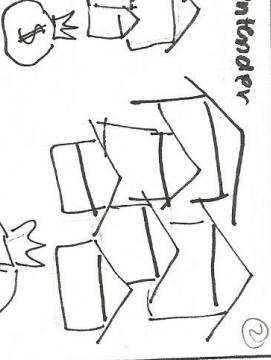
3

Alcance, venar um fision (Robin) sendo lançado num a'no

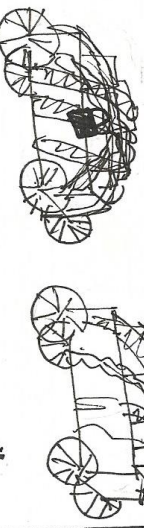
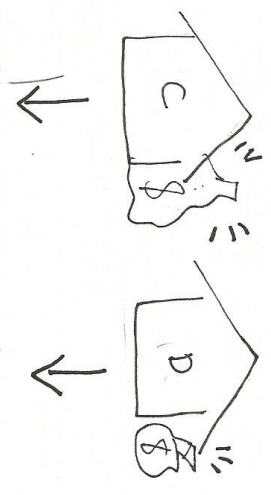
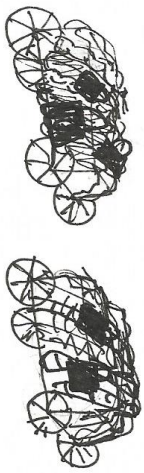
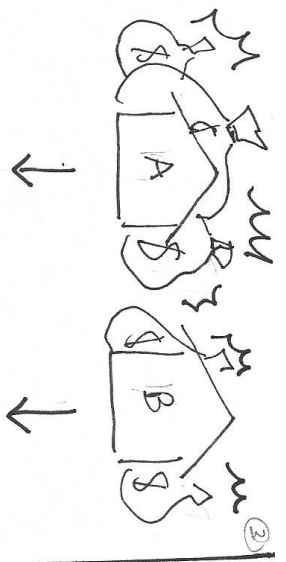


para "arrancar" por assim dizer, um eltron.

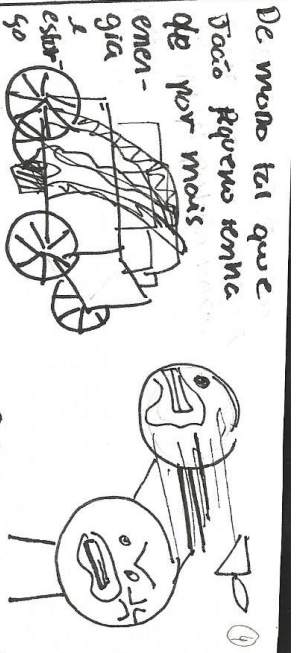
Agora, para entender as di-feren-ças ener-gias necessarias (requeridas) por cada metal) para "arrancar" um eltron



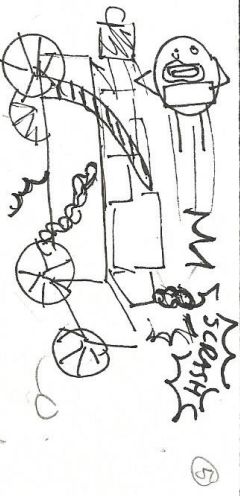
4 pensemos no Reino do Rei João. Lá existem vilas mais ricas e mais pobres...



Quanto mais abastada a vila, maior quantidade de impostos poderão prever. Portanto, o Rei ordenará que tenham mais cadeados e correntes no carrinho para impedir que o ouro seja roubado.



De modo tal que Dado Pequeno tenha de por mais energia para estar go



no seu trabalho. Assim que Robin pegue o bu... *Lembrar que Robin tem apenas 2 mões, Entã não importa o quão forte seu companheiro é. Só pode ver, por 1 bu. Apenas salido com uma velocidade maior.

E A > E B > E C > E D

E P > E F e > E A < E C O

O mesmo ocorre com os elementos. Cada qual exige uma energia diferente para "liberar" um eltron (rail). Os mais "ricos" exigem mais energia, e os menos exigem menores quantidades

Femmina

efeito fotoelétrico

- Física Moderna

Avia escrito uma carta para meu amigo Henrique na semana passada, falando sobre discussões do efeito fotoelétrico e recebi sua resposta ontem. Ao abrir a carta, tive uma surpresa não fora meu amigo quem redigira a carta à mim, mas sim seu filho, César que disse ter se interessado sobre tal assunto, porém é muito novo para compreendi-lo (ele tem 10 anos) sozinho. Decidi então escrever a seguinte resposta:

"Olá César:)

Acredito que você me conheça, já que sou uma grande amiga do seu pai.

Então você quer aprender sobre o efeito fotoelétrico? Pelo que me disse, você viu seu pai fazendo alguns experimentos e até sabe o resultado deles, no entanto não entende porque eles acontecem ou o que eles significam.

Para isso, vou introduzir uma cidade: *Umbrellândia*, onde seus habitantes não possuem guarda-chuva, então, quando chove eles procuram o "abrigo" mais perto para não se molharem. O problema é que *Umbrellândia* é muito grande, então há regiões que não conseguem ter todos os "abrigos" de um mesmo material que é resistente.

Agora, imagine um dia de chuva na cidade. Estamos olhando para um desses "abrigos" e, de repente, uma gota de água fura o teto e entra no "abrigo". As pessoas dessa cidade não dividem seu espaço (elas são um pouco estressadas por se molharem tanto), então a pessoa em quem a gota caiu irá sair do "abrigo" e correrá para sua casa.

spiral

Vizã que pegora, de irã se molhar no "abrigo". Vamos dizer que a gota fura o teto devido ao seu tamanho (muito "grosa" ou "grande" fura). Lembre-se que se a gota for menor que o tamanho que fura o teto, nenhuma gota entrará independente da quantidade? Ou que o tamanho da gota que fura o teto depende do material, por exemplo, nos lugares em que os "abrigo" são feitos de material resistente a chuva não entrou. Queria que você entendesse também, quanto maior for o tamanho dos gotas, mais rápido as pessoas (que se molharam) vão querer ir para a suas respectivas casas. Por fim, note que, quanto mais gotas caem mais pessoas terão de ir embora para suas casas, mas lembre-se elas têm "medo" do tamanho das gotas e não da água em si ou seja, o que faz elas irem mais rápido para casa é o tamanho não a quantidade (pois ainda odiam ter que se molhem, por isso existem os "abrigo").

Na Física, damos o nome da gota de onda eletromagnética, seu tamanho (da gota, não da onda), na analogia, de frequência e sua quantidade (de gotas, não de ondas) chamamos de intensidade. Chamamos o "abrigo" de átomo (embora ele esteja mais para a metade das pessoas), as pessoas dentro dele de elétrons e o tamanho mínimo da gota (frequência mínima da onda) para entrar no "abrigo" e tirar uma pessoa (arrancar um elétron do átomo) dizemos que é diretamente proporcional à função trabalho, onde a constante de proporcionalidade é dita como constante de Planck. A função trabalho é um tipo de energia (tipo os "calorias" do alimento) e, se a energia dada for maior que ela, o resto será convertido em energia do movimento (pessoas indo rápido para casa).

Para terminar, lembre-se que a função trabalho é característica do material? Espere que você tenha aprendido tudo. - Izabela **spiral**

S T Q Q S S D

O Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico acontece quando liberamos um elétron da última camada de um metal a partir de uma onda eletromagnética (como a luz, o infravermelho, o ultravioleta, os raios-x).

Você deve estar se perguntando: "Mas... como a luz poderia liberar um elétron?!" e por isso precisarei que você tenha um pouco de imaginação, mas antes de tudo preciso te apresentar o fóton.

A luz e todas as ondas eletromagnéticas que conhecemos são compostas de fótons, que podemos associar a pequenas bolsinhas cheias de energia. Cada tipo de onda tem seu fóton: ondas mais energéticas têm fótons carregados com mais energia (por exemplo, as ondas ultravioletas têm seus fótons mais energéticos do que a luz) e o contrário também é válido (como os raios infravermelhos que possuem "bolsinhas" menos carregadas do que a luz visível).

Agora que já expliquei a ideia de fóton, preciso da sua imaginação. Pense em um dia que alguns dos seus amigos estão tristes, seja lá qual for o motivo. Você, como um bom amigo, irá tentar ajudá-los, mas por uma infelicidade, você poderá tentar arrancar o sorriso de apenas um deles, ou seja, você tentará passar toda a energia positiva que tem para o seu companheiro nesse dia.

Todos nós temos amigos bem diferentes uns dos outros e portanto eles podem ter reações diferentes quando tentamos alegrá-los, o que quer dizer que, um deles pode ficar melhor e o outro não mesmo contando algo engraçado para os dois. Os nossos amigos tristes também têm outros amigos que tentarão deixá-los felizes também caso eles estejam chateados. Nós sabemos que um dos fatores que influencia no sucesso da tentativa é a energia positiva que cada um tem.

Por vezes o seu amigo está tão mal e você com toda a sua animação tenta deixá-lo melhor sem sucesso, porém outra pessoa com a energia dela consegue fazer com que a pessoa que antes estava triste libere energia positiva. Também pode acontecer de conseguirmos deixar um outro amigo triste melhor e liberando energia também.



Ora... Mas por que imaginar tudo isso? Agora associaremos tudo isso com o efeito fotoelétrico. Na situação descrita, você seria o fóton de uma onda e só pode reagir com um elétron (um amigo seu triste, com carga negativa) tentando com a sua animação (energia) liberar o companheiro da tristeza (ou seja, liberar o elétron do metal).

Por vezes, a energia positiva que ele necessita (o que chamaremos de função trabalho para o elétron) é maior do que a qual você tem e por isso não consegue tirá-lo da tristeza, porém em outros momentos quando a energia positiva proveniente de nós ultrapassa o mínimo necessário nós podemos não só tirar o rosto triste mas deixá-lo animado, agitado (ou para o elétron, com velocidade).

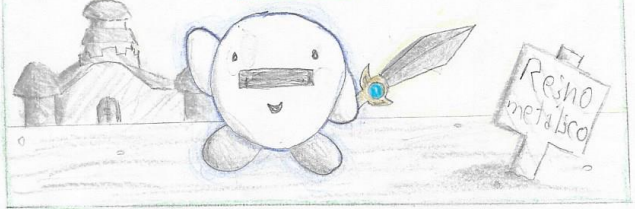
O outro amigo do seu parceiro seria o fóton de outra onda e por isso ele pode ter uma energia diferente da sua. Se a energia dele foi "maior" que a sua, então provavelmente ele conseguiria animar todos aqueles animados por você e até mais pessoas no caso do elétron se a energia de um fóton é maior do que a de outro, então o primeiro conseguiria com certeza liberar todos os elétrons que o segundo liberou). Porém se a energia dele for menor ele não conseguirá animar também aqueles que o de maior energia conseguiu.

Resumindo, se na incidência de uma onda eletromagnética o fóton tiver uma energia maior do que a força trabalho de um elétron este será liberado com uma velocidade a qual é proporcional à diferença entre a energia fornecida e a função trabalho do elétron; e se for menor, ele continuará preso ao metal.

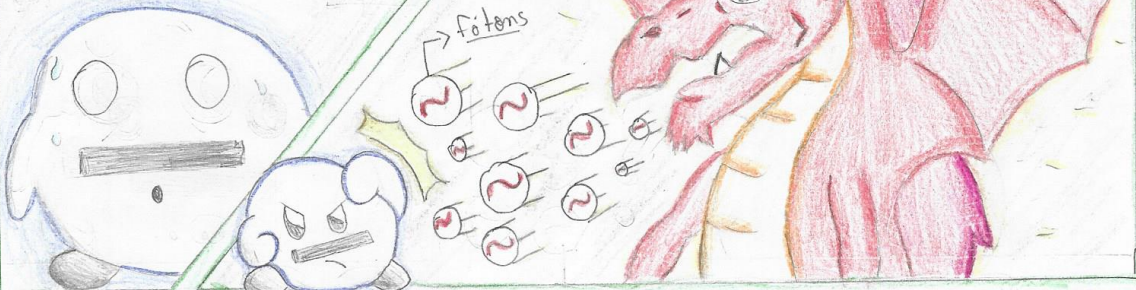
Elétron valente



Na superfície do reino metálico vivem os chamados elétrons valentes.

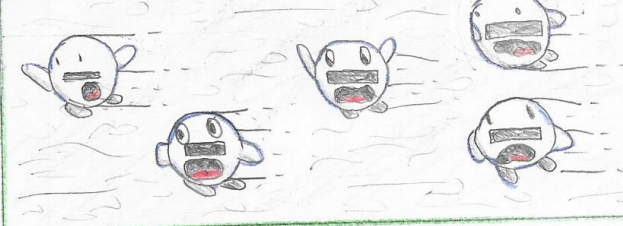


Certas vezes, o reino era atacado por dragões de luz que tinham diferentes frequências!



Os dragões lançavam pequenos pacotinhos de energia, chamados de fótons. A energia dos fótons dependia da frequência do dragão de luz. (no espectro visível a frequência está relacionada à cor da luz) Esses fótons eram recebidos e absorvidos pelos elétrons valentes, tentando proteger o Reino metálico.

Após muitos ataques, os elétrons valentes notaram um fenômeno muito interessante. Dragões de luz de frequências muito baixas não causavam danos. Porém, certos dragões mandavam os elétrons valentes aos ares! Removendo-os do Reino metálico.



Os elétrons eram removidos de forma a gerar um fluxo ordenado, uma corrente elétrica.

A esse fenômeno chamamos de **EFEITO FOTOELÉTRICO**, em que se os fótons possuírem uma energia maior do que uma energia mínima necessária para remover os elétrons valentes, estes serão arrancados da superfície metálica, gerando uma corrente elétrica. Esta energia mínima é chamada de função trabalho. E depende somente do material de que o Reino metálico é feito.

S T Q Q S S D

_ / _ / _

UM CONTO, UM QUANTUM "O EFEITO FOTOELÉTRICO"

Nos contos passados você foi guiado por Peter Planck, através dos primórdios da Física Moderna. Agora eu, Timber Regick, vou te apresentar o **EFETO FOTOELÉTRICO**.

Mas para isso é necessário, antes, entender a hipótese de Planck (não do nosso amigo Peter, mas de seu pai Max), que envolve a quantização de energia. Segundo Planck um átomo só pode emitir/absorver energia em múltiplos inteiros de uma unidade fundamental. Se fizermos uma comparação com algo da minha casa, a Terra de Nunca, é como se quando usamos poquinho mágico (lembrando que cada cor de saquinho de poquinho mágico tem uma quantidade de pó fixa) só podemos usar uma quantidade de pó múltipla da quantidade que tem em cada saquinho.

Para melhor entender o **EFETO FOTOELÉTRICO** vamos continuar na Terra de Nunca. Sabemos que para uma pessoa voar é preciso que jogue nela poquinho mágico, mas não é qualquer quantidade de poquinho, há uma quantidade mínima, que depende da pessoa.

Vamos, (finalmente!) para a estufa de cante, que é conhecida desde o século XIX. O efeito ocorre quando os elétrons de valência não remidos (= pessoa voar) de um metal quando este é bombardado por ondas eletromagnéticas (= jogar/espessar saquinhos de pó mágico), mas cada metal possui uma energia mínima - chamada de energia de ativação ou função trabalho - para que um elétron se desprenda da última camada.

É importante ressaltar que se usarmos mais poquinho do que o necessário a pessoa irá voar mais rápido, assim como se a estufa possui mais energia (que varia com sua frequência/cor, assim como a quantidade de pó mágico depende da cor do saquinho) que a função trabalho do metal o elétron que se desprende terá uma velocidade maior.

Espero que tenha ficado claro e obrigada por me acompanhar até aqui!

9.10.9. Aluno 1K

Um conto, um quantum (Profº Bruno A.)

Agora, já na reta final de nossa caminhada juntos, está na hora de examinarmos de mais um fenômeno, fenômeno este que já passou pela análise de muitos cientistas, até tirando seu sono, mas quando solucionado rendeu um Nobel para este entusiasta da Física, possibilitando a ela muitos avanços...

O efeito fotoelétrico

Há um tempo já se sabia que ao direcionar certa radiação (como a luz) em uma placa metálica, os elétrons absorviam energia e saiam do chamado estado fundamental e eram "arrancados" da placa. Acreditava-se também que quanto maior a intensidade de luz direcionada a placa e maior sua energia, maior seria a intensidade da corrente elétrica gerada (maior a energia cinética dos elétrons ejetados da placa), o problema era que: isso não se verificava na prática! Mesmo com alterações na intensidade da luz, se esta tivesse frequência muito baixa, elétrons não eram emitidos.

Até que um tio meu conseguiu desvendar um dos maiores quebra-cabeças da época... O tio "Alberto". Ele usou um fato já conhecido por nós que é: a luz pode ser interpretada como "pacotinhos de energia" (chamados de fótons), não sendo necessariamente contínua, além disso usou a descoberta de meu pai, Max Planck, sobre as frequências da luz serem "quantizadas" (ou seja, seguem uma quantidade ou valor específico, seguem uma multiplicidade).

O que ele disse pode ser basicamente explicado com uma analogia a um supermercado: quando alguém vai às compras, quanto mais dinheiro tem, mais coisas consegue "retirar" do mercado (comprar), mas existe também um valor mínimo para que ela possa retirar alguma coisa: o preço do produto mais barato. Assim, se o produto mais barato custa 5 "dinheiros" e se você tiver 4 ou 4,5 ou qualquer valor menor que esse mínimo, não consegue levar nada desse mercado, passando reto por ele; mas se vocês tem a partir de 5 dinheiros, já consegue levar um produto do mercado e se for o caso, com o dinheiro que sobrar você pode comprar uma cestinha melhor para ajudá-lo carregar mais rápido o que você comprou.

A luz incidindo numa placa pode ser interpretada de forma análoga, é necessária uma certa quantidade de energia para a luz remover um elétron de um metal, essa energia (está associada a uma frequência e) precisa ser maior que a energia de ligação que mantém o elétron na placa. Ou seja, quando a luz é lançada ao metal, se os "pacotinhos de energia", fótons, tiverem energia suficiente para quebrar uma ligação retirar um elétron da placa, são absorvidos e o fazem; quando "sobra" energia, essa é convertida em mais energia cinética dos elétrons (o elétron fica "mais rápido"), gerando, desse modo, mais intensidade de corrente. No caso, onde a energia do fóton não é suficiente, este apenas "passa reto", isto é, não é absorvido.

...E foi com essa explicação que tio Alberto resolveu o mistério do efeito fotoelétrico ganhando um prêmio Nobel de Física e trazendo grandes avanços para Física Moderna.

Ps.: meu tio tem um sobrenome um pouquinho mais famoso, talvez você o conheça por esse... Mas como era mesmo? Algo começado por "E" (tipo o da fórmula $E = mc^2$)... Puxa! Não consigo me lembrar... Talvez algo terminado com "pedra"?? Não sei...

9.10.10. Aluno 1L

Era uma vez um grupo de jovens que desejavam se tornar estudantes de Física. Os jovens queriam passar numa universidade de prestígio; entretanto, sabiam que existiam poucas vagas disponíveis e que eles teriam que estudar muito para conquistá-las. Para passar no vestibular, a frequência de estudos dos alunos devia ser alta; entretanto, as notas de corte para diferentes universidades é diferente, ou seja, a frequência de estudos pode ser maior ou menor dependendo da universidade. Simples, não?

Para esclarecer melhor o caso, temos que o esforço para ser aprovado no curso de Física, ou seja, a frequência de estudos, seja igual à frequência de uma onda eletromagnética, com a função trabalho W_0 sendo comparada à nota de corte das universidades. Ora, as universidades têm notas de corte diferentes — comparando as universidades aos diversos metais, temos que a função trabalho dos metais terá diferente, possibilitando a entrada de alunos (ondas eletromagnéticas) com frequências diferentes. Aprofundando a questão da função trabalho, temos que ela é a energia necessária para tirar um elétron da camada de valência, ou seja, para eliminar um concorrente no vestibular!

- L^{EM}

Julho						
D	S	T	Q	Q	S	S
1	2	3	4	5	6	
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

Agosto						
D	S	T	Q	Q	S	S
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Setembro						
D	S	T	Q	Q	S	S
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

Outubro						
D	S	T	Q	Q	S	S
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

Novembro						
D	S	T	Q	Q	S	S
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

Dezembro						
D	S	T	Q	Q	S	S
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

Fimplas

10. Produto Educacional



Um conto, um quantum: Investigação do potencial de séries de narrativas discretas para a introdução de tópicos da Teoria Quântica em sala de aula

Bruno Maurício Batista de Albuquerque

Produto Educacional de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do ABC (UFABC) no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadora:
Profa. Dra. Graciella Watanabe

Santo André
Fevereiro de 2020

Sumário

1. Ao professor	3
2. Proposta Geral	6
3. Conto de Introdução	10
4. Primeiro conto: Eu, um universo de átomos! Um átomo no universo!	13
5. Segundo conto: Uma conversa entre (á)tomos e a dinâmica do progresso científico.....	18
6. Terceiro conto: A luz é uma onda!(?)	23
7. Quarto conto: Crise sombria projetada pela luz de uma lâmpada	28
8. Quinto conto: A luz é uma partícula!(?)	32
9. Sexto conto: Abrindo os olhos para uma nova noção de realidade	37
10. Atividade complementar: Medindo a constante de Planck h	41
10.1. Proposta.	41
10.2. LED's.....	41
10.3. A hora e a vez da... abordagem matemática!	42
10.4. Mãos à obra!	43
10.4.1. Materiais e montagem.....	44
10.4.2. Procedimento.	44
10.5. Análise	45
11. Atividade de Fechamento: Transformando o Efeito Fotoelétrico em Narrativa	47
11.1. Introdução	47
11.2. Proposta	47
12. Material auxiliar para a introdução ao Efeito Fotoelétrico	50
13. Bibliografia	66

Capítulo 1

1. Ao professor

Caro professor,

Este material foi elaborado em função de uma exigência louvável do programa MNPEF (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) para aquisição do grau de mestre em Física. Ele compõe o chamado “produto educacional”, um instrumento independente à dissertação convencional que possa ser destinado ao professor de Ensino Básico com o propósito de auxiliá-lo em sua prática docente cotidiana. Visa, ainda que indiretamente, viabilizar e fomentar a troca de ideias e experiências entre professores de Física para que, construtivamente, possam colaborar para progressivas melhorias aplicadas ao ensino desta disciplina. Posto o fosso existente entre a prática real que, em média, permeia o contexto verdadeiro do professor de Física e a condição na qual se gostaria de vislumbrar o seu processo de ensino-aprendizagem, faz-se necessário acionar a comunidade de professores para, de alguma forma, coligir fatos que os permitam resolver os problemas ou dificuldades que se colocam. Neste sentido, o “produto educacional” tem o mérito de oferecer um caminho para o diálogo que estimula a problematização, permite o compartilhamento de vivências e agrega as contribuições do Ensino Superior sobre reflexões acerca da atuação pedagógica em níveis mais elementares.

Este produto, em particular, surge como resposta a obstáculos enfrentados pelo autor em sua trajetória específica. Encarregado de ensinar tópicos da Velha Teoria Quântica a alunos do 2º ano do Ensino Médio (logo após ter trabalhado o assunto “Máquinas Simples” – polias, alavancas e planos inclinados), constatava empecilhos explícitos quanto à suficiente apreensão das ideias de quantização, essencial como ponto de partida e fundamental para a compreensão dos temas sobrevindos. Vários eram os entraves que afetavam os resultados finais: além do enorme “gap” temporal entre os tópicos anteriormente citados, a inserção da noção de quantum de energia era, por força do tempo, colocada de forma súbita

e abrupta, com pouca margem para a discussão de exemplos paralelos que fortalecessem a ideia principal. Além disso, com um enfoque excessivo na resolução de questões sobre Velha Teoria Quântica tais como as cobradas por grandes vestibulares, incentivava-se a reprodução mecânica que, depois de número aceitável de exercícios, poderia, sim, revelar êxito no domínio da operacionalização mas, quase sempre, desnudava também uma falta de consciência acerca dos significados dos resultados finais obtidos e das potenciais aplicações cotidianas.

Na tentativa de oferecer uma via que atenuasse os problemas relatados e preencha as lacunas existentes, concebemos este material. Por meio de uma série de narrativas, ele intenta pavimentar um caminho sólido que ofereça, aos alunos, a possibilidade de trânsito dos esquemas tipicamente clássicos para as já revolucionárias ideias da Teoria Quântica em seus primórdios. Além de suavizar este percurso, os textos, enquanto conjunto, procuram explorar o real potencial das narrativas como mecanismos adequados para o ensino de Ciências em ampla perspectiva. Mais do que permitir uma aproximação gradativa e sucessiva ao conteúdo em sua versão última (geralmente expressa por uma ou mais equações matemáticas, possivelmente ásperas para os alunos menos experientes), acredita-se que as narrativas podem, também, carregar o mérito de ilustrar e de apresentar uma ciência sócio-histórica que detém um lugar bem definido no espaço e no tempo e que interage com outras disciplinas. “Como se dá a articulação entre ciência e sociedade”? “Esta articulação sempre se processou da mesma forma com o transcorrer dos séculos”? “De onde extrair o dinheiro para financiar o trabalho científico”? Ensinar Física e qualquer outra ciência passa, também, pela abordagem destas questões. E, posta a experiência adquirida pela aplicação deste instrumento de ensino, pensa-se que as narrativas podem se mostrar extremamente adequadas para atender a esta demanda.

No mais, temos a plena certeza de que o material aqui apresentado não consiste de uma referência absoluta, apta a ser considerada, nesta versão final, em todo e qualquer contexto escolar. Representa, sim, um esqueleto flexível sobre o qual devem ser impostas alterações e adequações para que se ajuste a um contexto escolar específico. Exposta esta consciência, colocamo-nos à disposição para compartilhar experiências e, também, para receber comentários acerca de sua

aplicação. A ação coletiva nos parece, certamente, o melhor caminho para a conquista do êxito legítimo. Neste sentido, você, professor, é o nosso maior colaborador! Para você, dedicamos este trabalho e já apresentamos, de antemão, os nossos profundos agradecimentos pela sua atuação e cooperação.

O autor.

Capítulo 2

2. Proposta Geral

Este material constitui de um conjunto de narrativas que têm por grande propósito atenuar as eventuais dificuldades que se constatam quando o aluno de Ensino Básico, independente de sua série, dá os seus primeiros passos no território da Velha Teoria Quântica. A sua unidade, enquanto coletânea de textos, está firmada nesta finalidade e é marcada, também, pelo personagem principal que se envolve nas tramas construídas em cada um dos contos. Peter Planck, um sujeito diminuto – um fóton de luz verde, em verdade – que se beneficia de seu tamanho para guiar o interlocutor por diversas aventuras nos domínios do mundo quântico tem inspiração clara em Peter Pan, o garoto que se recusava a crescer. Várias são as conexões que aproximam Peter Planck de seu “irmão” mais velho e famoso. De início, vale apontar que Peter Pan, enquanto personagem, apareceu pela primeira vez no livro *The Little White Bird* (1902), de James Matthew Barrie que, posteriormente, rendeu uma adaptação ao teatro intitulada *Peter Pan, or The Boy Who Wouldn't Grow* – que estreou em Londres em dezembro de 1904. Os seus primeiros registros remetem ao início do século XX, época que também corresponde ao surgimento da noção de quantização de energia a que se presta a tratar por aqui.

Quando se transita de um contexto em que “pequeno” está referenciado no tamanho de uma criança para outro no qual “pequeno” se coloca em relação ao átomo e/ou à molécula, passa-se de Peter Pan para Peter Planck. E o fato daquele carregar vestes/roupas verdes não poderia ser mais oportuno para nossa construção fictícia: entre as cores do espectro visível, o verde de 555 nanômetros é aquela para a qual o olho humano tem maior sensibilidade em condições de visão fotópica (ou seja, com fluxo luminoso em valor suficiente para a conveniente distinção de cores). Em termos metafóricos, tal fato significa que Peter Planck, enquanto fóton de luz verde, detém a capacidade de sensibilizar, ao máximo, os olhos do leitor, permitindo-o enxergar, da forma mais lúcida possível, as estranhezas e peculiaridades típicas do universo quântico.

Os contos aqui propostos podem ser utilizados como um todo ou em partes isoladas, selecionadas de acordo com o grau de profundidade que o professor quer atingir em sua abordagem e, também, do tempo que dispõe, em sua programação anual, para se dedicar ao tema. Com a intenção de otimizar o seu aproveitamento e oferecer condições mínimas para que o docente defina um encaminhamento para as suas aulas em função do conteúdo aqui presente e das estratégias implicitamente sugeridas pelos textos, cuidar-se-á de apresentar, logo em seguida, sucintos comentários acerca da divisão deste trabalho e, também, pequenas sinopses de cada um dos contos elaborados.

Enquanto estrutura inteiriça, o trabalho consiste de uma coleção de 9 textos, havendo, em esquema sequencial, um conto de introdução/abertura para apresentação do projeto ao aluno, seis contos principais, uma atividade complementar de caráter experimental para determinação da constante de Planck e, finalmente, uma atividade de fechamento com o propósito de estimular uma produção, por parte dos estudantes, que seja capaz de avaliar a qualidade da aprendizagem em consonância com a estratégia de ensino posta em execução. De forma mais específica, temos o seguinte quadro-resumo:

	Resumo
Texto de Introdução	Comunicação da proposta, com a apresentação (em termos mínimos) do personagem e de sua intenção ao longo deste e dos próximos textos: o de guiar o interlocutor por uma viagem pelos domínios quânticos. Em uma primeira interação com o leitor, propõe-se um experimento mental capaz de instigar a construção de uma imagem mais adequada do que seria uma “imersão” no universo da molécula, do átomo e das partículas subatômicas.
1º conto	Começo da viagem. Discussão sobre os roteiros que pautam as “viagens científicas”, formulados segundo um esquema de perguntas e/ou ações que guiam o avanço do estudo de qualquer fenômeno científico. Incorporação do debate “atomistas x continuístas”. A partir da vitória dos atomistas (atestada no século XX pela correta aproximação fornecida ao movimento browniano), cumpre-se com uma caracterização inicial do átomo e das quantidades dele presentes, segundo estimativas, em diversos corpos ao nosso redor.
2º conto	Discussão mais aprofundada sobre a noção de átomo. Considerar diferentes “tipos” de átomos (elementos químicos) abre caminho para partículas subatômicas e, portanto, para um átomo divisível – bem diferente daquele imaginado pelos gregos Demócrito e Leucipo. Aproveita-se o

	cenário para caracterizar o progresso científico como descontínuo e irregular e, ao final, sugere-se ao leitor uma reflexão acerca deste processo e das conexões que a Ciência estabelece, direta e indiretamente, com a sociedade.
3º conto	Contextualização do “ambiente histórico” que permeia o surgimento da Velha Teoria Quântica enquanto estrutura. Introdução ao problema da “Radiação dos Corpos Aquecidos” e, a partir dele, conceituação de ondas eletromagnéticas – com diversas aplicações cotidianas. Tratamento adequado do comprimento de onda (λ) e da frequência (f) como propriedades ondulatórias úteis, neste caso, pra distinguir diferentes tipos de ondas eletromagnéticas. Neste texto, a luz é apresentada como onda eletromagnética.
4º conto	Retorno ao problema da “Radiação dos Corpos Aquecidos” para, em dada temperatura absoluta (T), oferecer condições para a construção do seu espectro de emissão. Problema histórico: a versão experimental do espectro não se adequa à proposta teórica derivada da Física Clássica (lei de Rayleigh-Jeans). Problema comercial e tecnológico (vinculado às lâmpadas incandescentes, que emitem a partir de filamentos aquecidos): alto consumo energético para, em contrapartida, extrair-se pequeníssima fração desta energia na região do espectro visível. Tal fato motiva a substituição tecnológica por opções mais eficientes, entre as quais se situa o LED.
5º conto	Defesa da Física Clássica enquanto edifício sustentado por Mecânica, Termodinâmica e Eletromagnetismo, desde que respeitado um “domínio de validade” (e/ou “de aplicação”) para ela. Discussão ligeira acerca do que é o “domínio de validade” de um constructo científico. Revisão de algumas noções clássicas para o ingresso no “mundo do muito pequeno”. Introdução à quantização de energia dos osciladores, tal como sugerida por Max Planck, para a conveniente (e paradoxalmente estranha, aos olhos do próprio Planck) resolução da crise instaurada sobre a Física Clássica a partir do problema da “Radiação dos Corpos Aquecidos”. Ao final, paira a questão sobre como interpretar a luz e outras radiações eletromagnéticas segundo uma perspectiva dual: ondulatória e corpuscular. Toma-se esta questão como mote para o último conto principal da série.
6º conto	“Abrir os olhos para uma nova noção de realidade” (ligeira adaptação do título deste último conto principal) significa estimular a passagem de uma descrição sensível (isto é, fundamentada nos sentidos – principalmente o da visão, que associa cores, formas geométricas e outras propriedades a tudo o que nos cerca) para outra completamente abstrata, nas quais os objetos matemáticos tomam parte central. Ou seja: desenhar um átomo,

	<p>uma molécula ou qualquer ator relevante na novela da Mecânica Quântica, tais como realmente o são, é totalmente incabível. Nada, é claro, impede a concepção de representações didáticas e a construção de analogias que sirvam a alguns propósitos específicos e limitados em quantidade e alcance, mas deve-se ter plena noção de os aspectos gerais são, sim, contemplados nas equações que descrevem como os objetos interagem entre si. Usa-se, neste caso, o exemplo do quantum de energia de radiação (denominado fóton desde 1926). Aproveita-se a oportunidade para revelar a natureza fundamental do personagem Peter Planck: um fóton de luz verde.</p>
<p>Atividade Complementar</p>	<p>Na tentativa de oferecer uma passagem ainda mais explícita para a perspectiva científica, marcada genuinamente por uma linguagem matemática e por um casamento frutífero com a experimentação, esquematiza-se um aparato simples para determinar, pelo manuseio de LED's, uma estimativa para a constante de Planck h.</p>
<p>Atividade de Fechamento</p>	<p>Introduz-se o Efeito Fotoelétrico e sugere-se um conjunto de experimentos mentais aos alunos – que devem conduzi-los para, ao final, responder a algumas perguntas estratégicas sobre o fenômeno. Observando-se que algumas das respostas manifestam comportamentos tipicamente clássicos e que algumas delas não se ajustam às observações que derivam da execução real do experimento, apresentam-se os benefícios advindos da quantização da energia da radiação eletromagnética para descrever corretamente o efeito, explicando-o em todas as suas nuances a partir da interação entre fótons e elétrons. Atingido um grau mínimo de entendimento e compreensão, solicita-se aos alunos que transformem aquele conteúdo físico em uma narrativa (na forma de texto corrido ou de versos rimados, em 1ª ou 3ª pessoa e, por ventura, com personagens fictícios) que seja capaz de guiar o interlocutor em uma viagem fantástica pelo Efeito Fotoelétrico e por todas as suas características – comentadas segundo uma roupagem formal na curta aula que antecedeu a proposição da atividade.</p>

Capítulo 3

3. Conto de Introdução

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primórdios da Teoria Quântica

Introdução/Apresentação

Viajar... Ah! Viajar é muito bom, não é mesmo? Desbravar novos lugares, ter a chance de visitar outros já conhecidos (e, quem sabe, olhá-los sob uma perspectiva diferente), viver aventuras, registrar e relembrar momentos e experiências etc. Mas... Nem sempre há tempo ou condições de sair passeando por aí, não é mesmo?! São nesses momentos que “pedimos socorro” à nossa imaginação para viajar sem sair do lugar! Ela, extremamente criativa, está sempre ali, acessível e pronta para nos carregar por diferentes roteiros que, ao final, nos conduzem a terras mágicas, a lugares maravilhosos... A universos jamais explorados pelo homem!

Eu, Peter Planck, quero carregá-lo numa dessas viagens. Ou melhor: por uma viagem que, apesar de não ter nada de mágica, é incrivelmente deslumbrante! “Viagem deslumbrante sem magia? Como pode?” – você me perguntaria. Oras! Podemos aproveitar andanças por um universo cheio de fenômenos fascinantes ao senso comum, mas que, realmente, possuem uma explicação coerente sustentada por uma teoria científica poderosíssima! Para você ter uma ideia do mundo que pretendemos investigar, vamos já começar por um experimento mental. Com a tecnologia presente nos dias atuais (e também com um pouco de treinamento físico, é claro), vou fazer de você um astronauta e vou levá-lo à Lua. Chegando lá, vou pedir que você compartilhe comigo, a partir de algum meio de comunicação, a sua visão da Terra a partir da superfície lunar. O que você enxerga? Quer, por favor, descrever o que o seu “olhar” diz no espaço abaixo?

Em seguida, quero que você faça a sua viagem de retorno à Terra e me conte quais os resultados de suas observações à medida que vai se aproximando do nosso planeta. Tenho certeza de que novos “itens” vão surgindo à medida que você fica mais pertinho da superfície, não é mesmo? Quais novos objetos você passa a ver à medida que fica mais pertinho do solo terrestre? Divida essa experiência comigo nas linhas a seguir! Por favor! Estou ansioso pelo seu relato!

Ótimo! Vamos, enfim, a uma reflexão mais profunda: já pensou que, se os seus olhos fossem extremamente sensíveis, você deveria experimentar sensação muito parecida quando os aproximasse bastante dessa folha de papel que está lendo nesse momento? Ou, de repente, de qualquer objeto a seu redor? Todo objeto que se coloca ao seu redor (essa folha, a cadeira onde está sentado, o celular que se esconde no seu bolso, o seu próprio corpo etc.) é um universo formado por uma quantidade incrível de porções menores – tal como o universo que você conhece é formado por quantidade enorme de galáxias, estrelas, planetas, satélites naturais, asteróides e tantos outros corpos celestes. Conhecer essas “porções menores” de forma mais íntima e próxima é a grande aventura da viagem que lhe proponho.

Humm... Algo me veio à mente: talvez você esteja achando estranho viajar com um “quase-completo” desconhecido. “Quase-completo” porque você sabe o meu

nome! E só! Para que você se sinta um pouco mais confortável, vou usar algumas linhas para falar a meu respeito. E vou começar por um detalhe que vai lhe surpreender: eu sou um pequeno garoto que se recusa a crescer! E tenho um propósito por trás disso: ter a capacidade de passear tranquilamente por esse universo das “porções menores” que existem por trás de todos os objetos que estão ao nosso redor e, assim, carregar muitos amigos e amigas em viagens fantásticas por esse “mundão minúsculo” que esconde uma série de fenômenos intrigantes e extremamente úteis para entendermos fatos do seu dia-a-dia. “Eita! Quão pequeno você é para dar conta de “passear” por esse universo? Qual o seu tamanho?”. Há uma chance enorme de que esta pergunta tenha lhe ocorrido. Por enquanto, fica uma resposta imprecisa: sou muito, MUITO pequeno! E completo com uma garantia: à medida que as nossas aventuras forem se passando, você vai ter a chance de criar uma ideia melhor e cada vez mais real a respeito. Esteja certo(a) de que, na condição de guia turístico, serei criativo, inventivo e cheio de energia – tal como uma criança. Por outro lado, terei sempre o cuidado de me manter fiel à Ciência que pergunta e que também responde sobre tudo o que acontece no domínio destas partes minúsculas da matéria. Esta é uma lição que me foi ensinada pelo meu pai, Max Planck, um grande cientista alemão que você também terá a chance de conhecer melhor.

Neste momento, fica o convite: vamos juntos? Preparado(a) para embarcar nesta viagem extraordinária? Venha! Tenho certeza de que você não vai se arrepender!

Capítulo 4

4. Primeiro conto: Eu, um universo de átomos! Um átomo no universo!

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Primeiro conto: “Eu, um universo de átomos! Um átomo no universo!”

Sempre que a ideia de uma nova viagem nos surge, é extremamente conveniente buscar informações prévias sobre os lugares a serem visitados para que possamos aproveitar o máximo deles quando estivermos por lá. Por mais que esta nossa proposta seja um tanto quanto “excêntrica” em relação a uma excursão tradicional... Convém fazermos o mesmo! É chegada a hora, então, de traçarmos um roteiro de viagem!

Opa! As semelhanças param por aí! Ou você achou que os roteiros para essa nossa viagem seguiriam a mesma estrutura daqueles convencionais?! Doce engano! Esta, aliás, é uma das grandes lições que aprendi com meu pai. Certa vez, ele me ensinou que, na prática científica, o planejamento da rota é, em geral, feito por muitas pessoas (de forma independente ou respeitando um esquema de colaboração), montado em uma estrutura de perguntas e respostas e ajustado continuamente à medida que a viagem vai ocorrendo!

“Olha lá! Que loucura! Quem já viu? Um guia de viagens repleto de perguntas! Quem quer saber de colocar perguntas num papel onde só deveriam aparecer os lugares, em sequência, a serem visitados dentro do tempo disponível? Que coisa mais... Sem sentido!”. Acredite: eu te entendo perfeitamente! Mas a jornada que eu, **Peter Planck**, quero lhe propor é tal qual a de um cientista. E um cientista, via de regra, desbrava mares nunca antes navegados. Ele(a) sempre tem, diante de si, uma verdadeira caixa preta que esconde os mais profundos mistérios. Definir, com precisão, o que existe no seu interior depende, antes de tudo, da formulação elaborada e minuciosa de questionamentos que, quando

devidamente respondidos, trarão luz aos olhos que antes não enxergavam! Portanto, perguntar, de forma precisa, é decisivo e muito importante para que, em função das respostas, possam ser feitos ajustes regulares na trajetória de pesquisa.

Para melhor explicar essa parte, quero lhe proporcionar, talvez, a mais estranha dentre as aventuras científicas que você já viveu! E vou fazer isso propondo uma experiência que você pode conduzir com um material muito simples: ovos! Numa pequena amostra de ovos, você seria capaz de descobrir quais os que estão crus e quais estão cozidos? Muito importante: SEM QUEBRÁ-LOS! Faz ideia das experiências a serem conduzidas para, além de separá-los, identificar quais são os crus e quais são os cozidos? Que tal expressar as suas sugestões no espaço abaixo?

Talvez as suas propostas, trazidas nas linhas acima, estejam ligadas mais a ações do que a perguntas. Mas, esteja certo: espera-se que tudo o que você escreveu possa ser traduzido para uma sequência de perguntas que, enquanto conjunto, compõe um...

... ROTEIRO (veja só) a ser respeitado! Imagina-se que, entre uma pergunta e outra, você seja capaz de conduzir uma experiência ou um raciocínio teórico estruturado em linguagem matemática para construir uma resposta e passar à pergunta seguinte (ou mesmo modificá-la, caso o questionamento perca sentido depois dos resultados obtidos anteriormente).

Posso, eu, agora, guia-lo por um passeio científico? O plano da vez é refletir sobre a pergunta: “Do que você e todos os objetos a seu redor são feitos?”. Em outros termos: se pegarmos um objeto – um pão, por exemplo – e se tivermos, à nossa disposição, uma faca incrivelmente poderosa (mais afiada que as famosas lâminas orientais e capaz de cortar em partes tudo o que se coloca

diante dela)... Conseguiremos, para cada porção menor obtida, continuar com infinitas divisões? Ou chegaremos a uma parte última da matéria – que não poderá ser mais dividida? Humm... Talvez você queira expressar o seu entendimento! E... Quer saber? Ele é MUITO IMPORTANTE para mim, pois vai me ajudar bastante a te guiar pelos próximos passos. Por isso, refaço a pergunta: do que você acha que somos feitos? Acha que, se invadíssemos o interior desta folha... encontraríamos ou não um “pedacinho” último impossível de ser dividido? Vamos lá! Agora é com você!

Bom... Pode-se dizer que estas reflexões acompanham a humanidade há milênios, desde os tempos da Grécia Antiga – obviamente, com um rigor filosófico mais apurado e sem referências a facas/lâminas orientais afiadas! No século V a.C., já se havia instalado o debate entre os defensores da matéria contínua (aqueles que acreditavam que os corpos poderiam ser divididos sem qualquer limite, *ad infinitum* – entre os quais citamos Parmênides e Zenão) e os apoiadores do descontinuísmo (Leucipo e seu discípulo Demócrito sendo os principais), que acreditavam fielmente na ideia de uma divisão com limite que, ao final, atingiria um bloco de partes *indivisíveis* às quais denominaram *átomos* (plural de *átomo*, versão grega para o termo “indivisível”). “E aí? Quem venceu essa disputa?” – você deve estar perguntando. Olha! Nenhum entre os personagens gregos citados viveu tempo suficiente para descobrir, em vida, o lado vitorioso. Quer mais? MUITAS gerações de cientistas brilhantes nasceram, pesquisaram e morreram sem contribuir ou simplesmente testemunhar uma solução para este embate que prevaleceu vivo por quase 2 500 anos. A definição do time vitorioso coube a personalidades que estão muito mais próximas de nós no tempo – gente que atuou nos séculos XIX e XX como o italiano Amedeo Avogadro, o britânico Robert Brown, o alemão Albert Einstein e o francês Jean

Perrin. Os vitoriosos? Sim, os atomistas! Provou-se, a partir do movimento errático de grãos de pólen em água, que átomos (já muito diferentes daqueles pensados por Leucipo e Demócrito, é verdade) são essenciais para explicar esta movimentação incessante e tantos outros fenômenos científicos.

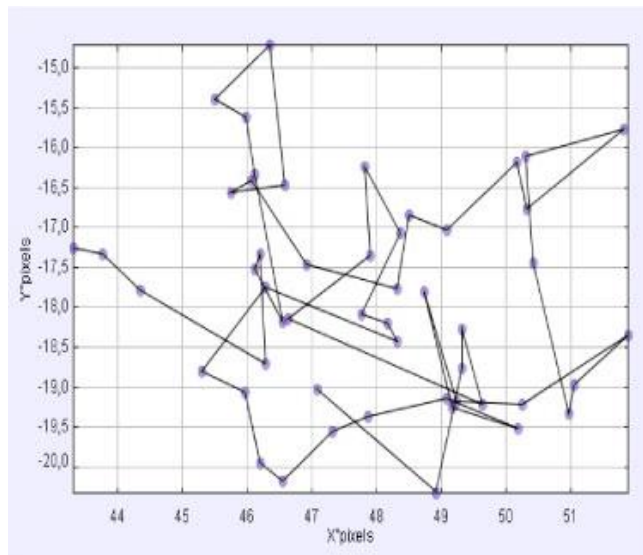


Figura 4.1: Movimento típico de uma partícula browniana (um grão de pólen, por exemplo) em suspensão na água. Extraído de: “Movimento browniano: uma proposta do uso das novas tecnologias no ensino de física”. (http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172011000400015).

“Humm... O pão do nosso exemplo é composto de átomos?” – você perguntaria. Sim! “Quantos átomos existem num pão francês?” – você insistiria. Da ordem de 10^{24} átomos (ou seja, um número 1 seguido por 24 zeros). “Eita! Se o mesmo vale para nós, seres humanos... A quantidade de átomos que existe no nosso corpo deve ser ainda mais absurda” – você concluiria! Pois é! Está certíssimo! No seu caso, haveria cerca de 10^{27} deles. Será que, diante destes números absurdos, você consegue entender a poesia do título deste conto? Vale ressaltar, aliás, que este título não é criação minha, mas é, sim, obra da mente incrivelmente imaginativa do físico norte-americano Richard P. Feynman (1918 – 1988)! Uma pequena mostra em tamanho, mas gigante em significado de que a vida do físico extrapola, por larga margem, as experiências de laboratório, os cálculos de escritório e o ensino em sala de aula.

Fim da linha para a nossa viagem? Óbvio que não! Ela está só começando! O próximo passo é... INVADIR O PÃO FRANCÊS! Ops! Até parece que estou te convocando para uma revolução, não é mesmo? Aliás, Revolução Francesa, diga-se de passagem! Não! Definitivamente não é isso! Quero, sim, te

acompanhar por uma viagem pelos constituintes básicos do pão, do seu corpo...
Enfim, de todos os objetos que nos rodeiam. Por que? Por que são nesses
corpos minúsculos que as leis quânticas atuam. Entender um pouco de Mecânica
Quântica significa compreender a Física no nível destas parcelas muito
pequenas da matéria. Vamos juntos?

Capítulo 5

5. Segundo conto: Uma conversa entre (á)tomos e a dinâmica do progresso científico

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Segundo conto: “Uma conversa entre (á)tomos e a dinâmica do progresso científico”

No final do conto anterior, comentei com você sobre os átomos que compõem os corpos situados ao nosso redor. Aliás... Que compõem o seu corpo inclusive! Hoje, entretanto, sabemos que estes átomos “não são tão átomos assim”!

Eita! Que conversa maluca, não é mesmo? Mas... Fique tranquilo! Eu te explico! Você, por acaso, se lembra que o termo “átomo” tem uma origem grega que significa “indivisível”? Pois bem! De acordo com o significado do termo, não deveríamos ser capazes de dividi-lo e ele seria, portanto, aquilo que chamamos de “parte mais íntima da matéria”, certo? Bom... É, ao menos, o que a palavra parece sugerir. Mas... Acredita que a Ciência descobriu que existem “tipos de átomos” que podem ser diferenciados justamente...

... pela quantidade de outras partículas nele presentes? É assim que surgem personagens dos quais você já deve ter ouvido falar: prótons, nêutrons e elétrons. São estes novos atores da Teoria Atômica que, aparecendo em diferentes quantidades em átomos, permitem diferenciar um átomo de hidrogênio (H) de outro de oxigênio (O) – aqueles que se juntam para formar a chamada molécula de água, H₂O. Em miúdos: a Ciência foi capaz de mostrar que o átomo pode ser “cortado” (ou melhor, que existem partes menores que ele).

Percebendo que, ao longo do tempo, a própria Ciência se viu diante da necessidade da revisão do conceito de “átomo” (pois pensava, em primeiro momento, que tinha chegado às menores frações da matéria e, anos depois,

acabou reconhecendo a existência de entidades ainda menores), você, quase como um legítimo cientista, se faz alguns questionamentos importantes – extremamente legítimos, aliás. Eu, habitante natural deste “mundo do muito pequeno”, te ajudo com as respostas e, então, estabelecemos o seguinte diálogo:

- E os prótons? Podem ser divididos? – você pergunta.

- Sim – eu respondo.

Um pouco furioso (achando que essa brincadeira não vai acabar mais), você prossegue: E os nêutrons? São formados por “coisas” ainda menores?

- Sim – eu retruco, já temendo que você esteja totalmente desconfiado de mim.

Por uma última vez, realmente bravo pela aparente enganação na qual lhe envolvo, você persiste: podemos dizer o mesmo para os elétrons?

- Não, os elétrons não podem ser divididos em entidades menores – digo, agora, com voz trêmula e temerosa, por vê-lo não só FURIOSO, mas também CONFUSO a partir de agora.

Antes que você desista de mim, peço que se acalme, respire e se acostume com essa realidade. Não, veja bem: não tentarei pregar peças em você de forma constante. Lembre-se que, como lhe disse na introdução dos meus contos, tenho o dever de ser fiel à Ciência! E o serei! Juro! Não só a ela, aliás, mas também à sua história – toda cheia de construções e reconstruções, de avanços e recomeços que nos trazem aqui e que, também, estão prontos para nos levar além. Tenho, inclusive, a impressão de que você, a partir do que vê e aprende em sala de aula, tem uma visão muito particular sobre o desenvolvimento científico. Para aprender um pouco com você, convido-o(a) a escrever um pouco a respeito. Para te ajudar, coloco algumas perguntas para você orientar uma reflexão:

1. Como você acha que a Ciência “é feita”? Por pessoas isoladas? Por grupos de pessoas que se ajudam? Em casa? Nos laboratórios? Em que lugares?

2. Conduzir pesquisas científicas é importante? Por que?

3. Existe uma orientação mais adequada para a pesquisa científica? Ops! Acho que essa depende de uma explicação mais detalhada. E, para isso, utilizarei um exemplo. Você acha que a pesquisa científica:

curvas bruscas e, em outros momentos, faz movimentos suaves e bem comportados; que, em tempos, avança vagarosamente (como nas subidas) e, em outros instantes, evolui rapidamente (agora, como nas descidas). E mais importante: uma montanha-russa que, em estágios decisivos, se vê obrigada a retroceder, a voltar para rever alguns dos seus conceitos para, aí sim, seguir seu movimento progressivo, sua rota de progresso – exatamente como nos loops! Emocionante, não?! Os próximos contos, aliás, guardam uma relação com esses capítulo-chave que, pela minha metáfora, são representados pelos loops de uma montanha-russa: o nascimento da Teoria Quântica. E sabe quem é o grande personagem por trás desta “nova” história? Humm... Não vou te contar agora, não. A revelação será feita e descrita daqui a alguns contos! Vamos juntos continuar navegando pelas páginas intrigantes desta história?

Capítulo 6

6. Terceiro conto: A luz é uma onda!(?)

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Terceiro conto: “A luz é uma onda!(?)”

Ei! Psiu! Preparado para retomar a nossa viagem? Opa! Eu espero que sim – afinal, há muita estrada pela frente, há muita coisa a ser aprendida. Mas... Espere! Será que você vai estranhar se eu me propuser a te levar... para trás? Para o passado, digo? Pois é! Neste nosso “roteiro de viagem” (lembra que já conversamos a respeito?), pensar o passado é MUITO importante! Extremamente fundamental para respondermos algumas perguntas.

- Por que surgiu a Teoria Quântica?
- Como ela nasceu?
- Quais são as ideias básicas que a sustentam?
- Qual é o domínio no qual ela se aplica?
- Ela surge como teoria substituta ou complementar àquelas que já existiam anteriormente?

Bom... Chega de questões! Acho que já fui convincente! Está na hora de ligar os motores da nossa “máquina do tempo” – que, aliás, existe e tem nome: IMAGINAÇÃO! Vamos usá-la para passear rapidamente pela Europa da 2ª metade do século XIX (1851 – 1900). 50 anos em poucos parágrafos – uma aventura MUITO mais ousada que a do nosso ex-presidente JK⁴! Neste período, a nossa Física se apoiava em 3 pilares:

- a Mecânica Clássica, sustentada pelas famosas “Leis de Newton” e por uma série de conceitos obtidos a partir de noções elementares.

⁴ Juscelino Kubitschek de Oliveira (1902 - 1976) foi presidente do Brasil entre 1956 e 1961. Reconhecido pelos seus programas e ideais desenvolvimentistas, tinha, em seu governo, a clara proposta de conduzir o país através de sólido e rápido crescimento econômico. “50 anos em 5” era o lema pelo qual ficou famoso o seu “Plano de Metas” de caráter progressista.

- a Termodinâmica, a parte da Física responsável por lidar com a “Teoria do Calor” e por abranger toda o conjunto de fenômenos térmicos (para os quais a temperatura, enquanto grandeza, desempenha papel importante).

- o Eletromagnetismo Clássico, área onde se insere tudo o que está relacionado a fenômenos elétricos e magnéticos.

Naquela época, acreditava-se fortemente na ideia de que a Física, enquanto Ciência ancorada na Mecânica, na Termodinâmica e no Eletromagnetismo, estava “resolvida”. “Consolidada”, alguns diriam. A partir daquele momento, o papel do físico, segundo alguns importantes cientistas, seria o de trabalhar no aprimoramento tecnológico derivado desta Ciência já pronta e feita. Seria o de refinar técnicas que permitissem a execução de experimentos mais e mais precisos. Poderiam surgir novos fenômenos até então não problematizados? Claro! Claro que sim! Mas, conforme a crença da época, se este fosse o caso, as soluções para estes eventuais fenômenos estariam em uma Física já construída e inquestionável.

Ah! Doce ilusão, viu?! E quem trouxe esta ilusão à tona foi o problema chamado “A Radiação Térmica dos Corpos Aquecidos”. Que tal gastarmos as próximas linhas para descrevê-lo um pouco melhor?

Atire uma pedra de carvão para churrasco ao fogo. O que você vê?

Esquente uma peça metálica com a ajuda de um maçarico para amolece-la e forjá-la segundo uma forma que te interesse. O que acontece com o aspecto do metal enquanto é aquecido?

Observe uma estrela. Por que você acha que algumas delas parecem mais avermelhadas e outras mais azuladas?

Coloque-se diante uma lâmpada de filamento de tungstênio. Ops! Talvez você não a conheça. Por isso, compartilho com você, logo ao lado, uma pequena representação desta lâmpada. Como a comercialização destas lâmpadas aqui no Brasil foi completamente proibida desde 2017... É possível que ela esteja fora do seu contexto próximo. Mas, ainda assim, vamos deixar uma pergunta relacionada ao seu funcionamento: o que nela se faz responsável pela produção da luz como resultado?



Figura 6.1: Lâmpada de filamento de tungstênio aquecido.

Situações diferentes, respostas equivalentes. Todos os corpos que se encontram à temperatura $T > 0 K$ (*kelvin*)⁵ irradiam. E, quando aquecidos... Irradiam mais ainda!

Epa! EPA! Devagar, devagar! Afinal, os primeiros termos técnicos estão surgindo. “Irradiar”, aqui, significa enviar/emitir algo. “Você irradia alegria para todos a seu redor!” é, por exemplo, uma frase que, apesar de envolver outro contexto, traz a mesma ideia “do envio/da emissão” da qual a Ciência se apropria. No caso científico, entretanto, o que se irradia são...

... ONDAS ELETROMAGNÉTICAS!

Estas ondas são as responsáveis pelas telecomunicações, pelos sinais 4G captados pelo celular, pelo sinais de WiFi presentes em diversos lugares, pelo transporte das informações que chegam à sua televisão, pelas ondas de rádio que te permitem sintonizar a sua rádio favorita, pelas micro-ondas que esquentam a sua comida de forma prática, pelos raios-X tão importantes no diagnóstico de doenças etc. Deu pra ter uma ideia da importância destas ondas? Pois... Sente na cadeira e prepare-se para o mais importante exemplo: são graças a ondas eletromagnéticas que... VOCÊ ENXERGA! Sim! A luz é uma onda eletromagnética!

Todas essas ondas “passeiam” pelo espaço vazio a uma incrível velocidade. A maior entre aquelas que podem ser fisicamente registradas: 299 792 458 *metros/segundo* (valor que é comumente aproximado para 300 000 000 *metros/segundo*). Tão grande que, sem embarcássemos numa viagem a bordo de um feixe de luz, seríamos capazes de descrever 7,5 voltas no Equador terrestre em apenas 1 SEGUNDO! UAU! Incrível, não?

Se todas as ondas eletromagnéticas têm na velocidade de propagação pelo espaço vazio um item comum... Elas também mantêm algumas diferenças entre si. Entre tantas, começaremos por duas delas: comprimento de onda (representado pela letra grega λ – lê-se “lambda”) e frequência (f). Considerando esta onda como um “vai-e-vem” que se repete, cheios de picos (pontos de máximo) e vales (pontos de mínimo) que se alternam, entende-se o comprimento

⁵ “kelvin” (representação: K) corresponde a uma unidade de temperatura dita “absoluta”, uma vez que os valores de temperatura expressos nesta escala são todos positivos. Uma vez que a temperatura guarda relação com o grau médio de agitação das partículas (átomos e/ou moléculas) que compõem um corpo, o $0 K$ (zero kelvin) corresponde à temperatura associada ao estado teórico no qual estas partículas estariam completamente “paradas”, sem agitação (esta temperatura seria próxima de $-273,15^\circ C$). Dada uma temperatura C em graus celsius ($^\circ C$), diz-se que a sua correspondente temperatura T em kelvin é dada por: $T = C + 273,15$.

de onda λ como a distância entre dois picos consecutivos (ou entre dois vales seguidos). A frequência f , por outro lado, corresponde à quantidade de ciclos realizados/descritos em cada segundo, em cada minuto... Enfim... Em cada unidade de tempo! Por exemplo, falas do tipo “eu vou à escola 5 vezes à cada semana” ou “eu pedalo por 4 vezes no mês” representam informações de frequência. Nas ondas eletromagnéticas (assim como em qualquer outra onda), a comparação entre as frequências de duas ou mais ondas que mantêm as mesmas velocidades pode ser feita a partir da quantidade de picos (ou vales) presentes ao longo de uma distância ou de um intervalo de tempo escolhido: quanto mais picos/vales, maior a frequência da onda!

A figura abaixo ilustra duas ondas 1 e 2 que possuem a mesma velocidade de propagação – e que, desta forma, percorrem as mesmas distâncias à medida que o tempo avança. Apesar das velocidades serem as mesmas (por hipótese) existem algumas diferenças. Humm... Será que você concorda com os comentários que a seguem?

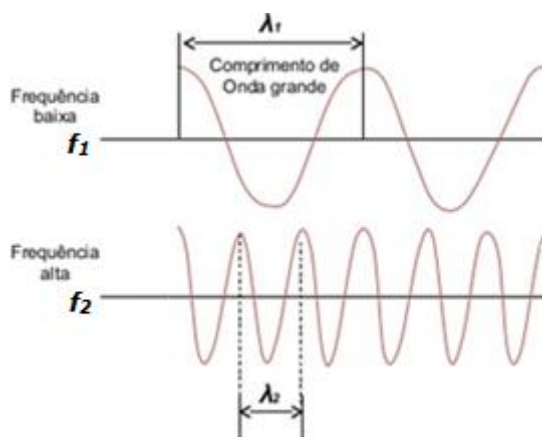


Figura 6.2: Comprimento de onda (λ) e frequência (f) em ondas periódicas.

- A distância entre picos seguidos é maior na onda 1 do que na 2. Desta forma, temos: $\lambda_1 > \lambda_2$.
- Entre os extremos esquerdo e direito nos perfis ondulatórios traçados, é possível perceber uma quantidade menor de picos na onda 1 do que na 2. Sendo assim, concluímos: $f_1 < f_2$.

E aí? Notou?! Acho que sim, né?! Quanto maior o comprimento de onda λ , menor a frequência f . E são estas propriedades que utilizamos para separar em

diferentes tipos as ondas eletromagnéticas conhecidas (a luz visível, as micro-ondas, as ondas de rádio, os raios X já citados nos exemplos de aplicação). A classificação, aliás, nos leva ao seguinte quadro:

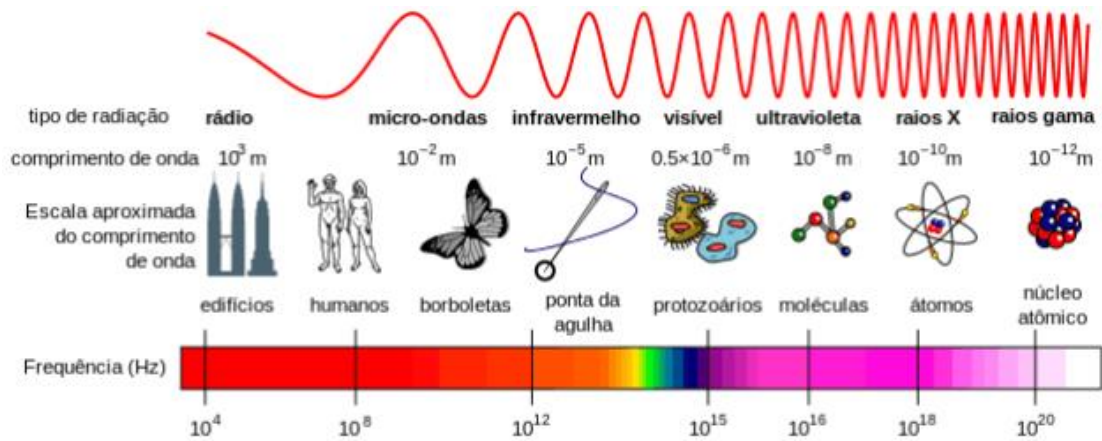


Figura 6.3: Diferentes tipos de ondas eletromagnéticas e as correspondentes ordens dos valores de seus comprimentos de onda (λ) e frequências (f).

Reforçando: é muito importante perceber que, à medida que passeamos na figura acima desde as ondas de rádio e micro-ondas até os raios X e raios gama, o comprimento de onda diminui e, como “compensação” a frequência aumenta. Desta forma, comprimento de onda e frequência servem para identificar tipos de ondas eletromagnéticas. São úteis para diferenciar, por exemplo, uma onda de rádio de uma luz visível.

E aí? Tubo bem até aqui? ÓTIMO! Porque o próximo passo é voltar aos corpos aquecidos que discutimos há pouco. E sabe quando iremos fazer isso? Não, não é agora! Vamos deixar isso para um próximo capítulo. “Segure um pouco a sua onda!” Em breve, você descobrirá coisas fascinantes sobre o comportamento da luz e de outras “ondas eletromagnéticas”! Até a próxima, meu (minha) amigo(a) viajante!

Capítulo 7

7. Quarto conto: Crise sombria projetada pela luz de uma lâmpada

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Quarto conto: “Crise sombria projetada pela luz de uma lâmpada”

No conto anterior, aprendemos, juntos, algumas coisas importantes sobre “irradiação”. O termo tem, sim, uma aparência meio assustadora (se você assistiu a série “Chernobyl”... tem uma breve ideia do que quero dizer, não é mesmo?!). Existe, sim, uma relação científica entre “irradiar” e “radioatividade”. E este “link”, inclusive, envolve um pouco do nosso contexto que, anteriormente, abriu caminho para as chamadas “ondas eletromagnéticas”. O “irradiar” está associado à emissão de ondas eletromagnéticas por um corpo aquecido. Melhor ainda: por um corpo que esteja a qualquer temperatura acima do zero absoluto. Fato é que, quando maior for a temperatura do corpo emissor... maior a quantidade dessas ondas emitidas por ele a cada segundo que se passa.

Algumas das ondas eletromagnéticas citadas (principalmente os raios X e os raios gama) surgem a partir de processos radioativos. Mas... Não é essa a discussão que queremos colocar aqui. Para ela podemos, quem sabe, reservar uma OUTRA série de contos. Quero, por outro lado, trazer à tona uma outra verdade intrigante: neste momento, você e todos os corpos a seu redor estão emitindo ondas eletromagnéticas para o espaço. Não consegue vê-las, não é mesmo (e por isso, talvez, duvide, inicialmente da minha fala)?! Perfeito! Você está atuando de forma próxima a de um cientista genuíno! Legítimo! Desconfiar é sempre o primeiro passo na orientação dos questionamentos que, se bem feitos, levarão às respostas necessárias à compreensão de fenômenos científicos.

Você não vê pois, de todo o conjunto de ondas eletromagnéticas, só uma fração pequeníssima pode sensibilizar o seu olho: a luz visível. Boa parte daquilo que você emite está na faixa do infravermelho – nas chamadas “ondas de calor”. Para melhor lidar com ela, faço-lhe uma proposta: reúna um conjunto de amigos para, juntos, enfrentarem um metrô lotado por um tempo razoável. Por mais que você permaneça sempre no mesmo lugar, sem fazer nada além de respirar, vai passar por um desconforto térmico enorme, pois seu corpo está absorvendo aquilo que todos ao seu redor estão emitindo na forma de ondas no infravermelho. Ou seja: pode não ver, mas certamente pode sentir as ondas eletromagnéticas emitidas por todos aqueles a seu redor!

Os físicos da segunda metade do século XIX sabiam que, quanto maior a temperatura (em kelvin) de um corpo, maior a QUANTIDADE TOTAL de ondas eletromagnéticas emitidas por unidade de tempo (mais uma vez: a cada segundo, minuto etc.). Foi, então, que eles resolveram se perguntar: e se quisermos definir experimentalmente e prever teoricamente (ou seja, por cálculos matemáticos), as quantidades emitidas para cada tipo de onda eletromagnética? Isto é: dada a temperatura T de um corpo...

... seria possível definir o quanto ele emite na faixa das ondas de rádio? Das micro-ondas? Da luz visível? Do infravermelho? Do ultravioleta? Fazendo uma analogia com dinheiro: sabendo a sua condição financeira, os físicos do final do século XIX sabiam definir, com boa precisão, o total de dinheiro que você carrega na carteira. O próximo passo, mais audacioso, seria definir como se distribui esse total em moedas de 1, 5, 10, 25 e 50 centavos de real, moedas de 1 real e, enfim, notas de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 reais. E foi neste ponto em que a crise se instalou! Não, não me refiro à crise financeira (até porque, com essa, eu e você já estamos acostumados, né?!). Menciono, sim, a crise na Física Clássica.

A seguir, à esquerda, vemos algumas curvas de emissão para corpos em diferentes temperaturas (em kelvins). No eixo horizontal, nota-se o comprimento de onda – que define o TIPO de onda eletromagnética que é emitida. No eixo vertical, coloca-se a intensidade – que expressa a QUANTIDADE emitida de dada onda eletromagnética. À direita, tem-se um zoom para um objeto cuja temperatura é $3\,000\text{ K}$ (cerca de $2\,727^\circ\text{C}$), algo que, na realidade, corresponde muito bem àquelas lâmpadas de filamento de tungstênio que já não são mais

vendidas aqui no Brasil. Quer, aliás, saber o motivo por trás dessa proibição?!
Opa! Vem comigo!

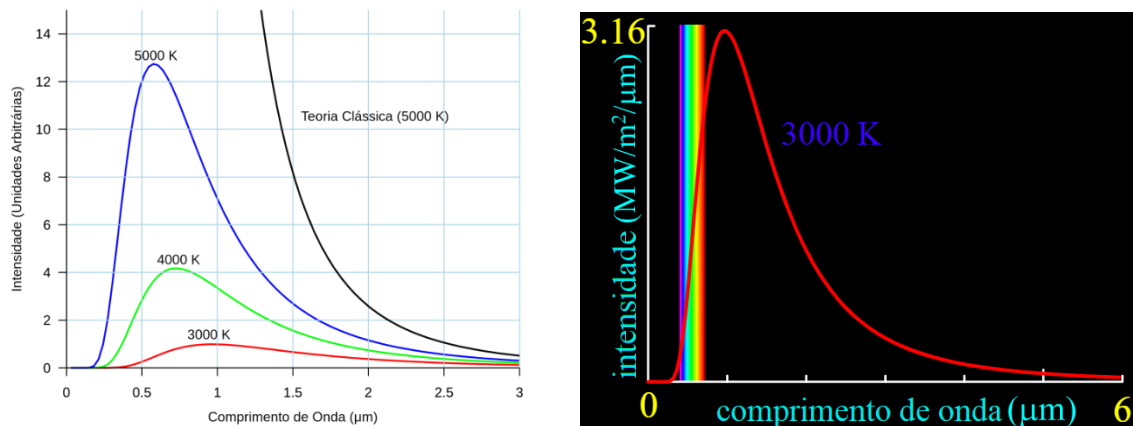


Figura 7.1: Curvas de emissão para corpos a diferentes temperaturas (esquerda). À direita, zoom na curva de emissão de uma lâmpada incandescente (de filamento de tungstênio), cuja temperatura é próxima de 3 000 K.

Na curva da direita – lâmpada a 3 000 K de temperatura – é possível definir uma figura geométrica entre a curva vermelha e o eixo horizontal (onde surgem os comprimentos de onda). Essa região tem a forma de uma montanha, com um pico muito bem definido. Como ela corresponde a uma figura “fechada”, pode-se definir uma área para ela. E esta área tem um significado muito importante pra gente: ela representa o quanto de energia a lâmpada emite a cada segundo que se passa!

Tudo certo? Agora, um detalhe importante: se você observar com carinho, vai perceber que uma fração MUITO PEQUENA dessa área embaixo da curva vermelha está pintada com as 7 cores do arco-íris. Achou? Sabe o que representa a área dessa pequena porção colorida? Exatamente! A energia luminosa (ou seja, na forma de luz) que aquela lâmpada emite, a cada segundo, para o espaço onde é colocada. Muito pequena quando comparada ao todo do parágrafo anterior, não é não?! Pois é! Isso significa que, com aquelas lâmpadas, você paga por MUITA ENERGIA e, como retorno, obtém uma fração PEQUENÍSSIMA de luz para iluminar qualquer ambiente! Um completo incentivo ao desperdício de energia e, conseqüentemente, um grande estímulo ao gasto abusivo de dinheiro (afinal, você paga por toda energia que a lâmpada emite – e não só por aquilo que ela está emitindo na forma de luz). É neste sentido que tecnologias mais econômicas estão chegando para ficar. Os LED's, aliás, correspondem ao “exemplo do momento”!

Para encerrar, vamos voltar ao gráfico da esquerda? Tudo porque é ele quem vai trazer a grande cereja deste conto! Analisando-o, vai perceber a existência de 4 curvas sendo que duas delas estão associadas à mesma temperatura de 5 000 K. Por que, hein?! O que significa isso? Uma, a azul, é obtida com dados experimentais, coletados diretamente em laboratório; a outra, negra, corresponde ao que a Teoria Clássica previa para um corpo naquela temperatura. Ou seja: se você “junta” as leis da Mecânica, da Termodinâmica e do Eletromagnetismo clássicos e desenvolve um trabalho matemático que relacione, graficamente, intensidade e comprimento de onda... Você obtém, como resultado, a curva preta “Teoria Clássica (5 000 K)”. Curva que, convenhamos... NÃO TEM NADA DE PARECIDO COM A CURVA AZUL ESPERADA! Sabe o que isso indica?! SABE?!

QUE A FÍSICA CLÁSSICA NÃO SE MOSTRA ADEQUADA PARA EXPLICAR ESTE FENÔMENO! Tudo porque teoria e experiência não se ajustam! A enorme diferença entre estas curvas (que poderia ser registrada para qualquer temperatura – e não só nos 5 000 K) é que responde pela crise instalada (e já comentada) na Física do fim do século XIX. Para superá-la, ideias novas precisaram ser lançadas. E são justamente essas ideias as que abrem caminho para a Teoria Quântica a que tanto nos referimos! O responsável por trazer estes novos conceitos? O físico alemão Max Ernst Karl Ludwig Planck – conhecido na comunidade científica simplesmente como Max Planck e a quem já me referi no conto de introdução (como meu pai, você lembra?). É neste momento que você fica bem pertinho de conhecer um pouco mais sobre Mecânica Quântica e, de brinde, mais próximo de resolver um mistério que há muito plantei em você: QUEM SOU EU?

Cenas para um próximo capítulo! Até lá!

Capítulo 8

8. Quinto conto: A luz é uma partícula!(?)

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Quinto conto: “A luz é uma partícula!(?)”

Eis que chegamos a um ponto crucial de nossa viagem: a busca pela solução em tempos de crise. Conforme vimos no conto anterior, a chamada “Física Clássica” não se ajustava aos dados experimentais coletados para o problema. E mais: previa a emissão de ondas eletromagnéticas de pequenos comprimentos de onda (λ) com intensidades... INFINITAS (ou seja, em quantidades INCRIVELMENTE grandes em cada segundo de tempo).

Diante desta situação, diríamos desesperados: “E agora? Quem poderá nos defender?”. Não esperemos a chegada do Chapolin Colorado! Vamos, sim, analisar a situação com cuidado. Uma visão inicial talvez sugira que TODA a Física Clássica construída por gerações e gerações de cientistas precise ser apagada e reconstruída do zero. De acordo com esse jeito de olhar o problema, ou temos uma construção científica (a nossa “Física”) estruturada em leis fundamentais e universais dos quais são deduzidos resultados que explicam tudo o que nos cerca ou... Não temos nada! Entretanto, se olharmos para o passado e considerarmos a correta adequação da Mecânica, da Termodinâmica e do Eletromagnetismo clássicos a inúmeros fenômenos físicos e as consequentes contribuições sociais e econômicas que este conjunto clássico nos trouxe, seremos levados a uma postura um pouco mais prudente e diremos: o ponto, aqui, não é jogar toda a Física já construída no lixo! Definitivamente não! A atitude mais honesta é reconhecer que ela tem uma “região de aplicação”, um “domínio de validade”.

Epa! Hora de parar um pouco, pois acho que os termos estão ficando difíceis. “Região de aplicação? Domínio de validade? Não entendi “bulhufas” do que foi

dito!”. É o que se passa na sua cabeça agora, não é? Tudo bem! Totalmente aceitável! E é por isso que eu tenho uma proposta bem simples para você. Olhe para o seu redor e me diga:

- Qual a porcentagem dos seus amigos que, neste momento, carrega um celular consigo?
- Qual a porcentagem dos seus amigos que, agora, estão usando um par de tênis ou de qualquer outro calçado fechado?
- Qual a cor da lousa da sua sala?
- Pelo que você conhece da sua escola: qual(is) a(s) cor(es) das lousas das salas de aula vizinhas à sua (aquelas situadas no mesmo andar, por exemplo).

Veja! Eu não sei a realidade na qual você vive, mas posso imaginar que uma das respostas abaixo tenha surgido a partir da observação do SEU conjunto universo (seu conjunto de amigos e de lousas da sua escola).

- 100% dos meus amigos tem, neste momento, um celular consigo.
Ou seja: TODOS os alunos têm aparelhos celulares.
- 100% dos meus amigos usa, agora, um calçado fechado.
Ou seja: TODOS os alunos usam calçados fechados.
- TODAS as lousas são _____ (verdes, negras, brancas, azuis...
Outra cor? Qual?)

Mas... Você acha que qualquer dessas respostas pode ser EXTRAPOLADA para todas as escolas do Brasil? Dificilmente, não é mesmo?! É exatamente neste ponto que eu gostaria de chegar: as falas acima (qualquer delas) não são completamente descartáveis. Elas são válidas, mas dentro de certo contexto. Este contexto é o “domínio de validade” a que me referi mais cedo.

Na prática científica, esses domínios também existem, com a diferença de serem, é verdade, MUITO MAIS AMPLOS. Senão... Seria uma bagunça! “Esta Ciência é válida apenas na minha escola!” “Opa! Esta Física só vale aqui dentro do meu país!”. Não são estas fronteiras que estabelecem os limites de aplicação da Física Clássica. A questão está, sim, nas escalas de tamanho envolvidas. E

quando chegamos no “mundo do muito pequeno”, dos objetos de dimensões atômicas... Humm... Algumas coisas precisam ser revistas.

O primeiro a revê-las foi o físico alemão Max Planck – como já antecipado no conto anterior. Ele foi o primeiro a abordar o fenômeno da Radiação dos Corpos Aquecidos a partir do ponto de vista atômico, afirmando que o conjunto emitido de ondas eletromagnéticas tinha origem na oscilação das cargas elétricas presentes nos muitos átomos que formam qualquer corpo. Em termos mais simples: dada uma temperatura, os muitos átomos que compõem qualquer corpo se encontram em um grau médio de agitação, movimentando-se para lá e para cá com certa frequência (f) – tal como uma bolinha presa a uma mola elástica. “Oscilar” é o termo que usamos na Física para descrever esse movimento. Bem... Existem portadores de cargas elétricas (prótons e elétrons) dentro destas bolinhas que representam os nossos átomos e estas partículas, quando oscilam, geram ondas eletromagnéticas como resultado – um fato que já era conhecido a partir da Física Clássica, inclusive. Então... “Onde está a novidade?” – você me perguntaria. Ótimo! Chegamos ao ponto chave!

Quando aumentamos a temperatura do corpo, esse movimento de oscilação, em média, se torna mais frenético e incessante. A frequência de oscilação dos átomos (e dos portadores de carga no seu interior) aumenta. A energia de oscilação dos átomos aumenta. MAS... “Aumenta, sim, mas não está autorizada a assumir qualquer valor!” – diria o meu pai, Max Planck. Para ele, oferecer uma solução para o problema da Radiação dos Corpos Aquecidos só seria possível se assumíssemos que...

... as energias de oscilação dos átomos que formam o corpo fossem quantizadas!

Quantizar a energia de oscilação dos átomos significa garantir que ela NÃO PODE assumir qualquer valor, mas apenas **múltiplos inteiros de uma quantidade fundamental** – chamada, neste caso, de **quantum de energia**. Isto é, a energia de oscilação de cada átomo em um corpo a certa temperatura T só pode ser uma, duas, três, quatro, ..., dez, ..., cem, ... Enfim, um número inteiro de vezes maior que uma quantidade mínima. Este fato abre margem para algo incrivelmente novo e corresponde ao “start” para as ditas “Mecânica Quântica”, “Física Quântica”, “Teoria Quântica” e afins... Em resumo: uma estrutura

montada em cima de grandezas físicas quantizadas, às quais se pode associar um quantum fundamental.

Para entender melhor o conceito de “energia quantizada”, vamos partir para uma analogia bacana: vamos substituir “trocas energéticas” por “trocas monetárias”. Sim! Quando você, por exemplo, compra dado objeto, você, na verdade, troca certa quantidade de dinheiro pela posse do bem em questão. Vamos investigar melhor estas trocas? Ao comprar uma bala na doceria, pago 10 centavos de real; em um dia muito quente na maravilhosa João Pessoa, preciso pagar 2,00 reais (ou seja, 200 centavos de real) para poder tomar uma deliciosa água de coco; quando me disponho a comer um saboroso pastel de queijo, deixo na barraquinha a quantia de 4,00 reais (igual a 400 centavos de real) para matar a minha vontade; em uma noite de confraternização familiar, compramos aquela pizza toscana sensacional por 31,99 reais (valor equivalente a 3 199 centavos de real). O que eu quero com estes exemplos? Não, definitivamente não quero abrir o seu apetite! Quero, sim, mostrar que todos os processos de compra envolvem **quantidades inteiras positivas de centavos de real!** Afinal, 10, 200, 400 e 3 199 são números inteiros positivos, não é mesmo? De modo alternativo, poderíamos afirmar: é impossível, nestes processos, considerar trocas financeiras que envolvam $1,5$, $\sqrt{5}$, π etc. em centavos de real. O “**um centavo de real**” representa, no Brasil, a troca monetária mais básica. E qualquer troca econômica imaginável envolve uma **quantidade inteira positiva desta troca fundamental!** Pronto! Uma troca que respeite essa última condição em destaque se diz **quantizada** e o “um centavo de real” poderia ser chamado de **quantum monetário fundamental**. Entendeu melhor? Espero que sim!

A proposta da quantização de energia de oscilação dos átomos surgiu, pela mente de Max Planck, no final do ano 1900. Como era uma hipótese revolucionária, precisava ser testada na explicação de outros fenômenos. Se fosse bem-sucedida, a ideia da quantização ganharia força e, assim, Teoria Quântica se tornaria cada vez mais sólida em sua base. Em 1905, outro físico alemão – Albert Einstein, este um pouco mais famoso, acho – quantizou a energia transportada pelas ondas eletromagnéticas e, assim, obteve sucesso na explicação teórica de outro problema que atormentava a mente dos físicos do final do século XIX: o efeito fotoelétrico, que consiste na possível remoção de

elétrons de uma placa metálica “bombardeada” pela incidência de luz ou de outras ondas eletromagnéticas. Reconhecer a luz como um conjunto de “pacotinhos de energia” (cada “pacotinho” correspondendo a um quantum de energia) consistia em algo perturbador para a comunidade científica da época, afinal a luz estava sendo tratada como...

... um conjunto de partículas.

- “Mas... Você não havia dito que a luz era uma ONDA eletromagnética?”, você questiona.

- “Sim”, respondo de forma direta.

- “Como, então, resolvemos este impasse: a luz é onda ou partícula?”, você retruca.

- “Vamos com calma! Muitas novidades surgiram no conto de hoje! Está na hora de digeri-los BEM DEVAGAR para que, no próximo conto, possamos dar um desfecho a essa novela. E acredite: nesse capítulo final, a capacidade imaginativa da sua mente vai ser usada como nunca. Vamos, por meio dela, viajar até as profundezas do mundo quântico. Desta forma, um grande mistério se resolverá: quem é Peter Planck, este piloto maluco que se aproveita da minha imaginação como meio de transporte para me guiar pelas loucuras do mundo quântico? Prepare-se para as últimas cenas da nossa aventura! Até lá!”, despeço-me colocando um pouco de suspense no ar.

Capítulo 9

9. Sexto conto: Abrindo os olhos para uma nova noção de realidade

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Sexto conto: “Abrindo os olhos para uma nova noção de realidade”

- “Oba! Até que enfim! Chegamos no último conto e o suspense será desfeito! Está na hora de resolver aquela confusão: a luz é uma onda ou uma partícula?”

– você me aborda de supetão, sem me dar qualquer margem para respiro.

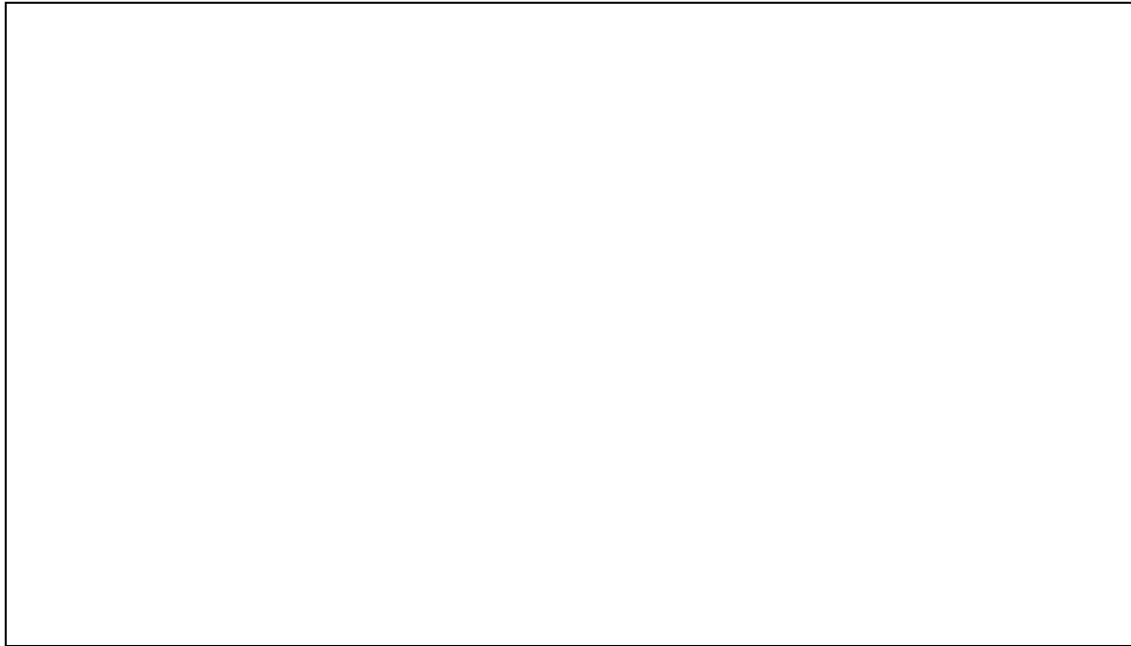
A sua curiosidade me encanta! Para mim, ela é, respeitadas as devidas proporções, uma boa representação do genuíno espírito científico, insaciável, inquieto, ansioso por novos feitos e descobertas! Adicione-se doses aceitáveis de abstração... E teremos em você a versão miniatura de um cientista. Aliás, é dessa abstração que vamos precisar neste momento, porque entrar no mundo quântico significa se apoiar em outras expressões de realidade que não condizem com aquelas indicadas pelos nossos sentidos (principalmente pela visão, o sentido que mais contribui para a imagem do exterior que nos envolve). Veja (um simples verbo que já aciona o mais ligeiro entre os seus sentidos): ao observar esta folha, onde registro as linhas deste último conto, você pode afirmar que ela apresenta uma geometria claramente retangular, certo?! Pois bem... Talvez exista um lápis aí ao seu redor, certo?! Aposto que a geometria dele é basicamente cilíndrica, sim?! Óbvio: com um cone que vai afilando até a ponta. Humm... Sabe as lentes dos óculos que o seu colega míope usa? Ótimo! Elas são obtidas a partir de cortes feitos em esferas transparentes. Esferas que poderiam ser bem representadas por bolas de pingue-pongue, de tênis, de basquete e de tantos outros esportes. Vamos, agora, ao que interessa! Se você fosse representar geometricamente...

... a luz que incide sobre uma superfície: que geometria usaria?

... os átomos que compõem o seu corpo: que figura desenharia?

... os elétrons, prótons e nêutrons que formam estes átomos: como faria?

Vou-lhe pedir um favor: só continue a leitura depois de colocar as suas impressões no espaço abaixo.



Os seus registros são incríveis! E tenho certeza de que eles acompanham o mesmo processo de construção da Ciência que nos trouxe até aqui, até este momento atual! É muito importante que você tenha real consciência desse fato, aliás!

Será que o que você colocou no espaço anterior corresponde à última imagem que a Ciência tem acerca da luz, dos átomos e de todas as coisas menores que eles? Acho pouco provável, a menos que você tenha preenchido o tal espaço com **equações matemáticas** que descrevam cada um desses “objetos da Física”. Pois é! Quando se fala que a luz é uma onda, não se deve pressupor que a sua representação fiel seja igual a da onda em uma corda, por exemplo. Há alguns contos, usamos essa imagem apenas para definir duas propriedades: comprimento de onda (λ) e frequência (f). Mas nunca, nunca mesmo, quisemos construir uma identidade entre estas. A verdade é que a possibilidade de associar estas propriedades a um feixe de luz faz com que ele “carregue” características típicas de ondas e obedeça a funções matemáticas que são

respeitadas por perfis ondulatórios. Da mesma forma, quando se defende a luz como um conjunto de partículas, não se deve encará-la como uma sucessão de bolinhas esféricas – cada qual transportando um quantum de energia. Deve-se, sim, entender que ela obedece a equações próprias de objetos que, no mundo macroscópico e perceptível aos nossos sentidos, poderiam ser assimiláveis a partículas de tamanhos desprezíveis. Que fique bem claro: no nosso “mundo do muito pequeno” a realidade não é representada por um desenho, por uma geometria, pela similaridade a objetos que ocupam o mesmo ambiente em que nos encontramos. A verdadeira realidade é melhor expressa por um conjunto de equações matemáticas! Essa é a abstração para a qual queria lhe convidar!

Pois se achegue mais que eu vou lhe dar um “exemplo concreto de algo abstrato” (acho que você já percebeu que eu adoro esses contrastes de linguagem, não?!). Sabe a luz a que nos referimos no último parágrafo? Entende-se, hoje em dia, que ela é composta por um conjunto de “pacotinhos de energia” – os quanta (plural de quantum) de energia que lhe apresentei no conto anterior e que, desde 1926, são chamados **fótons**. Cada pacotinho transporta uma quantidade de energia (E_f) MUITO PEQUENA e que pode ser calculada por:

$$E_f = h \cdot f$$

A letra f na equação acima já lhe é bem familiar: trata-se da frequência da radiação eletromagnética considerada (aqui falamos em “luz”, mas poderia ser rádio, micro-ondas, infravermelho, ultravioleta, raios X e raios γ). Agora... O que é esse “ h ”? Algum palpite? Bem... O “ h ” representa pra gente uma constante de proporção, é um valor que não muda e que é muito importante quando o assunto é lidar com fenômenos quânticos. Recebe o nome de **constante de Planck** – para homenagear o físico que a revelou ao mundo pela primeira vez. Seu valor? Ah! É muito, MUITO pequeno – e justamente por isso ela sempre aparece nas expressões matemáticas que descrevem os objetos que habitam o domínio tipicamente quântico. Inclusive... Na minha descrição, enquanto objeto quântico! Lembra-se que eu te falei, logo de início, que eu era/sou BEM pequenino? Isso mesmo! Sou, inspirado num personagem fictício (cujo nome eu empresto, quase totalmente), um **fóton de luz verde**! E... Quer saber? Os motivos por trás da minha cor vão muito além da inspiração ficcional. Você sabia que o olho humano apresenta máxima sensibilidade para a cor verde? Pois é! De todo o conjunto de

ondas eletromagnéticas (chamamos esse conjunto de “espectro eletromagnético”), o nosso olho é sensível a uma fração pequeníssima. Essa fração, como você bem sabe, é chamada de “luz visível”. E todas as cores que em conjunto formam o “espectro visível” sensibilizam o nosso olho de diferentes formas e taxas, o máximo ocorrendo na região onde se situa o verde! Quando você, então, combina todos esses fatos, fica a um passo de entender as intenções por trás das minhas propostas de viagem: eu, na qualidade de fóton de luz verde, tenho o claro intuito de interagir com você, interagir especialmente com os seus olhos para, sensibilizando-os ao máximo, permitir a você enxergar um pouco das maravilhas aparentemente escondidas neste universo minúsculo. Até aqui... Eu te trouxe pelos olhos! Você, agora, já tem um pouquinho de bagagem para começar as suas próprias investidas nesse mundo mágico dos objetos quânticos. Espero ter te oferecido coragem e estímulo suficientes para que você possa seguir viagem. E, claro: torço MUITO para que você, um dia, me procure de volta para contar um pouco das suas aventuras pelo Universo Quântico. Esteja certo que, para mim, será um tremendo prazer trocar papéis com você. Afinal, depois de muito aprender, será você o responsável por me guiar pelas suas descobertas!

Obrigado, amigo/amiga viajante! Até a próxima! 😊

Capítulo 10

10. Atividade complementar: Medindo a constante de Planck h

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Atividade Complementar: “Medindo a constante de Planck h ”

10.1. Proposta.

Achou que eu me despediria assim, tão rápido?! Ah! Claro que não, poxa! Não sem antes lhe fazer uma última proposta. Vamos lá?!

Você percebeu que, no último conto, eu mencionei a importante “constante de Planck h ”, fiz comentários sobre ela, mas... Não lhe falei nada sobre o valor dela? Tenho quase certeza que você pensou que eu, por não fornecer o seu valor, tivesse cometido um grande deslize, não é mesmo?! Errou! Este já era, na verdade, um passo previsto, pois muito me interessaria que VOCÊ conduzisse uma experiência para determiná-la (pelo menos com a ordem de grandeza correta)! Assim, poderá perceber, pelos próprios olhos, o quão pequena ela é. Venha! Está na hora de começar!

10.2. LED's.

Você, certamente, já ouviu falar da tecnologia **LED**. Hoje em dia, o emprego dela é bem amplo e passa desde a provável aplicação na tela e na lanterna do seu celular, nos monitores de computador e aparelhos televisores até às várias lâmpadas que existem na sua casa. O seu nome é, na verdade, resultado de uma sigla para *light emitting diode* (ou “diodo emissor de luz”, no nosso idioma). Mas... O que seria um “diodo”?

Em circuitos elétricos/eletrônicos, um diodo é um dispositivo que privilegia a condução de corrente elétrica através dele em um único sentido. Ou seja: é muito, MUITO mais fácil permitir a condução de corrente elétrica em um dos sentidos permitidos. Desta forma, ele se diferencia bastante de um resistor convencional – que permite a passagem da corrente elétrica através dele em qualquer dos sentidos e de igual forma (bastando-se a inversão dos polos da bateria que o alimenta).

Os LED's mais comuns são formados por materiais semicondutores em junções chamadas PN. O esquema ao lado mostra, de forma BEM simplificada, a configuração esquemática de uma junção destas: na porção P, existe um material semicondutor fortemente preenchido (em termos científicos, diz-se fortemente dopado) com átomos de um elemento químico capaz de “aceitar” elétrons; isto é, eles fornecem estados eletrônicos desocupados

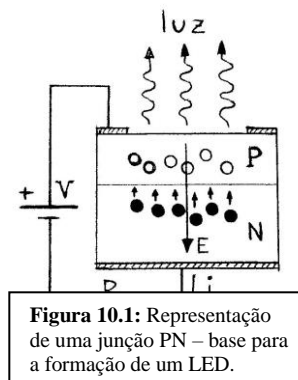


Figura 10.1: Representação de uma junção PN – base para a formação de um LED.

(chamados tecnicamente, vejam só, de “buracos”) que poderiam ser preenchidos por elétrons vindos de outro lugar. “De outro lugar? Como assim? De onde, exatamente”? Neste caso... Da outra parte da junção: a porção N, formada também por um semicondutor fortemente dopado com átomos de outro elemento químico capaz de fornecer elétrons em excesso. Se aplicarmos um campo elétrico no sentido correto (o que equivale a conectar uma pilha com as polaridades “+” e “-” corretamente ajustadas), podemos promover o deslocamento dos MUITOS elétrons em excesso presentes no lado N para os MUITOS buracos disponíveis no lado P e, então...

... a “combinação” elétron-buraco gera luz como resultado! Incrível, não?!

10.3. A hora e a vez da... abordagem matemática!

Dizemos que, a partir de certo momento, a “promoção” de um elétron da porção N para a P da junção vai exigir um esforço externo – é aí em que a bateria entra em cena. Ela deve fornecer uma tensão mínima V_0 (medida em volts) para, conseqüentemente, oferecer um ganho mínimo de energia $\Delta E_{min.}$ para cada elétron. Este ganho é dado por:

$$\Delta E_{mín.} = e \cdot V_0$$

Na equação acima, e representa o módulo da carga elétrica de um elétron (valor conhecido como carga elétrica elementar e aproximadamente igual a $1,6 \cdot 10^{-19} C$ – “coulomb”, C , é a unidade padrão para esta grandeza).

Alcançado este ganho, o elétron se recombina com um buraco e o resultado, como já dito, é... LUZ! Na verdade, o resultado é um fóton de luz – cuja energia E_f ... Humm... Esta você sabe calcular! Lembra-se? Não? Opa! Eu te ajudo a lembrar! É assim:

$$E_f = h \cdot f$$

Recordando: f , aqui, é a frequência da luz produzida (característica da cor) e h é o nosso objeto principal de estudo! Aquilo cuja busca nos interessa: a constante de Planck. Se entendermos que o ganho de energia gerado pela bateria tem, como intenção final, gerar os fótons de luz de energias definidas, temos:

$$\Delta E_{mín.} = E_f \Rightarrow e \cdot V_0 = h \cdot f \Rightarrow V_0 = \frac{h}{e} \cdot f$$

É justamente nesta última relação em que vamos nos concentrar!

10.4. Mãos à obra!

Chegou o momento de fazermos as coisas funcionarem. Mas, antes de tudo, cheque a existência de um kit experimental com os seguintes itens e, caso não falte nada, tente organizá-los conforme ao diagrama também mostrado a seguir.

10.4.1. Materiais e montagem.

- 5 LED's de diferentes cores (e de frequências conhecidas).
- 1 bateria de 6 V ou de 9 V.
- 1 potenciômetro de 1 k Ω .
- 1 resistor de 330 Ω .
- 1 voltímetro.
- Cabos para conexão.

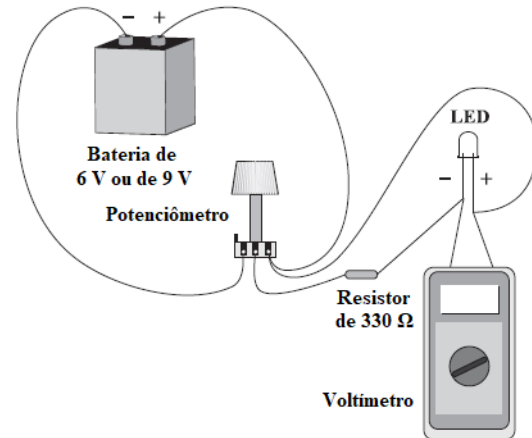


Figura 10.2: Esquema da montagem experimental.

10.4.2. Procedimento.

- Orientar os três terminais do potenciômetro de tal forma que eles fiquem voltados para os seus olhos. Antes de fazer as conexões, certifique-se de girar completamente o botão deste dispositivo no sentido horário.
- Comece conectando os polos negativo e positivo da bateria, respectivamente, às extremidades esquerda e direita do potenciômetro. Use os cabos de conexão para cumprir com esta parte do roteiro.
- Em seguida, ligue o resistor de 330 Ω ao terminal central do potenciômetro e ao polo negativo **de um LED de dada cor**. Tal polo é indicado pela “perna mais curta” do LED. Como de costume, use os cabos disponíveis para lidar com estas conexões.
- O circuito será fechado pela ligação, via cabo, entre a polo positivo do LED escolhido ao terminal da direita do potenciômetro.
- Conecte um voltímetro aos polos do LED para acompanhar a variação da tensão nos seus terminais.
- Girando lentamente o botão do potenciômetro no sentido anti-horário, determine o valor da tensão acusada pelo voltímetro no instante em que o LED começa a acender. Este será o valor de V_0 para a cor em questão. Para registrar esse momento com precisão, vale a pena colocar o LED em um ambiente escuro – você pode fazer uma “conchinha”/“casinha” com as suas duas mãos e, assim, envolver o LED. Repita esse passo por algumas vezes só para ter certeza de

que o valor de tensão acusado pelo voltímetro é mais ou menos o mesmo nas várias repetições.

vii. Registre o valor de tensão na tabela abaixo, gire completamente o potenciômetro no sentido horário, troque o LED e refaça toda a sequência de passos para o LED de nova cor. Siga procedendo desta forma até preencher TOTALMENTE a tabela abaixo exposta.

Cor do LED	Vermelho	Laranja	Amarelo	Verde	Azul
f (10^{14} Hz)					
V_0 (V, volts)					

10.5. Análise

i. A equação $V_0 = (h/e) \cdot f$ sugere que, se montássemos um gráfico de tensão V_0 no eixo y versus frequência f no eixo x , deveríamos obter uma reta como resultado. Quais seriam, teoricamente, os coeficientes angular a e linear b desta reta?

- Coeficiente angular teórico: $a =$

- Coeficiente linear teórico: $b =$

ii. Com os valores organizados na tabela, construa um gráfico de pontos que coloque valores de tensão V_0 (em volts) no eixo y e de frequência f (em 10^{14} Hz) no eixo x . Estes pontos estão, em boa aproximação, organizados em torno de uma reta?

iii. Trace a reta que melhor se ajusta ao conjunto de dados experimentais que você tomou. A partir das escalas consideradas no papel milimetrado, obtenha uma estimativa para os valores experimentais dos coeficientes angular a_{exp} . e linear b_{exp} .

- Coeficiente angular experimental: $a_{exp.} =$

- Coeficiente linear experimental: $b_{exp.} =$

iv. Lembra-se que, em Ciência, o casamento entre previsões teóricas e medidas experimentais é EXTREMAMENTE importante? Pois então... Chegou a hora de comparar os valores teóricos e experimentais dos coeficientes da reta para, assim, obter uma estimativa para a constante de Planck h . Faça isso! Cuidado: você vai precisar recordar que a carga elétrica elementar e é aproximadamente igual a $1,6 \cdot 10^{-19} C$.

v. Um valor de referência para a constante de Planck é $h = 6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$. Qual a porcentagem de erro associada ao valor que você obteve? Para responder essa pergunta, considere que:

$$\% \text{ de erro} = \frac{|\text{valor medido} - \text{valor aceito}|}{\text{valor aceito}} \cdot 100$$

Capítulo 11

11. Atividade de Fechamento: Transformando o Efeito Fotoelétrico em Narrativa

Um conto, um quantum

Narrativas discretas sobre os primeiros passos da Teoria Quântica

Atividade de Fechamento: “Transformando o Efeito Fotoelétrico em Narrativa”

11.1. Introdução

No último conto da nossa saga, eu, Peter Planck, me despedi de você com o desejo de, um dia, vê-lo me carregando pelo seu mundo quântico de aventuras. Na tentativa de lhe inspirar, vou lhe contar um pouco sobre uma das aplicações mais bacanas das ideias de quantização: o Efeito Fotoelétrico, cuja correta explicação rendeu, em 1921, um Prêmio Nobel de Física a ninguém mais, ninguém menos que...

... Albert Einstein!

Só que, agora, vou fazer um pouco diferente: não vou fazer isso textualmente! Vou, sim, pedir a ajuda do seu professor para te guiar por essa aventura. Vem com a gente?!

11.2. Proposta

Depois de ter visto um pouquinho sobre o efeito fotoelétrico... Será que você consegue transformá-lo em uma narrativa? Em uma história feita de personagens fantásticos, capaz de “capturar” e explicar as partes mais importantes do fenômeno e de guiar tantas outras pessoas pelo mundo mágico da Física Moderna? OPA! Tenho certeza que sim! E... Quer saber? Estou muito, MUITO ANSIOSO pelos seus relatos.

Vou te dar algumas dicas, ok?

1. Quanto à forma, você pode:

- Fazer uma narração, na 1ª ou 3ª pessoa do plural.
- Expressar-se do mesmo jeitinho que eu fiz, usando texto corrido.
- Apresentar uma sequência de falas, como se quisesse ilustrar uma conversa entre múltiplos personagens.
- Fazer uma história em quadrinhos – caso você goste bastante de desenhar!
- Uma sucessão de versos rimados e musicados.

Enfim.... Pode abrir margem para a sua criatividade! Fique à vontade! Mostre o que você aprendeu sobre o fenômeno e... Deixe o resto fluir!

2. Quanto aos atores/personagens:

Você aprendeu, graças à atuação excepcional do seu professor, que a interação fundamental no Efeito Fotoelétrico se dá entre fótons e elétrons (sendo que os mais fáceis de serem ejetados são os chamados “de valência”). Eles, portanto, são os sujeitos que devem “contracenar” na sua história! No verso desta página, dou sugestões de atores reais desse mundo quântico. São ondas eletromagnéticas (e as suas respectivas frequências) e átomos com as suas próprias funções trabalho (lembra o que elas representam?).

Veja: para você saber como interagem fótons e elétrons, você vai precisar calcular as energias dos fótons. Neste caso, utilize $h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ como uma aproximação para a constante de Planck (aqui expressa em unidades convenientes, sendo $1 \text{ eV} = 1 \text{ elétron} - \text{volt} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Eu, agora, quero ser o turista! Posso toma-lo como meu guia?! Bom trabalho! ☺

Radiação	$f_{\text{mín}} \text{ (Hz)}$	$f_{\text{máx}} \text{ (Hz)}$	$E_f^{\text{mín.}} \text{ (eV)}$	$E_f^{\text{máx}} \text{ (eV)}$
Ondas de Rádio	-----	$3,0 \cdot 10^9$	-----	
Micro-ondas	$3,0 \cdot 10^9$	$3,0 \cdot 10^{12}$		
Infravermelho	$3,0 \cdot 10^{12}$	$4,3 \cdot 10^{14}$		
Vermelho	$4,3 \cdot 10^{14}$	$4,8 \cdot 10^{14}$		
Laranja	$4,8 \cdot 10^{14}$	$5,1 \cdot 10^{14}$		
Amarelo	$5,1 \cdot 10^{14}$	$5,3 \cdot 10^{14}$		
Verde	$5,3 \cdot 10^{14}$	$6,1 \cdot 10^{14}$		
Azul	$6,1 \cdot 10^{14}$	$6,7 \cdot 10^{14}$		
Anil/Índigo	$6,7 \cdot 10^{14}$	$7,1 \cdot 10^{14}$		
Violeta	$7,1 \cdot 10^{14}$	$7,5 \cdot 10^{14}$		
Ultravioleta	$7,5 \cdot 10^{14}$	$3,0 \cdot 10^{17}$		
Raios X	$3,0 \cdot 10^{17}$	$3,0 \cdot 10^{19}$		
Raios Gama	$3,0 \cdot 10^{19}$	-----		-----

Tabela 11.1: Ondas eletromagnéticas e suas respectivas frequências mínima e máxima. As energias dos fótons devem ser preenchidas considerando que a energia das ondas eletromagnéticas é quantizada (tal como nos disse Einstein em 1905).

Funções trabalhos de alguns metais	
Metal	$\phi \text{ (eV)}$
Na	2,28
Co	3,90
Al	4,08
Cu	4,70
Pb	4,14
Zn	4,31
Fe	4,50
Ag	4,73
Pt	6,35

Tabela 11.2: Funções trabalho de alguns metais (todas expressas em eV).

Capítulo 12

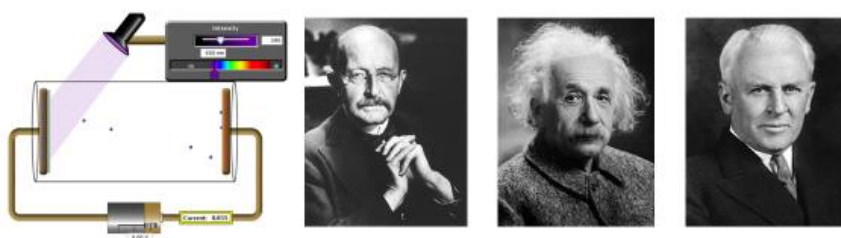
12. Material auxiliar para a introdução ao Efeito Fotoelétrico

No início da “Atividade de Fechamento”, foi utilizada uma apresentação de slides para, brevemente, introduzir o Efeito Fotoelétrico enquanto fenômeno físico, conduzir alguns “experimentos mentais” (em alemão, *gedankenexperiment*, termo popularizado por Einstein para designar essas situações experimentais estruturadas no laboratório da mente humana) junto aos alunos e mostrar como a quantização de energia resolve alguns detalhes não cobertos pela Física Clássica. Ao final da exposição, o professor tem a liberdade de complementar ou não este trabalho inicial com recursos adicionais: exploração de simulações virtuais, exibição de vídeos que abordem o fenômeno em sua perspectiva conceitual, experimental, histórica e/ou cotidiana (por apresentar eventuais aplicações do fenômeno em tecnologias de amplo alcance), execução de experimentos reais (com eletroscópios, por exemplo) etc.

A partir de agora, cuidar-se-á de apresentar cada um dos slides empregados, com pequenos comentários que auxiliem o professor em sua prática pedagógica. Faz-se mister apontar que a sequência a seguir consiste em mera sugestão, totalmente passível de readequações se o docente julgar adequado e pertinente. O slide capa traz um *screenshot* de uma simulação virtual disponibilizada pelo PhET (uma página, mantida pela Universidade do Colorado em Boulder e por uma série de colaboradores espalhados mundo afora, repleta de simulações computacionais de cunho científico montadas em Java, HTML, Flash e outros softwares e acompanhadas por diversas sugestões de atividades adicionais) capaz de instigar uma imagem, ainda translúcida, sobre o fenômeno a ser apresentado e, também, fotos de 3 físicos que, diretamente ou não, forneceram contribuições importantes para a completa descrição do Efeito Fotoelétrico. Da esquerda para a direita, aparecem: Max Planck (1858 – 1947), prêmio Nobel de Física de 1918, pioneiro na sugestão de uma hipótese de quantização (não associada ao Efeito Fotoelétrico, é verdade, mas à Radiação do Corpo Negro);

Albert Einstein (1879 – 1955), prêmio Nobel de Física de 1921, introdutor da quantização da distribuição de energia nas radiações eletromagnéticas (artifício extremamente útil para explicar o Efeito Fotoelétrico em todas as suas nuances); Robert Millikan (1868 - 1953), prêmio Nobel de Física de 1923, responsável por confirmar, experimentalmente, a validade do modelo construído por Einstein.

Física Moderna



A Hipótese de Planck e o Efeito Fotoelétrico

1

Imagem 12.1: Slide 1 da apresentação. Acervo pessoal.

Prossegue-se com um sumário para explicitar a sequência da apresentação.

Física Moderna

Proposta: A Hipótese de Planck

- **A Hipótese de Planck: Retomada.**

Proposta: O Efeito Fotoelétrico

- **Descrição do fenômeno.**
- **Simulação.**
- **Aspectos experimentais.**
- **Explicação: o trabalho de Einstein.**
 - **Noção de fóton.**
 - **Interação do fóton com o elétron.**
- **Exercícios.**

2

Imagem 12.2: Slide 2 da apresentação. Acervo pessoal.

Em seguida, retoma-se a hipótese de Planck (já trabalhada na série de contos anteriores). Neste ponto, é extremamente importante recordar o significado do termo “quantização” (sugere-se a versão explicitada na imagem abaixo ou, de forma alternativa e mais abrangente, a referência a grandezas cujos valores estão limitados a combinações que envolvem números inteiros e uma quantidade fundamental – geralmente denominada de *quantum* da grandeza em questão). Explorada a definição em palavras, aborda-se o exemplo da quantização das energias dos osciladores em versão matemática – tal como o fez Planck, reconhecendo a existência de *quanta* (plural de *quantum*) dependentes da frequência f de oscilação do ressonador.

A Hipótese de Planck

Hipótese de Planck

Átomos se comportam como osciladores harmônicos, emitindo/absorvendo energia em múltiplos inteiros de uma unidade fundamental.


Ou seja, para absorver/emitir ondas eletromagnéticas de frequência f , os átomos devem, em seus movimentos oscilatórios, apresentar valores restritos de energia que respeitem a seguinte condição:

$E = \{\epsilon_0, 2 \cdot \epsilon_0, 3 \cdot \epsilon_0, \dots, n \cdot \epsilon_0\}, \text{ com } n \in \mathbb{N}$

Além disso, na expressão acima:

$\epsilon_0 = h \cdot f$

, em que:
 f : frequência de oscilação
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$: constante de Planck



E. F.: descrição do fenômeno

E. F.: aspectos experimentais

E. F.: noção de fóton

E. F.: interação fóton-elétron

E. F.: atividade

3

Imagem 12.3: Slide 3 da apresentação. Acervo pessoal.

Com esta hipótese, Planck conseguiu justificar, fisicamente, a forma do espectro de emissão do corpo negro (curvas exibidas no quarto conto da série “Um conto, um quantum” – Crise sombria projetada pela luz de uma lâmpada). Note-se que a equação que descreve o formato destas curvas aparece no slide a seguir, com uma função muito clara, aliás: gerar o impacto associado à percepção de como uma hipótese tão simples pode gerar uma função matemática tão robusta, complexa e, principalmente, capaz de se ajustar corretamente ao fenômeno físico em questão. E só! O professor, como coordenador do processo de ensino-aprendizagem, deve oferecer garantias explícitas de que esta é a única intenção

por trás da explicitação de $R_\lambda(T)$. Mais importante é o passo seguinte: mostrar para os alunos que, em Física, é de se esperar que uma novidade tão grande como a sugerida por Planck (refere-se, aqui, à quantização de energia) possa ser constatada em outros fenômenos físicos no mesmo domínio, para que o seu conteúdo físico possa ser aceito. Em outros termos: para que não seja entendida como mero artifício matemático sem qualquer significado físico subjacente. Tem-se o caminho aberto para introduzir o Efeito Fotoelétrico.

A Hipótese de Planck

Hipótese de Planck

A Hipótese de Planck envolve, portanto, o novo conceito de quantização da energia do oscilador – justamente por afirmar que esta só pode surgir como múltiplos inteiros de uma unidade fundamental (ϵ_0).

E. F.: descrição do fenômeno

Com esta hipótese, Planck conseguiu obter uma relação excepcionalmente boa para o espectro de emissão de um corpo negro à temperatura T .

E. F.: aspectos experimentais

Com esta hipótese, Planck conseguiu obter uma relação excepcionalmente boa para o espectro de emissão de um corpo negro à temperatura T .

E. F.: noção de fóton

Com esta hipótese, Planck conseguiu obter uma relação excepcionalmente boa para o espectro de emissão de um corpo negro à temperatura T .

E. F.: interação fóton-elétron


Com esta hipótese, Planck conseguiu obter uma relação excepcionalmente boa para o espectro de emissão de um corpo negro à temperatura T .

E. F.: atividade

Com esta hipótese, Planck conseguiu obter uma relação excepcionalmente boa para o espectro de emissão de um corpo negro à temperatura T .

$$R_\lambda(T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k_B \cdot T}} - 1}$$

A concordância com a experiência era o principal trunfo da hipótese enquanto verdade. Mas, para que fosse aceita, era necessário sujeitá-la a outros testes!



4

Imagem 12.4: Slide 4 da apresentação. Acervo pessoal.

O dito efeito é apresentado no próximo slide da forma mais simples e econômica possível – apenas para que o aluno se aposses da essência observacional. É interessante observar que alguns alunos, pela simples análise da “definição” verbal ou da representação pictórica, tendem a identificar o conceito de “energia” como potencial “ponte” entre a chegada da radiação eletromagnética e a saída dos elétrons. Apoiam-se, eventualmente, nas aulas iniciais de Ondulatória (nas quais se “entrega” a noção de ondas como entidades capazes de transportar energia) e em algumas aulas de Química (em que se comenta que a remoção de elétrons de um metal exige o fornecimento de energia – que os químicos denominam “energia de ionização”). Se esta fala surgir, por mais que seja bem localizada (restrita, portanto, a pequeno grupo de alunos), sugere-se dar voz a ela. Afinal, o dito conceito terá papel fortemente relevante na sequência da aula.

O Efeito Fotoelétrico

Hipótese de Planck

E. F.: descrição do fenômeno

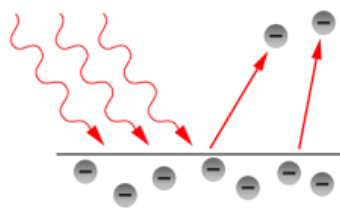
E. F.: aspectos experimentais

E. F.: noção de fóton

E. F.: interação fóton-elétron

E. F.: atividade

Já na segunda metade do século XIX, conhecia-se um fenômeno denominado **Efeito Fotoelétrico** que, como o próprio nome sugere, consistia na **remoção de elétrons de um metal pela incidência de ondas eletromagnéticas** (entre as quais a **luz**, por exemplo).



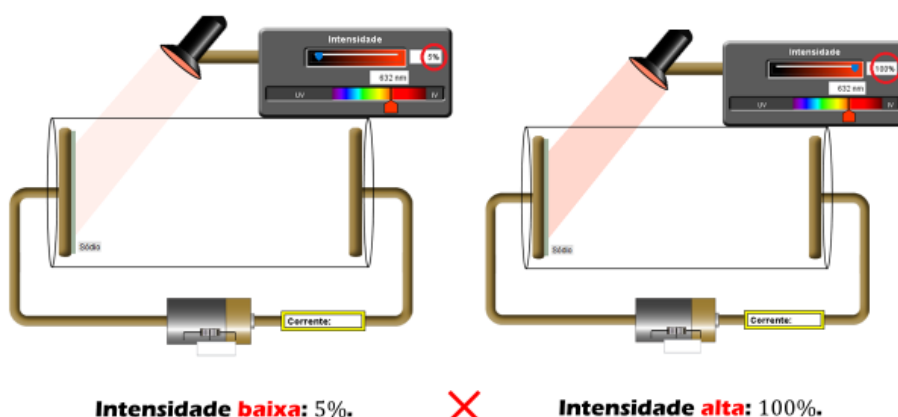
5

Imagem 12.5: Slide 5 da apresentação. Acervo pessoal.

É chegado o momento de colocar a turma no centro do processo de ensino-aprendizagem pela proposição de um *gedankenexperiment* (um “experimento mental”, na mesma linha de tantos outros concebidos pela mente fértil e criativa de Albert Einstein). A imagem a seguir traz um pouco desta sugestão.

O Efeito Fotoelétrico

Convite para uma pequena experiência mental:



Intensidade **baixa**: 5%.

Intensidade **alta**: 100%.

6

Imagem 12.6: Slide 6 da apresentação. Acervo pessoal.

Comparam-se duas células fotoelétricas nas quais um mesmo metal (sódio, por exemplo) recebe a incidência de luz de uma mesma cor (consideramos o vermelho neste caso). A única diferença entre os experimentos diz respeito à intensidade da luz vermelha incidente: luz fraca em uma célula; luz forte em outra. As intensidades, fornecidas pelo PhET em porcentagem, respeitam uma escala arbitrária. Vale destacar que a própria imagem contribui para uma distinção sobre as intensidades dos feixes de luz.

A ideia é, com este confronto em mente, fazer algumas perguntas para constatar expectativas dos alunos em relação ao fenômeno. Duas delas estão expostas no slide abaixo:

O Efeito Fotoelétrico

Hipótese de Planck

E. F.: descrição do fenômeno

E. F.: aspectos experimentais

E. F.: noção de fóton

E. F.: interação fóton-elétron

E. F.: atividade

1. Você acha que haverá remoção de elétrons?

Não há elementos suficientes para uma resposta.

Sim, desde que se espere tempo suficiente.

Não, não haverá remoção de elétrons em ambos os casos.

Haverá remoção de elétrons apenas em 1 dos casos.

2. Em qual das situações os eventuais fotoelétrons (elétrons ejetados pela ação da luz) admitirão maior velocidade?

Intensidade baixa. Intensidade alta.

As velocidades serão iguais

7

Imagem 12.7: Slide 7 da apresentação. Acervo pessoal.

Estas duas primeiras questões tendem a suscitar o entendimento clássico que os alunos, segundo supõem, é inerente ao fenômeno. A maioria deles responde que a ejeção/remoção de elétrons é possível nos dois quadros (intensidade baixa e intensidade alta), exigindo-se maior intervalo de tempo para a percepção dos fotoelétrons (elétrons ejetados pela ação de radiação eletromagnética) no experimento com intensidade baixa. Além disso, tão logo sejam ejetados, será possível perceber que os fotoelétrons apresentarão maior velocidade no experimento feito com alta intensidade luminosa – pensa o aluno. Prossegue-se, então, com uma terceira pergunta:

O Efeito Fotoelétrico

Hipótese de Planck

E. F.: descrição do fenômeno

E. F.: aspectos experimentais

E. F.: noção de fóton

E. F.: interação fóton-elétron

E. F.: atividade

3. Em qual das situações os eventuais fotoelétrons serão ejetados em maior quantidade?

Intensidade baixa. Intensidade alta.

As quantidades serão iguais

VOCÊ ENCONTRA O GABARITO NO SLIDE A SEGUIR!

8

Imagem 12.8: Slide 8 da apresentação. Acervo pessoal.

Ao se colocar diante desta última pergunta, é possível que alguns alunos queiram “fechá-la” – de forma bem interessante, aliás – pela imposição de uma restrição adicional: “é no mesmo intervalo de tempo, professor?”. Sim! – respondemos. E diante desta colocação, eles facilmente assinalarão a opção “intensidade alta”, estabelecendo uma relação com a resposta que deram para a primeira pergunta. Afinal, se ambos extraem elétrons, mas demoram intervalos de tempo diferentes para começar o processo (graças à diferença entre as intensidades luminosas), é fácil perceber que, quando o vermelho de baixa intensidade for capaz de extrair um “primeiro elétron”, o vermelho de alta intensidade já terá sido capaz de ejetar vários. Eis a síntese da série de raciocínios que a maioria dos grupos de alunos está propensa a externar.

Havendo disponibilidade de aproveitamento do recurso computacional e da projeção, sugere-se o uso do simulador do PhET para explorar estes e outros arranjos possíveis (neste primeiro momento, alterando-se os comprimentos de onda, as intensidades e os alvos metálicos, mas sempre mantendo a tensão da pilha em 0 V – o ajuste pode ser feito manualmente via mouse e teclado). Pretende-se, com isso, fazer o aluno chegar nas respostas corretas para as perguntas anteriores e, também, notar os aspectos fundamentais do Efeito Fotoelétrico elencados no slide a seguir – e já conhecidos em perspectiva

experimental desde o final do século XIX e começo do século XX, graças, em essência, ao trabalho meticuloso do físico húngaro-alemão Philipp Lenard.

O Efeito Fotoelétrico

Hipótese de Planck

E. F.: descrição do fenômeno

E. F.: aspectos experimentais

E. F.: noção de fóton

E. F.: interação fóton-elétron

E. F.: atividade

Em 1902, operando tubos de raios catódicos, o físico alemão Phillip E. A. von Lenard executou experimentos cuidadosos envolvendo o Efeito Fotoelétrico e notou que:

- 1. O fenômeno não ocorria para qualquer onda eletromagnética incidente.**
- 2. O conjunto de ondas eletromagnéticas capazes de remover elétrons de dado metal variava de acordo com o metal em si.**
- 3. A intensidade da onda (alta ou baixa) não afetava a velocidade dos elétrons mas, sim, apenas a quantidade de elétrons removidos (aumentando-se a intensidade, aumenta-se a quantidade de elétrons ejetados).**

COMO EXPLICAR?

9

Imagem 12.9: Slide 9 da apresentação. Acervo pessoal.

Antes de entrar um pouco nas ideias de Einstein para modelar, teoricamente, o Efeito Fotoelétrico, é muito importante valorizar o conjunto de ideias colocadas pelos alunos, simplesmente porque elas reproduzem, em menor escala e em versão simplificada, a síntese do que a comunidade científica do final do século XIX pensava sobre o Efeito Fotoelétrico. Trazem a essência dos prognósticos da Física Clássica para o dito fenômeno. E como estas expectativas clássicas não encontram correspondência na execução experimental, infere-se a existência de um sinal explícito de que algo precisa ser corrigido. De que, neste caso, uma nova teoria precisa ser construída sobre outros pilares. Trabalhar este fato com cuidado é extraordinariamente importante para que os alunos, mais do que apreender noções rudimentares e introdutórias em Teoria Quântica, sejam capazes de entender, segundo um esquema mais próximo do real, a dinâmica do progresso científico.

Passa-se, então, à ideia de quantização da energia transportada pelo campo eletromagnético, hipótese norteadora de novos rumos teóricos para o Efeito Fotoelétrico e trazida à luz por Einstein no seu *annus mirabilis* (ano miraculoso)

de 1905 – período no qual publicou cinco importantes artigos científicos, todos basais para a Física que emergiria dali em diante.

O professor, ao conduzir esta parte, deve ficar atento a alguns cuidados. O primeiro deles diz respeito à retomada da questão onda/partícula para a luz e para outras radiações eletromagnéticas, já abordada nos contos da série “Um conto, um quantum”. Posteriormente, sugere-se a retomada da representação pictórica de conceitos típicos da Teoria Quântica, reforçando-se que qualquer desenho ou figura que se disponha a ilustrar uma entidade quântica (como os fótons abaixo desenhados) não trazem a realidade legítima. Correspondem, apenas, a artifícios interessantes e limitados para ajudar o nosso “cérebro clássico” a capturar alguns elementos da noção real cuja plenitude se esconde, em verdade, por trás de uma ou mais equações/funções/estruturas matemáticas.

O Efeito Fotoelétrico

- Hipótese de Planck
- E. F.: descrição do fenômeno
- E. F.: aspectos experimentais
- E. F.: noção de fóton**
- E. F.: interação fóton-elétron
- E. F.: atividade

Em 1905, Albert Einstein interpretou as ondas eletromagnéticas incidentes como um **enorme conjunto de partículas** (verdadeiros “pacotinhos de energia”) chamadas, cada uma, de **quantum** (plural: **quanta**). Em 1926, Gilbert Lewis sugeriu que estas partículas fossem chamadas de **fóton(s)**.

Fóton de luz azul (alta energia)

Fóton de luz vermelha (baixa energia)

Fóton de infravermelho (baixíssima energia)




10

Imagem 12.10: Slide 10 da apresentação. Acervo pessoal.

A abordagem matemática, exposta no slide a seguir, também inspira algumas precauções. De cara, o aluno percebe que a energia do quantum de luz (fóton) é dada pela multiplicação dos mesmos fatores que aparecem na Hipótese de Planck. Esta correspondência suscita comparações imediatas – e, por sinal, erradas. Planck quantizou as energias totais dos osciladores que interagem com o campo eletromagnético no problema da Radiação do Corpo Negro (tanto que f , em sua equação, é a frequência do átomo ressonador); Einstein quantizou a

energia vinculada ao próprio campo eletromagnético, sendo f a frequência da própria radiação eletromagnética. Além disso, em seu artigo de 1905 “*Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz*”, no qual aborda o Efeito Fotoelétrico e introduz a quantização da energia carregada pelo campo eletromagnético, Einstein não faz nenhuma referência aos trabalhos de Planck de 1900. Feitas estas observações, fica fácil perceber que os outros aspectos – igualmente relevantes – consistem, em verdade, de retomada do que já fora desenvolvido nos contos finais da série “Um conto, um quantum”.

O Efeito Fotoelétrico

Hipótese de Planck	Einstein admitiu que: $E_{\text{fóton}} = h \cdot f$
E. F.: descrição do fenômeno	<div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> Fóton de luz azul  </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> Fóton de luz vermelha  </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> Fóton de infravermelho  </div>
E. F.: aspectos experimentais	Interpretando, agora, a onda incidente como uma coleção de n fótons, temos:
E. F.: noção de fóton	$E = n \cdot E_{\text{fóton}} \Rightarrow E = n \cdot h \cdot f$
E. F.: interação fóton-elétron	Retomando: E : energia total incidente. n : número de fótons. $h \cong 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$: constante de Planck. f : frequência da onda eletromagnética.
E. F.: atividade	

11

Imagem 12.11: Slide 11 da apresentação. Acervo pessoal.

A partir da recuperação do conceito de fóton, avança-se para a descrição do Efeito Fotoelétrico em seu viés fundamental – isto é, a partir da interação entre fótons e elétrons. É neste momento que se recupera o conceito de “energia” – por ventura exposto por grupo restrito de alunos na ocasião de apresentação do quinto slide. Neste sentido, capturar as primeiras noções vinculadas ao Efeito Fotoelétrico consistirá, basicamente, em uma comparação entre a energia trazida pelo fóton e a demanda pelo átomo para liberar certo elétron. A novidade – que precisa ser fortemente enfatizada, aliás – é que a interação se dá sempre entre 1 fóton e 1 elétron. Ou seja: não se abre caminho para o “elétron acumulador de fótons” ou, de igual maneira, para o fóton super energético capaz de “arrancar” vários elétrons.

O esquema abaixo traz uma representação pictórica (reforça-se, mais uma vez, a postura cautelosa em relação a elas) desta interação. Como o fóton já fora tratado em oportunidade anterior, o enfoque aqui está nas noções de “energia de ionização” e de “função trabalho”: a primeira consiste na energia a ser entregue para retirar um elétron de um átomo. É necessário perceber que, fixo o elemento químico, esta energia vai variar de acordo com o elétron que se pretende extrair – afinal, na eletrosfera de um átomo, existem elétrons que demandam mais ou menos energia em função de sua “distância” (ênfase nas aspas) ao núcleo atômico. Quanto maior a “distância”, menor a interação elétron-núcleo e, portanto, mais fácil de ejetar dado elétron (em outros, menor a demanda energética a ser suprida). Para um metal, a “função trabalho” consiste na menor energia de ionização – ou seja, no gasto energético exigido para se extrair os elétrons “mais afastados” do núcleo atômico (os famigerados “elétrons de valência” – elétrons presentes na última “órbita” ou “camada” preenchida da eletrosfera). Importante ressaltar que, exceto as aspas colocadas em “função trabalho”, todas as outras aludem para conceitos clássicos adaptados para a realidade quântica (e que, portanto, estão imbuídos de limitações que reclamam prudência).

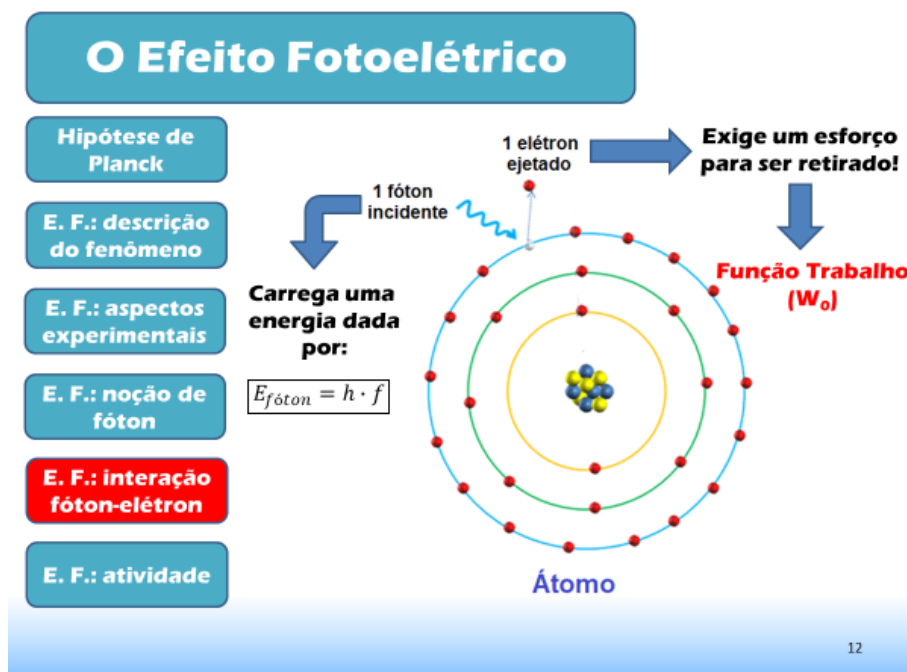


Imagem 12.12: Slide 12 da apresentação. Acervo pessoal.

O slide abaixo traz as possíveis comparações entre a energia do fóton e a demanda de um elétron de valência (haja vista a presença da função trabalho W_0). Aqui, a metáfora monetária, já explorada em um dos textos da série “Um conto, um quantum”, pode ser recuperada. Entendendo a energia do fóton como a quantia monetária disponível para um comprador e a função trabalho como o preço do produto mais barato, é possível deduzir que:

- Se a quantia for menor que o tal preço requerido, tal produto não poderá ser comprado;
- Se a quantia for maior que o dito preço cobrado, tal produto será comprado e ainda haverá uma sobra;

Aqui, o fato do produto mais barato que (não) é comprado se compara ao elétron de valência que (não) é ejetado. Ademais, é interessante perceber que, assim como mercados podem cobrar diferentes valores por este produto mais barato, diferentes metais apresentam diferentes valores de função trabalho. Isto é: a função trabalho W_0 é um valor energético característico do metal alvo no processamento do Efeito Fotoelétrico. Tanto que, se igualarmos a energia do fóton à função trabalho de dado metal, descobrimos a frequência mínima necessária para ejetar elétrons de dado metal (esta sendo nomeada “frequência de corte”).

O Efeito Fotoelétrico

Hipótese de Planck

Se:

- $E_{\text{fóton}} < W_0$: o fóton **não é absorvido** e o elétron **não é ejetado!**
- $E_{\text{fóton}} > W_0$: o fóton **é absorvido** e o elétron **é ejetado!**

E. F.: descrição do fenômeno

Note que, se igualarmos a energia do fóton à função trabalho do átomo, podemos definir a frequência mínima necessária para ejetar elétrons da dita amostra. Assim, define-se a dita frequência de corte do material (f_{corte}).

E. F.: aspectos experimentais

Desta forma, temos:

E. F.: noção de fóton

$$E_{\text{fóton}} = W_0 \Rightarrow h \cdot f_{\text{corte}} = W_0 \Rightarrow f_{\text{corte}} = \frac{W_0}{h}$$

E. F.: interação fóton-elétron

Reforça-se: esta frequência de corte varia com o material (uma vez que depende de W_0).

E. F.: atividade

13

Imagem 12.13: Slide 13 da apresentação. Acervo pessoal.

Os comentários trazidos para o slide anterior expuseram, sutilmente, um fato bem relevante: para o caso da energia do fóton ser maior que a função trabalho... O que ocorre com a “sobra” energética? De que forma ela se manifesta? Esta é, justamente, a questão colocada na sequência da apresentação. Sugere-se, como de costume, que os alunos tomem parte na busca de possíveis soluções para este “enigma” e que o professor possa guiá-los, por aproximações sucessivas, à resposta esperada: a relação com a energia cinética.

O Efeito Fotoelétrico

Hipótese de Planck

E. F.: descrição do fenômeno

E. F.: aspectos experimentais

E. F.: noção de fóton

E. F.: interação fóton-elétron

E. F.: atividade

Pergunta importante: se $E_{\text{fóton}} > W_0$, o que acontece com o excesso de energia dado por $E_{\text{fóton}} - W_0$?

Átomo

14

Imagem 12.14: Slide 14 da apresentação. Acervo pessoal.

Notável observar que a energia cinética em questão, intimamente associada à velocidade dos fotoelétrons, é máxima pois envolve a extração de um elétron de valência (aqueles para os quais se “gasta” menos em termos de energia e, conseqüentemente, os que devolverão maior “troco energético” – “troco” tomado no sentido monetário usual). Nada, evidentemente, impede que o fóton extraia um elétron mais interno – desde que tenha energia suficiente. Neste caso, a demanda energética é $W > W_0$ e, conseqüentemente, a “sobra” – interpretada ainda como a energia cinética – é menor. Ter-se-ia $E_c = E_{\text{fóton}} - W$.

Firmada esta interpretação, compõe-se a chamada “Equação do Efeito Fotoelétrico” que, ao mostrar que a energia cinética máxima é função do 1º grau em relação à frequência da radiação eletromagnética incidente, admite uma representação gráfica na figura de uma reta cuja inclinação corresponde ao

coeficiente angular h - a constante de Planck, de valor fixo/absoluto e independente do metal alvo ou da radiação incidente. Desta forma, tem-se que os gráficos gerados para diferentes simulações experimentais devem, todos, remeter a retas paralelas entre si. Cria-se, a partir desta leitura, uma possível via de confirmação experimental destes prognósticos. Este foi justamente o trabalho do físico norte-americano Robert Andrews Millikan que, em 1916, publicou um artigo científico que, a partir de experimentos cuidadosamente estruturados, validava o modelo teórico de Einstein para o Efeito Fotoelétrico.

O Efeito Fotoelétrico

- Hipótese de Planck
- E. F.: descrição do fenômeno
- E. F.: aspectos experimentais
- E. F.: noção de fóton
- E. F.: interação fóton-elétron**
- E. F.: atividade

Resposta: corresponderá à energia cinética máxima ($E_c^{máx}$) dos elétrons de valência, intimamente ligada à velocidade com a qual estes saem dos átomos!

Sendo assim, obtemos:

$$E_c^{máx} = E_{fóton} - W_0 \Rightarrow E_c^{máx} = h \cdot f - W_0$$

Equação do Efeito Fotoelétrico!

Pergunta: como ficaria a representação gráfica dessa função com $E_c^{máx}$ no eixo y e f no eixo x?

Imagem 12.15: Slide 15 da apresentação. Acervo pessoal.

O Efeito Fotoelétrico

Hipótese de Planck

E. F.: descrição do fenômeno

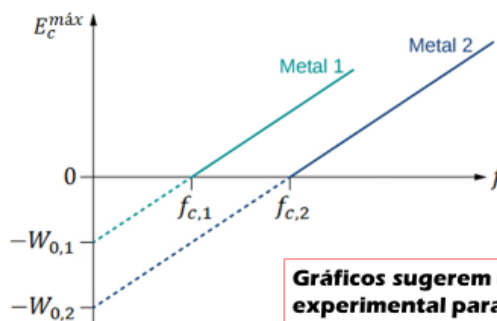
E. F.: aspectos experimentais

E. F.: noção de fóton

E. F.: interação fóton-elétron

E. F.: atividade

Resposta: retas paralelas de mesmo coeficiente angular h (que não depende do metal) e de coeficientes lineares iguais a $-W_0$ (variam de acordo com o material).



Gráficos sugerem um meio experimental para testar a teoria (Millikan, 1916).

16

Imagem 12.16: Slide 16 da apresentação. Acervo pessoal.

Encerrada a abordagem destes aspectos elementares do Efeito Fotoelétrico, é chegado o momento de propor a atividade que sugerirá a transformação deste fenômeno em narrativa. O estudante, seguindo o roteiro disponível no capítulo anterior, vai colocar toda a sua criatividade em cena para contar histórias fictícias que sirvam de guias para leitores ávidos em se aventurar pelas peculiaridades do mundo quântico – continuando (ou começando), agora, pelas nuances e matizes específicas do Efeito Fotoelétrico. Bom trabalho a todos! Ops! Em verdade: Boa aventura a todos!

O Efeito Fotoelétrico

Hipótese de Planck

Agora, chegou a hora da...

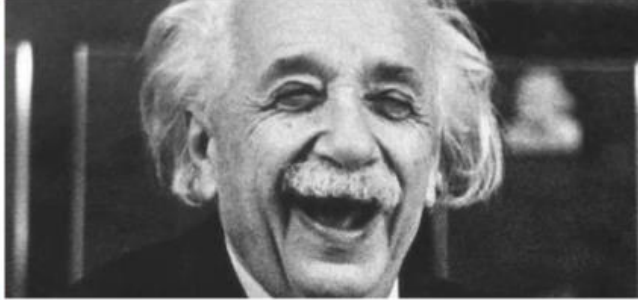
E. F.: descrição do fenômeno

E. F.: aspectos experimentais

E. F.: noção de fóton

E. F.: interação fóton-elétron

E. F.: atividade



... ATIVIDADE!

17

Imagem 12.16: Slide 16 da apresentação. Acervo pessoal.

13. Bibliografia

BACHELARD G., *A formação do espírito científico*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996 (1ª edição).

BACHELARD G., *A Epistemologia*. Lisboa: Edições 70, 2006.

BASSALO, J. M. F. *Crônicas da Física*, Tomo 1. Belém: Gráfica e Editora Universitária UFPA, 1987.

BORN, M. *Atomic Physics*. New York: Dover Publications, Inc, 1989 (8ª edição).

BRUSH, S. G. *The kind of motion we call heat: a history of the kinetic theory of gases in the 19th century (Book 1, Physics and the Atomists)*. New York: North-Holland Publishing Company, 1976 (a).

BRUSH, S. G. *The kind of motion we call heat: a history of the kinetic theory of gases in the 19th century (Book 2, Statistical Physics and Irreversible Processes)*. New York: North-Holland Publishing Company, 1976 (b).

BRUNER, J. S. *Uma nova teoria de aprendizagem*. Rio de Janeiro: Bloch, 1969 (1ª edição), 1976 (2ª edição).

BRUNER, J. S. *Pourquoi Nous Racontons-nous des Histoires?: Le Récita au fondement de l'aculture et de l'identité individuelle*. Paris: Agora, 2002.

BULCÃO, M. *O racionalismo da Ciência Contemporânea: uma análise da epistemologia de Gaston Bachelard*. São Paulo: Editora Ideias e Letras, 2009.

EINSTEIN, A., INFELD, L. *A evolução da Física*. Rio de Janeiro: Zahar, 2008.

GURGEL, I. *A elaboração de Narrativas em Aulas de Física: A Aprendizagem em Ciências como Manifestação Cultural – Ivã Gurgel, Graciella Watanabe, Maurício Pietrocola (org)*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2017 (1ª edição).

MARTINS, R. A., ROSA, P. S. *História da Teoria Quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie*. São Paulo: Editora da Livraria da Física, 2014.

Measuring Planck's Constant. <https://resources.perimeterinstitute.ca/collections/quantum/products/measuring-plancks-constant?variant=36262297990>. Acesso em: 15 jan. 2020.

PhET Interactive Simulations. <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/photoelectric>. Acesso em: 15 jan. 2020.

PLANCK, M. *Autobiografia científica e outros ensaios* – César Benjamin (org.). Rio de Janeiro: Contraponto, 2012.

TOLEDO PIZA, A. F. R. *Schrödinger e Heisenberg – A Física além do senso comum*. São Paulo: Odysseus Editora, 2003.