



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 constataam 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 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 neste 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 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.

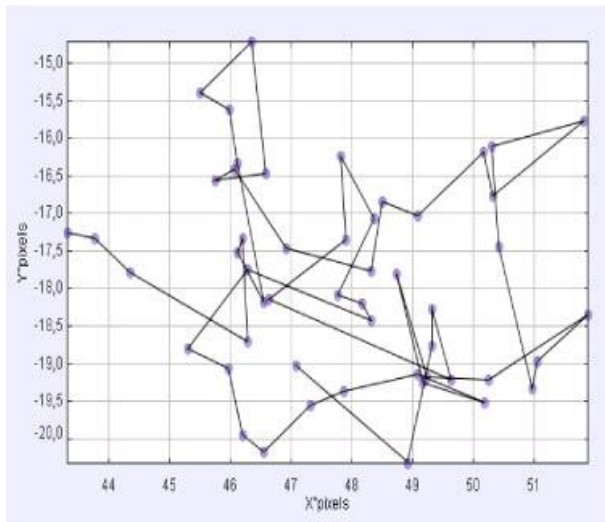


Figura 4.1: Movimento típico de uma partícula browniana (um grão de pólen, por exemplo) em suspensão na água. Extraído de: “Movimento browniano: uma proposta do uso das novas tecnologias no ensino de física”. (http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172011000400015).

“Hum... 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, H_2O . 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 sereio! 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?

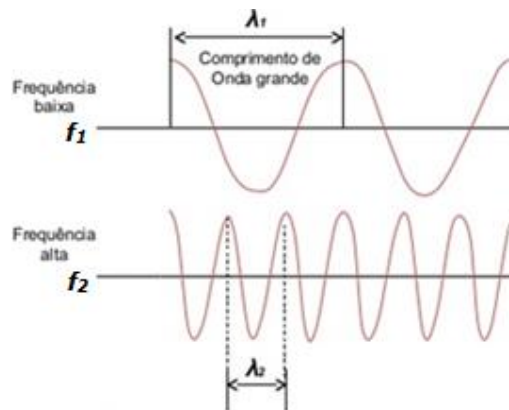


Figura 6.2: Comprimento de onda (λ) e frequência (f) em ondas periódicas.

- 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:

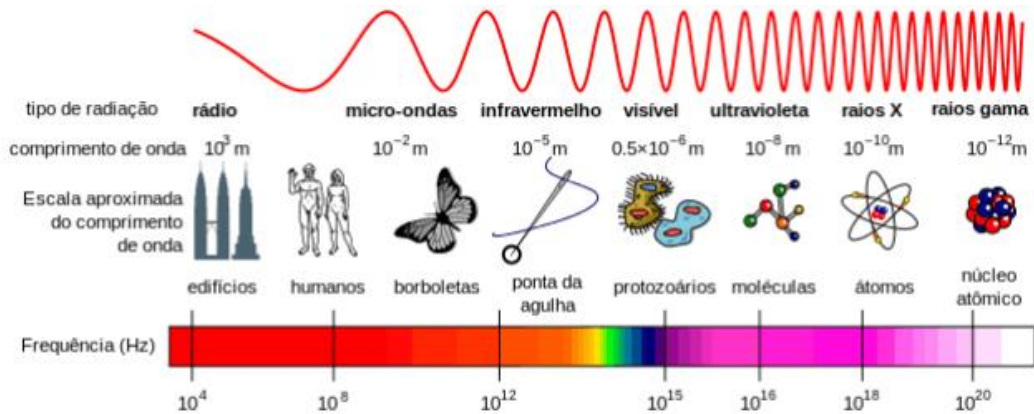


Figura 6.3: Diferentes tipos de ondas eletromagnéticas e as correspondentes ordens dos valores de seus comprimentos de onda (λ) e frequências (f).

Reforçando: é muito importante perceber que, à medida que 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!

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

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

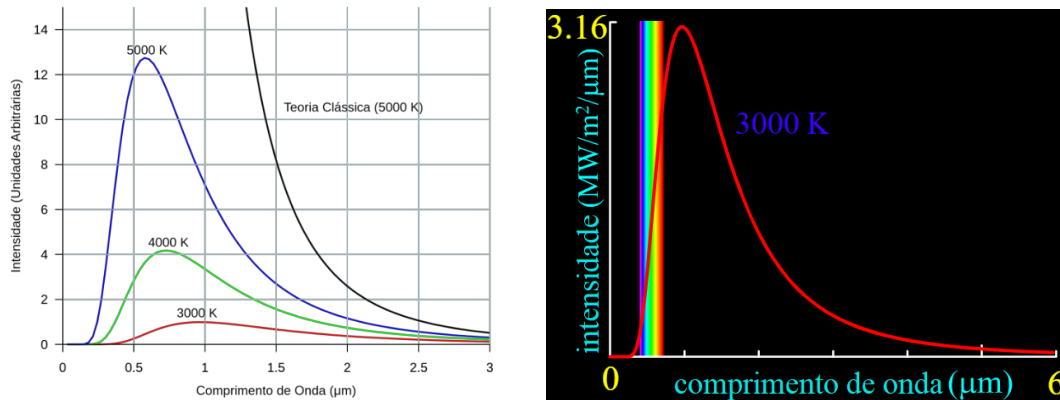


Figura 7.1: Curvas de emissão para corpos a diferentes temperaturas (esquerda). À direita, zoom na curva de emissão de uma lâmpada incandescente (de filamento de tungstênio), cuja temperatura é próxima de 3 000 K.

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.

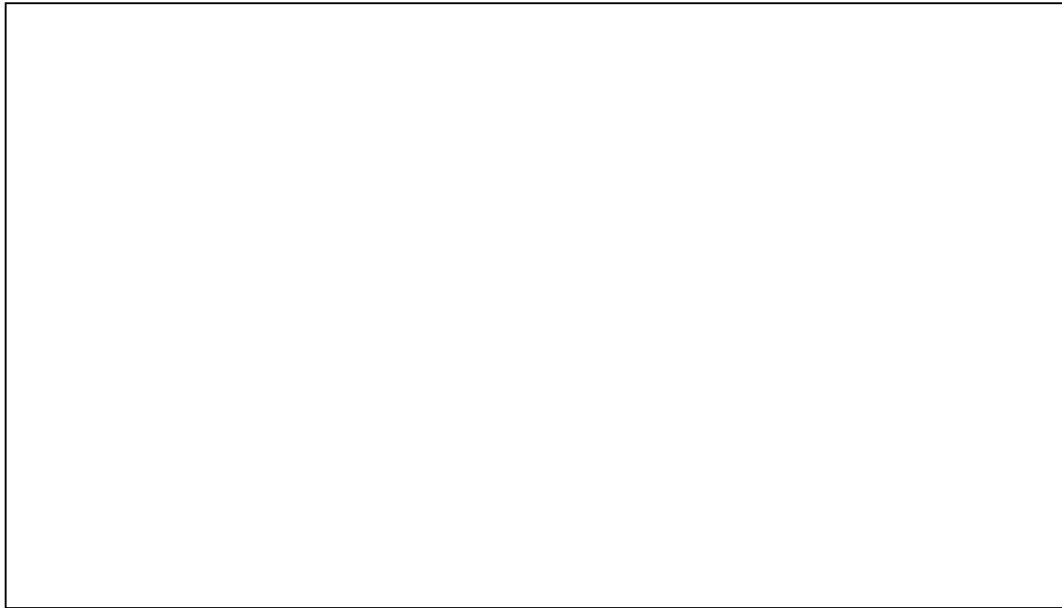
A sua curiosidade me encanta! Para mim, ela é, respeitadas as devidas proporções, uma boa representação do genuíno espírito científico, insaciável, inquieto, ansioso por novos feitos e descobertas! Adicione-se doses aceitáveis de abstração... E teremos em você a versão miniatura de um cientista. Aliás, 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 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 acheque 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

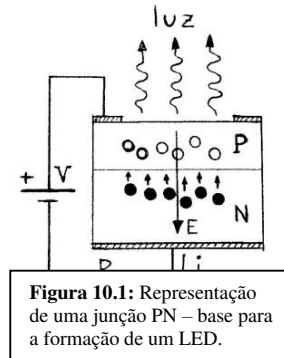


Figura 10.1: Representação de uma junção PN – base para a formação de um LED.

(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 $\Delta E_{mín.}$ 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!

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.

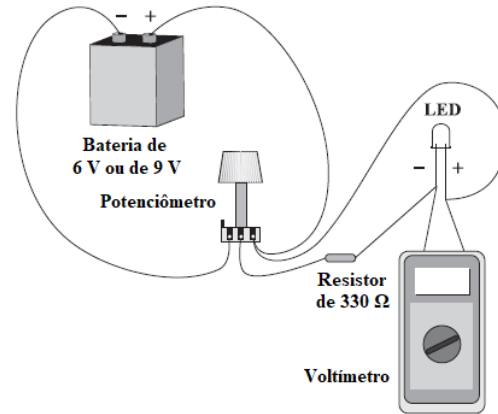


Figura 10.2: Esquema da montagem experimental.

10.4.2. Procedimento.

- 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} 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

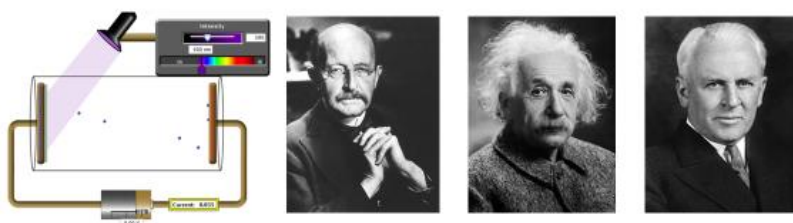
12. Material auxiliar para a introdução ao Efeito Fotoelétrico

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	<p>Átomos se comportam como osciladores harmônicos, emitindo/absorvendo energia em múltiplos inteiros de uma unidade fundamental.</p>
E. F.: descrição do fenômeno	<p>Ou seja, para absorver/emitir ondas eletromagnéticas de frequência f, os átomos devem, em seus movimentos oscilatórios, apresentar valores restritos de energia que respeitam a seguinte condição:</p>
E. F.: aspectos experimentais	$E = \{\epsilon_0, 2 \cdot \epsilon_0, 3 \cdot \epsilon_0, \dots, n \cdot \epsilon_0\}, \text{ com } n \in \mathbb{N}$
E. F.: noção de fóton	<p>Além disso, na expressão acima:</p>
E. F.: interação fóton-elétron	<p>$\epsilon_0 = h \cdot f$, em que:</p>
E. F.: atividade	<p>f: frequência de oscilação $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$: constante de Planck</p>



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

$$R_\lambda(T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k_B \cdot T}} - 1}$$

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!



E. F.: noção de fóton

E. F.: interação fóton-elétron

E. F.: atividade

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

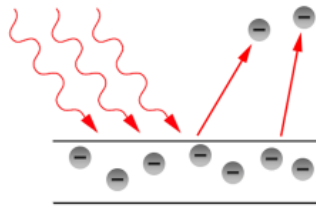
E. F.: aspectos experimentais

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 ondas eletromagnéticas** (entre as quais a **luz**, por exemplo).



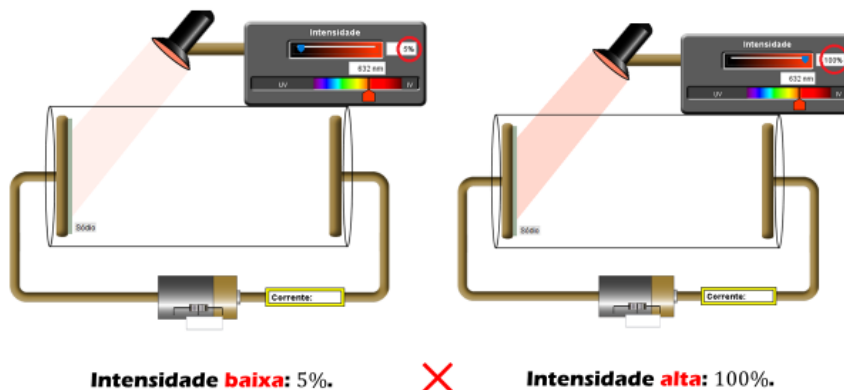
5

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 meticoloso 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 Philipp 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)

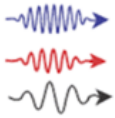
10

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;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p style="color: blue;">Fóton de luz azul</p> <p style="color: red;">Fóton de luz vermelha</p> <p>Fóton de infravermelho</p> </div>  </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).

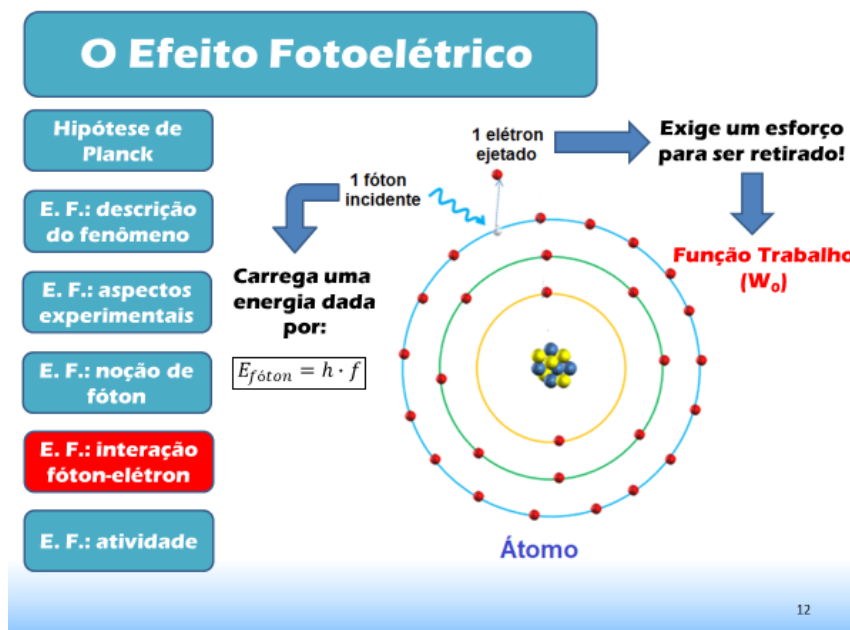


Imagem 12.12: Slide 12 da apresentação. Acervo pessoal.

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

Pergunta importante: se $E_{\text{fóton}} > W_0$, o que acontece com o excesso de energia dado por $E_{\text{fóton}} - W_0$?

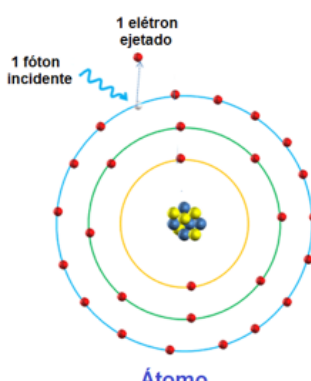
E. F.: descrição do fenômeno

E. F.: aspectos experimentais

E. F.: noção de fóton

E. F.: interação fóton-elétron

E. F.: atividade



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?

15

Imagem 12.15: Slide 15 da apresentação. Acervo pessoal.

O Efeito Fotoelétrico

Hipótese de Planck

E. F.: descrição do fenômeno

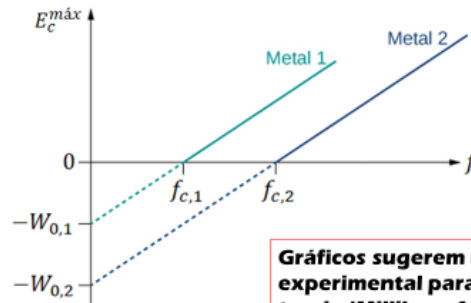
E. F.: aspectos experimentais

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...

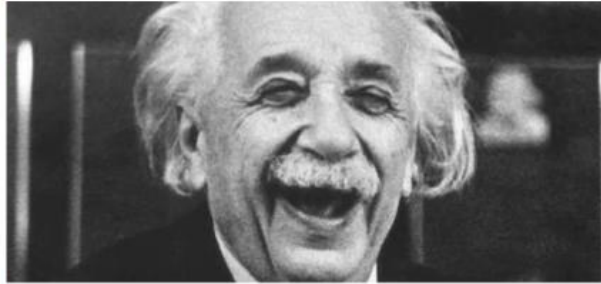
E. F.: descrição do fenômeno

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.