

ABORDAGEM LÚDICA DE CONTEÚDOS DE QUÍMICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO: DESMISTIFICANDO OS CONCEITOS

Ana Beatriz de Souza Barbosa¹, Célia Regina Sousa da Silva¹, Grazieli Simões¹, Priscila Tamiasso-Martinhon¹

¹Departamento de Físico-Química, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ – Brasil
(anabeatriz.barbosa@gradu.iq.ufrrj.br)

Resumo: Este trabalho pretende compartilhar uma proposta de ensino de conteúdos de Química Quântica, para a última etapa da educação básica de ensino no Brasil, através do emprego do livro “Alice no País do Quantum”, de Robert Gilmore, recorrendo ao lúdico como ferramenta facilitadora para proporcionar uma aprendizagem significativa e para despertar o interesse do aluno em ciências.

Palavras-chave: Aprendizagem significativa; Lúdico; Prática docente; Quântica

INTRODUÇÃO

Este trabalho almeja destacar a importância do ensino da Química Quântica para o ensino médio, e trazer alicerces para a aplicação de uma abordagem lúdica na prática docente, desmistificando alguns conceitos previamente concebidos. Para muitos, a química quântica seria um assunto impossível de ser abordado no ensino médio. Assim, pretende-se demonstrar como seria possível abordar temas relacionados à aprendizagem de Quântica na etapa final da educação básica brasileira, de forma a proporcionar uma aprendizagem significativa.

Para tal, este trabalho irá se debruçar sobre a obra literária do autor Robert Gilmore, denominada: “Alice no País do Quantum”, uma alegoria que trata de assuntos sobre a teoria quântica de forma mais acessível ao leitor. Neste livro, que faz referência à famosa obra “Alice no País das Maravilhas”, é possível penetrar no universo quântico e, de forma lúdica, acompanhar a personagem principal em suas aventuras e descobertas sobre as partículas subatômicas. Alguns trechos do livro serão destacados, assim como serão inseridas interferências didáticas que poderão ser utilizadas pelos professores para proporcionar um aprendizado mais claro e motivador para os alunos.

A relevância deste trabalho é justificada pela ausência de materiais que tratem do tema de Química Quântica com uma linguagem de simples entendimento, abordando a temática de forma contextualizada, fazendo com que alguns alunos percam interesse em estudá-lo. Diante deste cenário, serão retratadas também as principais dificuldades na aprendizagem da química e as barreiras enfrentadas por alunos do ensino médio frente a este conteúdo.

O referencial teórico escolhido foi o livro “Aprendizagem significativa: A teoria e textos complementares”, de Marco Antonio Moreira, obra em que o autor seleciona alguns dos principais trabalhos da teoria clássica de David Ausubel. A aprendizagem significativa pode ser muito vantajosa para o professor, à medida que propicia que o docente possa adaptar materiais e ferramentas de ensino para que a linguagem e forma de lecionar atendam às necessidades dos alunos.

O objetivo principal deste trabalho consiste em propor um planejamento pedagógico que desmistifique a aprendizagem de química a partir de uma abordagem lúdica, que promova a aproximação do aluno do ensino médio aos conceitos pertinentes à Química Quântica.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do planejamento pedagógico foram utilizados como base os livros “Aprendizagem significativa: A teoria e textos complementares” (Moreira, 2011) e “Alice no País do Quantum” (Gilmore, 1998).

O desenho metodológico empregou em um primeiro momento o uso do livro de Marco Antonio Moreira, como alicerce para entendimento e estudo docente do conceito de aprendizagem significativa, para se aplicar o lúdico através do emprego da obra de Gilmore em sala de aula.

Apesar do docente ter realizado a leitura na íntegra das duas obras, o planejamento da ação pedagógica não partiu da leitura de todos os capítulos, mas sim do material didático textual (MDT) que a professora produziu a partir de cenários e situações selecionadas do livro de Gilmore (1998).

O MDT foi produzido a partir de trechos específicos, em que foram sinalizados e inseridas algumas “interferências didáticas” ao longo do material pedagógico produzido, que poderão funcionar como um guia para que outros professores abordem pontos-chave em sala de aula, contextualizando algumas situações-problema, e trazendo um verdadeiro sentido químico para cada capítulo.

Os capítulos e as temáticas foram selecionadas para turmas de primeiro ano do Ensino Médio, são eles: Capítulo 1 - “No País do Quantum”; Capítulo 2 - “O Banco de Heisenberg”; Capítulo 3 - “O Instituto de Mecânica”; e Capítulo 5 - “A Academia Fermi-Bose”.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foram correlacionados conceitos defendidos pelo autor David Ausubel às ideias fabulares descritas no livro “Alice no País do Quantum”, de Robert Gilmore. Muitos dos artigos e ideais de Ausubel foram compilados e retratados por Marco Antônio Moreira (2011), em sua obra: “Aprendizagem significativa: a teoria e textos complementares”.

A escolha do livro foi pautada no fato de que todo aluno de ensino médio certamente já teve algum contato com a história de “Alice no País das Maravilhas”, e Gilmore propõe uma interessante alusão a essa famosa animação da Disney. O autor descreve, no prefácio do livro, que:

O país do quantum por onde Alice viaja parece mais com um parque temático no qual Alice é às vezes uma observadora, ao passo que algumas vezes se comporta como uma espécie de partícula cuja carga elétrica pode variar. Esse País do Quantum mostra os aspectos essenciais do mundo quântico: o mundo que todos nós habitamos (Gilmore, 1998, p. 7).

Nesse sentido, este trabalho aborda o lúdico como ferramenta possibilitadora de aprendizagem significativa para o ensino de química quântica no ensino médio.

Para Moreira (2011, p. 60):

Aprendizagem significativa é quando novos conhecimentos (conceitos, ideias, proposições, modelos, fórmulas) passam a significar algo para o aprendiz, quando ele é capaz de explicar situações com suas próprias palavras, quando é capaz de resolver problemas novos, enfim, quando compreende.

Ainda sobre a definição de aprendizagem significativa, o autor complementa que: “...é aquela em que ideias expressas simbolicamente interagem de maneira substantiva e não-arbitrária com aquilo

que o aprendiz já sabe. ‘Substantiva’ quer dizer não-literal, não ao pé da letra, e ‘não-arbitrária’ significa que a interação não é com qualquer ideia prévia, mas sim com algum conhecimento especificamente relevante já existente na estrutura cognitiva do sujeito que aprende”.

MOREIRA cita uma teoria clássica em relação a este conhecimento, proposta por David Ausubel (1918-2008), demonstrando que “pode ser, por exemplo, um símbolo já significativo, um conceito, uma proposição, um modelo mental, uma imagem, a qual Ausubel denomina de subsunçor ou ideia-âncora. Em termos simples, subsunçor é o nome que se dá a um conhecimento específico, existente na estrutura de conhecimentos do indivíduo, que permite dar significado a um novo conhecimento que lhe é apresentado ou por ele descoberto”. No caso do estudo da Quântica, existem alguns possíveis subsunçores. Por exemplo, provavelmente o aluno do ensino médio, em algum momento, já teve contato com o conceito de elétron, mesmo que ele se recorde apenas que se trata de uma partícula de carga negativa. Porém, a partir deste conceito, o docente pode aprofundar outros temas pertinentes, como o Princípio da Incerteza de Heisenberg, o Princípio da Exclusão de Pauli, e os desdobramentos de spin e momento angular.

A obra “Aprendizagem significativa: a teoria e textos complementares” explica que:

Na medida em que um subsunçor não é frequentemente utilizado, ocorre uma inevitável obliteração, uma perda de discriminação entre significados. É um processo normal do funcionamento cognitivo, um esquecimento, mas em se tratando de aprendizagem significativa, a reaprendizagem é possível e relativamente rápida. (Moreira, 2011, p. 17).

Contextualizando em termos de Química Quântica, existem alguns assuntos nesta disciplina, como por exemplo a dualidade onda-partícula, que um aluno que concluiu os estudos a muitos anos, e que não tenha seguido na área da química, provavelmente não irá se recordar de detalhes (tais como: quais são exatamente as características de uma onda, o que são ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas, como se deu o experimento da fenda dupla e quais foram as contribuições de Louis de Broglie). Entretanto, caso a aprendizagem tenha sido realmente significativa, esse aluno ainda irá se lembrar de que o tópico “dualidade onda-partícula” é uma ideia central da disciplina. Conforme elucidado por Moreira, o subsunçor “dualidade” seria “resgatado” caso o aluno tivesse interesse em se debruçar novamente sobre os estudos relativos a este tema.

Um esclarecimento importante realizado por Moreira (2011, p. 17), sobre aprendizagem significativa, é: "[...] não é, como se possa pensar, aquela que o indivíduo nunca esquece. A *assimilação obliteradora* é uma continuidade natural da aprendizagem significativa, porém não é um esquecimento total.". Esta é uma reflexão que deve ser destacada, uma vez que o professor, mesmo que esteja em uma constante busca por metodologias ativas em sala de aula e por diversificar a forma de ensino, dificilmente conseguirá garantir que o aluno assimile 100% do conteúdo de forma perene. Inclusive no próprio curso de Licenciatura em Química, onde os discentes se aprofundam em diversas disciplinas da Química (Orgânica, Inorgânica, Físico-Química, Química Analítica Qualitativa, Química Analítica Quantitativa, e Química Quântica), é praticamente impossível, ao final do curso, não haver obliteração pontual de algum tópico abordado dentro dessas subdivisões. Entretanto, conforme mencionado anteriormente, os subsunçores são capazes de auxiliar, à medida que os temas sejam revisitados em algum momento.

Dentro deste contexto, existem algumas discussões sobre quais seriam as reais condições para a aprendizagem significativa. Uma visão bastante divulgada é a de Ausubel, trazida pelo autor Moreira (2011), que defende que a primeira condição é "o material de aprendizagem deve ser potencialmente significativo" (2011, p. 24). Além disso, Moreira pontua que "o aprendiz deve apresentar uma predisposição para aprender" (2011, p. 24). Em consonância com estes critérios, o autor complementa:

A primeira condição implica que I) que o material [...] tenha significado lógico (isto é, seja relacionável de maneira não-arbitrária e não-literal a uma estrutura cognitiva apropriada e relevante) e II) que o aprendiz tenha em sua estrutura cognitiva ideias-âncora relevantes com as quais esse material possa ser relacionado. (Moreira, 2011, p. 25).

Um material que apresenta uma conexão lógica e coerente gera como consequência uma maior facilidade de assimilação dos estudantes, pois arquiteta uma ponte de integração com o novo conhecimento. Diante dessa perspectiva, Moreira (2011) expõe a seguinte análise: "[...] o material só pode ser potencialmente significativo, não significativo: não existe livro significativo, nem aula significativa, nem problema significativo, ..., pois o significado está nas pessoas, não nos materiais" (2011, p. 25); Ademais, o autor ressalta, sobre a segunda condição para a aprendizagem significativa, que o discente desempenha um papel fundamental na construção do conhecimento: "o aprendiz deve

querer relacionar os novos conhecimentos, de forma não-arbitrária e não-literal, a seus conhecimentos prévios." (2011, p. 25).

Em relação à primeira condição, a obra *Alice no País do Quantum*, de Robert Gilmore, pode ser considerada como um material potencialmente significativo, uma vez que se distancia do "óbvio" e de materiais com linguagem extremamente formal e distantes da realidade do aluno. Ao trazer uma ferramenta lúdica para o ensino, o professor rompe o paradigma de que só é possível compartilhar conhecimento através de métodos clássicos, como o livro didático definido pela escola.

Sobre a segunda condição, não se trata, necessariamente, do aluno apresentar "afinidade" com a disciplina. Todavia, o conteúdo precisa, de alguma forma, instigar o aluno ou mesmo incitar alguma curiosidade sobre sua aplicação. É bastante comum verificar alunos sem interesse ou motivação por uma disciplina, por não vislumbrarem aplicabilidade na realidade em que vivem, ou em seu contexto social, e este é um fato para o qual o professor precisa se manter atento, ainda mais em um mundo cada vez mais globalizado em que vivemos, onde os estudantes apresentam grande facilidade e agilidade para pesquisarem sobre qualquer tema que lhes seja relevante, via internet.

Existem ainda outras contribuições do especialista em psicologia educacional, David Ausubel, para o campo da aprendizagem. Segundo o estudioso: "Quando o aprendiz não dispõe de subsunçores adequados, que lhe permitam atribuir significados aos novos conhecimentos, [...] o problema pode ser resolvido com os chamados organizadores prévios" Moreira (2011, p. 29). Portanto, no caso da utilização do livro *Alice no País do Quantum* como ferramenta didática para a aprendizagem significativa de química quântica, é possível que o docente utilize alguns organizadores prévios durante este processo, que serão descritos ao longo deste trabalho.

Após todas as considerações teóricas descritas até o momento, o docente contará com um alicerce sólido para efetivamente utilizar a ferramenta didática do livro de *Alice no País do Quantum* para desmistificar alguns conteúdos de química quântica para o ensino médio. Inicialmente, a proposta é a de utilização de organizadores prévios através de perguntas. Após a aula expositiva tradicional, o professor poderia estimular as seguintes discussões em sala de aula: 1- "Você já viu algum conteúdo na internet que tratasse do assunto de cura quântica?"; 2- "Você já leu algo sobre medicina quântica ou terapia quântica?"; 3- "Você já se deparou com propagandas sobre coaching quântico?"; 4- "O que você pensa sobre esse tema? Será que faz sentido, do ponto de vista científico?". A partir dessas perguntas, o professor

poderia trabalhar, em sala de aula, sobre apropriações indevidas do termo “Quântica”. A comunidade científica defende a teoria quântica como indispensável para a explicação da realidade microscópica da matéria. Entretanto, nos últimos anos, existe um movimento crescente de utilização do termo “quântica” em vão, descontextualizando seu real significado, com a prerrogativa de “misticismo”. Existem diversos livros e cursos na internet que propõem ensinar sobre a “cura quântica”, “medicina quântica”, “saúde quântica”, “nutrição quântica” e até mesmo “coaching quântico”.

Analisando historicamente, a possível relação com o misticismo foi trazida à tona na década de 60. Um dos exemplos mais marcantes ocorreu em 1975, quando um físico austríaco chamado Fritjof Capra publicou um livro, que se tornou best-seller, denominado “O Tao da Física”. De acordo com Stenger (1995), Capra correlacionou a física moderna com doutrinas espíritas e filosofias de ideologias do hinduísmo, budismo e taoísmo. Assim, Capra considerava que a consciência humana e o misticismo estariam intimamente ligados à mecânica quântica.

De forma geral, o trabalho de Capra trata de analogias à física quântica que não se comprovam experimentalmente e não apresentam repetibilidade. Ao mesmo tempo, este trabalho serviu como inspiração para diversas práticas subsequentes, que podem ser encontradas de forma vasta e crescente na internet, com conceitos desde “pensamento quântico” até “medicina quântica”. Desta forma, verifica-se que o grande problema é sua associação com ciência e com a mecânica quântica. Se estes livros ou sites na rede deixassem claro que estavam tratando exclusivamente de espiritualidade, de questões religiosas, ou mesmo de crenças (ou seja, sem compromisso com o rigor que a ciência exige, com experimentação e comprovação de resultados), não haveria nenhum inconveniente acadêmico. Por outro lado, mesclar experiências pessoais com supostos conteúdos de divulgação científica pode trazer consequências prejudiciais ao aprendizado dos cidadãos, e até mesmo, de forma mais agravante, trazer danos irreversíveis à saúde de algum enfermo, que possa crer em uma “cura quântica”, ou em pseudociências, e abandonar tratamentos médicos aprovados oficialmente pelo Conselho de Medicina.

A associação de descobertas científicas e do termo “quântico” ao misticismo certamente chama a atenção de quem procura uma resposta “rápida” para a resolução de algum problema. Portanto, é imprescindível que a educação científica seja capaz de deixar claro para os estudantes que eles não podem acreditar em qualquer tipo de notícia com caráter enviesado sobre a ciência. Em um mundo globalizado, onde existe acesso à informação de

forma cada vez mais rápida e livre, é preciso que o cidadão esteja sempre apoiado em argumentos científicos quando o assunto for relacionado à química ou à física, por exemplo. É preciso ressaltar que a ciência não é imediatista e não está respaldada em opiniões ou em experiências pessoais. Uma maneira de orientar o aluno no sentido de fontes confiáveis seria indicar que ele procurasse fontes de publicações recentes, através de sites de conteúdos de divulgação científica, como “Portal de periódicos da Capes”, “Revista Virtual de Química”, “Sociedade Brasileira de Química”, “Química na Escola”, “Journal of the Brazilian Chemical Society”, “Brazilian Journal of Physics”, ou mesmo procurar publicações recentes dos autores das notícias no “Google Acadêmico”.

Um cientista que está constantemente pesquisando e desenvolvendo teorias sérias, costuma também submeter artigos em canais com reputação conhecida, pois passam por uma revisão e aceitação antes de serem publicados, o que é um indicativo da legitimação de sua teoria.

Posteriormente, o professor poderia apresentar o livro “Alice no País do Quantum” aos alunos, fazendo uma leitura guiada de alguns pontos específicos de capítulos determinados, cujos conceitos são aplicáveis para o Ensino Médio.

No primeiro capítulo da obra de Gilmore, a personagem principal tropeça em um livro, e de forma fabular, “cai de cabeça dentro da televisão”, sendo transportada para um mundo diferente do qual estava habituada. Neste novo cenário, Alice se depara com o primeiro encontro com os elétrons. Apesar de ser uma alegoria, o autor apresenta a preocupação de descrever os elétrons em formas indefinidas, “pulando de um lado para outro e se mexendo tão rápido que mal dava para ver direito”. A descrição feita nesta forma é interessante para que seja realizada uma posterior associação com o Princípio da incerteza de Heisenberg, afinal não há como precisar com exatidão a posição de um elétron, bem como o seu momento (ou velocidade).

No decorrer da narrativa, visto que Alice permanecia intrigada por não conseguir enxergar de fato todas as características visuais do “personagem elétron”, a menina solicita: “Por favor, poderia fazer a gentileza de parar por um momento para que eu possa vê-lo com mais clareza?”. Porém, o que acontece em seguida é que à medida que o elétron tentava se mover de forma mais vagarosa, sua imagem se tornava ainda mais fora de foco. Gilmore reforça que os elétrons são indistinguíveis, ilustrando cenas em que a Alice conversa com um personagem elétron, e posteriormente, em outro local e em outra direção, encontra com outro personagem da mesma natureza, porém aparentemente idêntico ao primeiro.

Em certo momento, Alice chegou a questionar: “Desculpe, você é o mesmo elétron com quem eu estava falando antes?” e “Você está aqui ao meu lado enquanto o outro foi para algum lugar naquela direção, por isso vocês dois não podem ser a mesma pessoa. Um de vocês tem que ser diferente”.

“Não mesmo”, gritou o elétron, pulando de um lado para o outro, ainda mais rápido por causa de sua excitação. “Somos todos idênticos. Não há como nos diferenciar. Por isso, veja, ele deve ser o mesmo e eu devo ser o mesmo também”.

Interferência didática 1 - Nesse sentido, o professor poderia inicialmente destacar os trechos mencionados, e instigar os alunos a participarem da aula, perguntando sobre algumas informações básicas sobre o elétron. Por exemplo: “1- Vocês se lembram em que região o elétron pode ser encontrado? 2- O elétron possui uma massa grande ou pequena? Seria possível enxergá-lo em um microscópio? Essas perguntas, embora sejam realmente básicas, são importantes para nivelamento dos alunos em relação ao tema.

A obra de Gilmore trata de uma alegoria, mas um requisito essencial é que o docente se certifique de que o conhecimento preliminar seja compartilhado e entendido por todos os alunos. Se não estiver claro para o estudante que o elétron é uma partícula subatômica de carga elétrica negativa, orbitando em torno do núcleo segundo o modelo de Bohr, toda a continuidade da prática didática não irá apresentar coerência. O aluno também precisa ter clareza de que a massa do elétron é extremamente pequena, de forma que seria impossível visualizá-lo em um microscópio. Segundo Chang, R. e Goldsby, K. (2013), a massa em quilogramas do elétron corresponde a $9,1094 \times 10^{-31}$ kg.

No trecho em que Alice fica em dúvida sobre a identidade de um dos “personagens elétrons” (questionando se seria o mesmo com quem ela estava falando previamente), há a possibilidade do professor elucidar que os elétrons são idênticos, e que portanto, não há como diferenciá-los. Este é o motivo pelo qual Gilmore considera que o que um elétron visualiza, todos os demais acabam visualizando de forma equivalente.

Interferência didática 2 - Após a provocação inicial, o docente poderia abordar uma outra discussão da quântica, também baseada nos trechos destacados da história: Caso o elétron conseguisse se manter parado, o observador teria certeza sobre a sua posição, porém perderia a informação sobre a sua trajetória, fazendo com que a “imagem” do elétron se tornasse completamente difusa. Em relação à introdução ao conceito do Princípio de Incerteza, conforme citado anteriormente, o professor poderia explicitar que realmente não faria sentido demonstrar

um elétron estático/parado, por exemplo, baseado nos princípios científicos.

Uma outra perspectiva seria a comparação com a mecânica clássica, que defende que:

“As equações de movimento de um sistema, conhecidas as forças que atuam sobre ele, podem ser resolvidas de forma a dar a posição e o movimento de uma partícula para todos os valores de tempo. Tudo o que é necessário saber é a posição e o momento precisos da partícula em um certo instante $t=0$ (as condições iniciais), e assim o movimento futuro fica preciso de forma exata” (Resnick e Eisberg, 1994, p. 97).

Entretanto, embora esta teoria funcione perfeitamente em escala macroscópica, para sistemas em escalas microscópicas, o mesmo não é observado, ou seja, não é possível determinar por meio de uma experiência real a posição e o momento de uma partícula com precisão simultânea.

Em termos de ensino médio, não haveria a necessidade de explorar os cálculos envolvidos no princípio da incerteza de Heisenberg, apenas o conceito probabilístico. Vale ressaltar que na obra de Robert Gilmore há demonstração matemática sobre este princípio.

Uma estratégia didática que também poderia ser utilizada, em termos da explanação sobre o Princípio da Incerteza, seria realizar uma associação entre ciência e arte, através dos filmes do “Homem Formiga”, super-herói da Marvel. No filme, o personagem principal, Scott Lang, consegue encolher até a escala atômica, e assim adentrar em uma dimensão paralela chamada de “Reino Quântico”. Em 2018 houve o lançamento do segundo filme da saga, intitulado “Homem Formiga e a Vespa”, onde os dois super-heróis ficam perdidos no mundo quântico. Santos, K.B e Moreira, M.C.A (2022), no artigo “Olhar de professor”, comentam que:

É praticamente impossível obter a localização para resgatá-los. Os heróis, quando se encontram em dimensões quânticas, passam a obedecer às leis que regem o movimento das subpartículas (elétrons, prótons, nêutrons etc.). Portanto, da mesma forma que não é possível localizar precisamente um elétron em específico, por exemplo, não é possível localizar o Homem Formiga e a Vespa, já que toda a Mecânica Quântica é baseada no Princípio da Incerteza. (Santos e Moreira, 2022, p. 18).

Este é um exemplo didático, com uma temática atual, bastante inserida na realidade dos estudantes, que pode ser utilizado para estabelecer uma conexão com

os alunos. A sequência de filmes do Homem Formiga provoca bastante mobilização entre os jovens, e essa associação do lúdico com a química quântica com um exemplo adicional, além do livro de Alice no País do Quantum, poderá gerar uma aproximação ainda maior do professor com os interesses da turma.

O cenário do País do Quantum aborda em uma passagem, que os elétrons aparecem portando um objeto, descrito pelo autor como “algum tipo de bengala, ou talvez um guarda-chuva fechado”, que aparecia ora apontado para cima, e ora apontado para baixo”. Em certo trecho, o “personagem elétron” se identifica da seguinte maneira: “Disse a forma: ‘Sou um elétron spin para cima. É fácil me distinguir da minha amiga ali, a elétron spin para baixo, que é obviamente muito diferente de mim.’ E pelo que Alice pôde ver, o outro elétron era quase igual, a não ser pelo guarda-chuva, ou o que quer que fosse aquilo, que apontava para baixo, na direção do chão”.

Interferência didática 3 - Neste momento, existe a oportunidade do docente mencionar o conceito de spin do elétron, que pode se configurar como “spin para cima” ou “spin para baixo”. Logo, é importante ressaltar que a alusão ao objeto com variação de direção dentro da história da Alice não foi inserida ao acaso.

No contexto de spin do elétron, poderia ser abordado o experimento de dois físicos alemães, conhecido como experimento de Stern-Gerlach, realizado em 1921. Os autores Gomes, G.G e Pietrocola, M. (2011), descrevem o experimento:

[...] consiste em fazer um feixe de átomos (originalmente átomos de prata) passar por um campo magnético não-homogêneo produzido por um ímã, e analisar a disposição desses átomos em uma placa coletora na saída do ímã (Gomes e Pietrocola, 2011, p. 4)

Originalmente, a intenção seria testar a quantização espacial, ou seja, verificar se o momento angular de átomos neutros seria ou não quantizado, na presença de um campo magnético externo. Muitos alunos do ensino médio acabam “decorando” os possíveis valores de spin de elétron, sem realmente entenderem o conceito por trás desse tópico. Assim, é importante que esta etapa seja elucidada em sala de aula.

O experimento citado anteriormente, em outras palavras, buscava compreender se a inclinação da órbita de um elétron é quantizada ou não. Para que o aluno entenda melhor: Utilizando um campo magnético, buscava-se obter a resposta sobre: Hipótese 1: A existência de um número limitado de possíveis inclinações (apenas determinadas angulações seriam permitidas), ou sobre a Hipótese

2: Possibilidade da ocorrência de qualquer tipo de inclinação. Assim, o resultado esperado na época, de acordo com o que se acreditava na Física Clássica, seria a segunda hipótese, com a presença de uma mancha contínua, caracterizada pelos átomos desviados na parede atrás do experimento.

Debruçando-se sobre a Química Quântica, o esperado seria a primeira hipótese (número limitado de inclinações). Desta forma, como resultado do experimento, seria possível observar apenas algumas manchas, e de forma randômica. Entretanto, contrariando todas as possíveis previsões, o experimento demonstrou duas manchas separadas, conforme a figura a seguir:

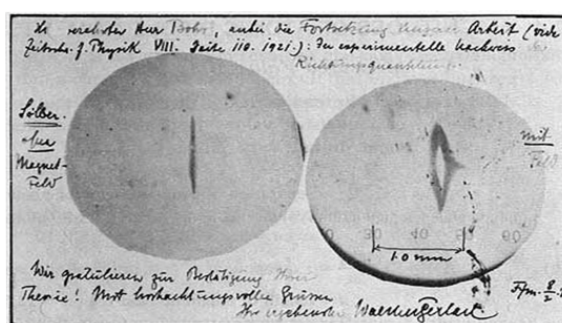


Figura 1- Postal enviado por Walther Gerlach a Niels Bohr em fevereiro de 1922, que mostra uma foto onde aparece a prata depositada na placa de vidro, após uma revelação (fotográfica), para os casos sem campo (esquerda) e com campo magnético (direita). Gerlach escreve: “Anexo [está] a prova experimental da quantização direcional. Nós te parabenizamos pela confirmação de sua teoria” (Courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives.).

Fonte: <https://physicstoday.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.1650229>

Oliveira (2022), descreve que tal resultado caracterizou a propriedade que atualmente é chamada de spin, definido como o momento magnético intrínseco das partículas. É importante esclarecer que, conforme cita Oliveira (2022), em relação ao spin:

[...] está associado com a maneira como os elétrons ocupam os níveis de energia no átomo. Um elétron pode ter o spin “up” (para cima) ou “down” (para baixo). Essa nomenclatura é apenas para diferenciar duas situações, pois não existe “para cima” e “para baixo” nos átomos. O spin é uma característica intrínseca das partículas elementares (Oliveira, 2022).

Este é um ponto bastante relevante de ser apontado para os alunos. Em termos de aplicação prática para o cotidiano, é possível citar as propriedades magnéticas da matéria. A publicação do Departamento de Física para o Instituto de Ciência Hoje detalha que:

Materiais magnéticos têm uma infinidade de aplicações – desde ímãs de geladeira aos ímãs utilizados em motores elétricos,

passando pelos materiais utilizados para a gravação magnética de informação nos discos rígidos dos computadores. A maior parte das informações existentes atualmente está gravada magneticamente em discos rígidos dos computadores espalhados por todo o mundo. (...) Além disso, a utilização do spin no processamento de informações permitirá o desenvolvimento de novos algoritmos de computação, que poderão utilizar as propriedades quânticas do spin. Esse novo ramo de conhecimento chama-se computação quântica (Oliveira, 2022).

Esta é uma ótima oportunidade para o professor abordar a aplicação do conteúdo com o cotidiano, e também de indicar para os alunos algumas revistas online e periódicos confiáveis de consulta, como por exemplo “Ciência Hoje”, “Scientific American”, e “Academia Brasileira de Ciências”.

Seguindo a caminhada da personagem Alice através do País do Quantum, ela se depara com um grupo de operários trabalhando em uma construção. Todavia, essa atividade estava sendo realizada de forma pouco usual, uma vez que os tijolos estavam sendo atirados no terreno de maneira bastante desordenada. Alice questionou tal comportamento, e obteve como resposta: *“É bem verdade que as flutuações aleatórias ainda são grandes o bastante para esconder o padrão, mas assim que tivermos estabelecido a distribuição de probabilidades para o resultado que precisamos, estaremos conseguindo, não há o que temer”*.

Pouco tempo depois, o autor descreve que Alice, surpresa, *“notou que alguns tijolos caíam mais em certas regiões do que em outras, e que era possível distinguir paredes e vãos de portas”*. Na sequência, o personagem caracterizado pelo Mestre de obras explicou: *“Aqui não podemos controlar onde cada tijolo vai, apenas a probabilidade de que irá para um lugar ou outro. Isto quer dizer que quando há poucos tijolos, eles podem cair em quase todos os lugares e então não parecem ter nenhum tipo de padrão. Quando seu número aumenta, porém, você descobre que só há tijolos onde há alguma probabilidade de que eles estejam lá; e onde a probabilidade é maior, é onde haverá mais tijolos”*.

Interferência didática 4 - Assim, o professor consegue promover a discussão sobre as distribuições de probabilidade, argumento reproduzido pela Química Quântica. Em razão de não ser possível determinar as posições e os momentos das partículas com confiabilidade simultânea em termos de precisão, a teoria quântica justifica que “é possível apenas fazer previsões sobre o comportamento provável dessas partículas” (Resnick e Eisberg, 1994,

p. 54). Os autores Feynman e Leighton (2013, p. 13) discorrem que:

Como ninguém encontrou uma forma de burlar o Princípio da Incerteza, até onde sabemos este princípio expressa o que entendemos ser uma característica da natureza. A partir destes experimentos, só falamos em probabilidade de diferentes eventos, não mais falamos em o que ocorrerá em uma dada circunstância. Tudo o que temos a fazer é calcular probabilidades. (Feynman e Leighton 2013, p. 13).

Uma curiosidade interessante de ser apresentada aos alunos é a famosa frase de Albert Einstein, que mencionou que “Deus não joga dados com o universo”. Essa frase é uma referência a uma crítica de Einstein à “nova era da mecânica quântica” e sua interpretação probabilística. De acordo com a literatura, Einstein foi incansável na busca por teorias e experimentos que refutassem o princípio de incerteza, por exemplo. Entretanto, todas as tentativas de oposição de Einstein foram contrapostas com argumentos matemáticos relevantes e incontestáveis de Niels Bohr. Houllauer, (2007), compartilha que:

Em um dos mais conhecidos episódios desse duelo (‘Einstein x Bohr’), Einstein anunciou no Congresso de Solvay (1930), uma experiência pensada que provaria a possibilidade de medida simultânea das variáveis tempo e energia de um sistema. Um esboço do aparelho para realização dessa experiência é apresentado [...], desenhada pelo próprio Bohr, [...] e conhecida como *a controvérsia* (Houllauer, 2007, p. 59).

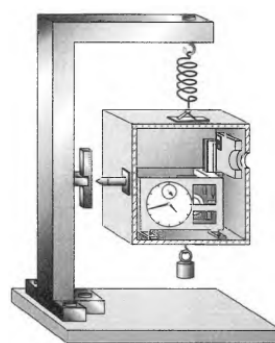


Figura 2 - Caricatura pseudo-realista de um dos dispositivos idealizados por Einstein com a intenção de burlar o princípio da incerteza desenhado por Bohr.

Fonte: Livro: Química Quântica (Houllauer, E., 2007)..

Segundo o livro publicado por Houllauer (2007), a descrição do experimento se dava da seguinte forma:

O processo de medida era simples, constituindo-se de uma balança precisa que sustentava uma caixa fechada contendo um relógio. Além de engrenagens destinadas ao funcionamento do relógio, a caixa continha radiação a baixa intensidade e um pequeno orifício que podia ser aberto ou fechado para se deixar sair um fóton. Segundo Einstein, com a diferença no peso da caixa, antes e após a saída de um fóton, seria possível conhecer a sua energia exata. Por outro lado, como existia um relógio interno completamente independente, faz-se conhecer o momento exato em que o fóton sai, para que se possa determinar 't' e 'E' com precisão, o que burlaria o princípio da incerteza associado a essas duas variáveis (...). (Houllauer, 2007, p. 59)

O autor descreve que Bohr foi capaz de refutar a teoria do experimento, juntamente com Heisenberg e Pauli, através de premissas provenientes da teoria da relatividade geral, cuja origem encontra-se em trabalhos de Galileu, porém seu aprimoramento foi realizado justamente por Albert Einstein.

Houllauer (2007, p. 59), demonstra que:

A argumentação afirmava que, como a caixa estava sujeita a um campo gravitacional, o andamento do relógio dependia da sua posição nesse campo. Assim o fóton, ao abandonar a caixa, provoca um movimento oscilatório do pêndulo definido por mola e caixa. É esse movimento que introduz uma incerteza nas medidas de massa feitas pela mola e de tempo feitas pelo relógio interno. Bohr, Heisenberg e Pauli calcularam essas incertezas, confirmando o princípio da incerteza de Heisenberg. Einstein aceitou a contestação de sua experiência pela acurada resposta lógica oferecida, mas jamais se convenceu do caráter probabilístico da mecânica quântica (Houllauer, 2007, p. 59).

Apesar disso, as previsões da Mecânica Quântica têm sido testadas e confirmadas experimentalmente ao longo de várias décadas. De fato, a interpretação de Max Born, que relaciona as propriedades da função de onda com o comportamento da partícula em termos de densidade de probabilidade é uma das teorias mais aceitas da mecânica quântica na atualidade. Almeida (2018), descreve que:

De acordo com Born, a função $|\Psi|^2$ é uma grandeza estatística que determina a densidade de probabilidade. Portanto, $|\Psi|^2$ dá a probabilidade de encontrarmos a

partícula, que está associada à função de onda Ψ , em uma determinada posição. Com a descoberta do comportamento dual da matéria, a Física Quântica evidencia que a natureza possui comportamento estatístico[...], em que partículas como átomos, elétrons e prótons, podem ser descritos por uma função que representa a probabilidade de se encontrar em determinada região do espaço". Em relação a essa citação, é importante ressaltar que não há a necessidade, a nível de ensino médio, de inserir cálculos. O professor pode apenas apresentar o conceito de Ψ , mostrando que descreve uma função de onda de uma partícula na Mecânica Quântica (Almeida, 2018, p. 70)

Para explicar melhor o conceito de função de onda para Mecânica Quântica, é possível debruçar-se sobre o esclarecimento do Professor do IFRJ, Antonio Florencio, em sua aula de noções básicas da função de onda (anotações de aula de 2020):

[...] função de onda é uma entidade matemática que contém todas as características do sistema estudado. Porém, a função de onda em si não apresenta significado físico. Para que ela adquira tal significado, é preciso operá-la. Qualquer onda, seja ela qual for, é descrita através de uma equação matemática. (Florencio, 2020, Anotações de aula).

Assim, o professor pode reforçar que Ψ "sozinho" não apresenta significado físico, porém o seu quadrado adquire grande relevância, descrevendo a probabilidade de encontrar uma partícula em uma determinada região do espaço.

Uma implicação do Princípio da Incerteza que poderia também ser ressaltada pelo professor é uma mudança significativa na maneira de entendimento do átomo. Antes do surgimento do princípio elaborado por Heisenberg, o modelo de átomo mais recente era o de Bohr, em que era possível determinar tanto a posição do núcleo quanto a posição do elétron. Segundo Bohr, o elétron estaria circulando ao redor do núcleo. Todavia, a elucidação do princípio da incerteza, em que Heisenberg defendia que algumas propriedades não poderiam ser medidas de maneira simultânea, teve como consequência não ser mais possível afirmar a posição e a trajetória do elétron. Assim, o entendimento do átomo passa a ser pautado no modelo quântico, que não admite uma referência com valores exatos, e sim em uma estatística sobre várias medidas.

Em dado momento da narrativa, ainda no capítulo "No País do Quantum", Alice se deparou com um cartaz com a seguinte informação: "Insatisfeito com

seu Estado? Gostaria de passar para um nível mais alto? Ajudaremos você a fazer a Transição por apenas 10 eV (Oferta sujeita à limitação usual da exclusão de Pauli)." A personagem foi orientada que para ter as respostas desejadas e explicações sobre o mundo inusitado que estava visitando, precisaria seguir até o Instituto de Mecânica. Para isso, a menina precisou passar pelo "Banco de Heisenberg".



Figura 3: Alice em frente ao Banco de Heisenberg.

Fonte: Gilmore, 1998.

Este é um cenário interessante para o docente realizar uma alusão sobre promoção eletrônica pois, pela descrição do autor, seria um local bastante semelhante a um banco financeiro convencional, com um "amplo salão dividido em barreiras de filas e caixas onde partículas virtuais esperam por empréstimo de energia".

Interferência didática 5: Neste momento, o professor poderia explicar a mensagem no cartaz, através das transições eletrônicas. Nota: A explicação sobre o princípio de exclusão de Pauli poderia ser elaborada mais à frente, em um momento mais adequado na obra de Gilmore.

O livro de Gilmore não menciona sobre os espectros de transições eletrônicas, porém aqui também cabe comentar que, a transição de um elétron de uma camada interna para uma camada mais externa, acarreta em uma absorção de energia por esse elétron; enquanto no processo de retorno ao nível de energia fundamental, ocorre liberação de fótons em forma de energia luminosa. Uma ponderação a ser feita com os alunos é a de que os "saltos" realizados pelos elétrons são sempre referentes a mudanças completas de nível (do segundo nível, para o terceiro nível, por exemplo), passando para uma outra órbita, segundo Bohr, e nunca permanecendo em uma região intermediária. Sussuchi e Santos (2018), complementam que:

Quando o elétron está em um orbital de energia mais baixa (o orbital 1s), diz-se que o átomo está no seu estado fundamental.

Quando o elétron está em qualquer outro orbital, o átomo está em estado excitado. O elétron pode ser excitado para um orbital de mais alta energia pela absorção de um fóton de energia apropriada (Sussuchi e Santos, 2018, anotações de aula).

Assim, quando o cartaz menciona sobre "passar para um nível mais alto", está se referindo à excitação de um elétron para um nível de maior energia. Cabe ressaltar que essas afirmações estão pautadas no modelo de Bohr, visto que no modelo de Schrödinger, orbitais são funções de onda dos elétrons e através da excitação eletrônica, a promoção para um outro nível energético implicaria no elétron ser descrito por outra função de onda correspondente ao seu novo estado.

Sobre a quantidade de 10eV descrita no cartaz, o professor poderia ponderar que, segundo a definição de Atkins (2003): "Um elétron-volt (1 eV) é a energia necessária para movimentar um elétron quando submetido a uma diferença de potencial de 1 V".

Em sequência, já no capítulo denominado "O Instituto de Mecânica", de forma fabular, o autor do livro descreve dois personagens em um jogo de bilhar: Um seria o mecânico clássico, e o outro, o mecânico quântico. O primeiro foi descrito como sendo um personagem com características notadamente mais formais, sendo "alto e angular", trajando uma "camisa branca e engomada com colarinho duro e também alto, uma gravata estreita e um macacão". Ademais, o profissional do mundo clássico apresentava "rosto aquilino", ou seja, alguém com um olhar contendo uma profundidade similar ao de uma águia, remetendo à inteligência e perspicácia.

Quanto ao mecânico quântico, o mesmo é definido como sendo menor e mais jovem do que seu colega recém apresentado. Este profissional utilizava "óculos grandes, e era difícil perceber para onde ele estava olhando, ou mesmo onde exatamente estavam seus olhos". Adicionalmente, o personagem trajava jaleco de laboratório "com desenho de algo vagamente atômico na frente".



Figura 4: O Mecânico Clássico e o Mecânico Quântico.

Fonte: Gilmore, 1998.

Antes de executar a tacada, o primeiro preza pela observação criteriosa e movimentos precisos e exatos, pois defende a previsibilidade dos movimentos, e afirma que trabalha com máquinas a vapor. Enquanto isso, o mecânico quântico desenvolve o jogo de forma completamente distinta, com um movimento vago que faz com que a bola atinja várias direções ao mesmo tempo. Este segundo personagem afirma que prefere trabalhar com computadores.

Interferência didática 6: Neste capítulo, surge uma comparação interessante entre conceitos da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica, até mesmo na forma que os dois personagens jogam o jogo de bilhar. Assim, vale a reflexão com os alunos: Entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica, existe alguma que seja “melhor” do que a outra? Qual é a importância de cada uma? A mecânica clássica está “obsoleta”? O professor poderia aproveitar o capítulo para comentar de forma geral sobre algumas diferenças entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica.

A mecânica clássica é fundamentada nas leis de Newton e no eletromagnetismo clássico de Maxwell, e suas premissas não estão “obsoletas”, apenas são aplicadas para estados macroscópicos da matéria. É importante que o aluno tenha essa consciência, e saiba definir minimamente algumas aplicações da mecânica clássica em nosso cotidiano, pois isso faz parte da formação como cidadão crítico e atuante na sociedade. Algumas aplicações muito utilizadas são: A força aplicada para movimentação de um objeto, a trajetória de um veículo em determinado percurso, força centrípeta em trajetórias curvas, o trabalho realizado com alavancas, a inclinação que realizamos para a execução de um exercício físico na academia, além de diversas aplicações na engenharia, como geradores de energia elétrica, aparelhos de comunicação, GPS, entre outros.

Por outro lado, a física de partículas microscópicas não pode ser explicada por essas teorias. Assim, foi desenvolvida a mecânica quântica. Na teoria clássica, a luz era tratada como uma onda eletromagnética, enquanto na teoria quântica, a luz é formada por pacotes de energia, e apresenta comportamento dual (onda e partícula, simultaneamente). Os trabalhos de Costa (2021), apontam que:

A descrição do comportamento de sistemas em física quântica foi estabelecida a partir de 1925 com o advento da equação de Schrodinger, e então os cientistas logo viram que mesmo possuindo uma equação para descrever o comportamento das ondas de matéria, as coisas não estavam tão bem estabelecidas. As previsões da mecânica quântica são diferentes das previsões da mecânica clássica. Começando pelo fato de que na equação de Schrodinger, que “descreve” os eventos quânticos, aparece um fator imaginário “ $i = \sqrt{-1}$ ”, que faz com que a função de onda, que descreve sistemas físicos reais, seja complexa. [...] Na química quântica, a interpretação probabilística nos leva aos orbitais eletrônicos, que junto com o princípio de Pauli, nos permitem ter uma visão do átomo e compreender as ligações químicas entre os elementos. (Costa, 2021, p. 12 e 13)

Desta forma, através dos conteúdos expostos, verifica-se a importância do entendimento da história da ciência. No que tange à mecânica clássica e à mecânica quântica, não se pode afirmar simplesmente que uma seria “melhor” do que a outra. O que pode ser avaliado é a aplicabilidade de cada teoria. A evolução da ciência acontece através de muitos debates, questionamentos sobre novas teorias, dados e artigos que comprovam essas teorias com experimentos, e até mesmo novos experimentos que refutam os anteriores. A ciência não deve ser tratada como um grande dogma, mas sim como uma possibilidade de estudo, novas descobertas e oportunidades de aprendizado contínuo.

No decorrer da obra de Gilmore, Alice é conduzida para a sala *gedanken* (ou “sala de pensar”), que é uma sala descrita como um local “onde os pensamentos das pessoas tomam forma, para que todos possam vê-los”. Inicialmente, Alice pensou em coelhos, como seria na fábula original do País das Maravilhas. Porém, como o personagem que a estava conduzindo por esta experiência (o “Mecânico Clássico”), desejava demonstrar como funcionava a interferência das ondas, ele precisou fazer com que o animal desaparecesse. Assim, o pensamento deste personagem fez com que surgissem ondas, seguidas por ondas circulares.

Retomando à obra de Gilmore, depois da experiência com a sala de pensar, Alice é apresentada ao gato de Schrodinger. *“Alice viu um grande gato listrado que dormia numa cesta num dos cantos da sala. Como se despertado por ter ouvido seu nome, o gato se levantou, espreguiçando-se. Ou melhor, levantou-se e não se levantou, espreguiçou-se e não se espreguiçou. Alice viu que, além da figura levemente difusa do gato de costas arqueadas, havia também um gato idêntico, que ainda dormia no fundo da cesta. Ele estava muito rígido, numa posição muito pouco natural. Olhando para ele, Alice poderia jurar que ele estava morto”*.

Interferência didática 7: Neste ponto, o docente poderia introduzir o famoso paradoxo mental do gato de Schrodinger. De acordo com Krause (2018):

Ele imaginou o experimento envolvendo um objeto macroscópico, um gato. Porém, saliente-se, não se observam objetos macroscópicos em superposição, mas isso ocorre com objetos à escala quântica. (Krause, 2018, p. 107).

O experimento basicamente envolve um gato imaginário ocupando uma caixa lacrada, juntamente com uma substância contendo veneno e uma substância radioativa, com um dispositivo programado para liberá-la de forma completamente aleatória. Caso o veneno seja liberado (com o decaimento de uma partícula), a consequência será a morte do gato. Caso contrário, o gato não teria destino fatal, e continuaria vivo.

O paradoxo do experimento é o seguinte: À medida que o cientista fecha a caixa, se levarmos em consideração as teorias e cálculos da mecânica quântica, o material radioativo encontra-se em uma superposição entre ter decaído e não ter decaído. Seria necessário que acontecesse uma medição, ou seja, que o cientista abrisse a caixa para verificar o estado do gato. Enquanto isso, não é possível determinar exatamente qual é a situação do gato previamente à abertura da superfície. Existe uma probabilidade de 50% do gato estar vivo, e de 50% do gato estar morto. É como se o gato estivesse também em uma “superposição”, entre “vida” e “morte”.

Krause (2018, p. 108), ressalta que: “Neste caso, existe uma situação particular de uma superposição, denominada de emaranhamento”, e complementa:

Experimentos que simulam a situação do gato de Schrödinger podem ser realizados ao nível quântico, como tem sido comum nos dias de hoje, colocando-se sistemas quânticos em estados emaranhados. Essa é, na verdade, uma das maiores revoluções proporcionadas pela Mecânica Quântica,

possibilitando, dentre outras coisas, a computação quântica e as discussões sobre a informação quântica. (Krause, 2018, p. 108).

Este célebre paradoxo é uma ferramenta interessante de ser abordada em sala de aula, por proporcionar inúmeras reflexões e discussões entre os alunos. Ademais, o professor poderia utilizar também uma situação paralela com uma famosa série de televisão, que costuma fazer bastante sucesso entre os jovens, e que mistura ciência com comédia: A série americana chamada *“The Big Bang Theory”*. O seguinte trecho da plataforma de vídeos Youtube ilustra de forma bem-humorada a experiência de Schrödinger, onde o personagem Sheldon, que é um físico teórico, tenta descrevê-lo para a personagem Penny, garçonne e aspirante a atriz. Enquanto a moça solicita conselhos amorosos, sobre aceitar ou não seguir um romance com um amigo, por receio de como a história poderia se desenrolar e sobre as consequências disso, Sheldon traz à tona uma analogia à experiência de Schrödinger, fazendo com que Penny reflita sobre a questão de que, só poderá ter certeza em relação ao que irá acontecer quando de fato tomar uma decisão.

O vídeo pode ser acessado de forma gratuita em sala de aula através do link abaixo: <<https://www.youtube.com/watch?v=SiiQwRPVig>>. A transcrição de parte do diálogo entre os personagens está descrita abaixo:

“Penny: Se as coisas não derem certo com Leonard, posso perder um grande amigo. Acho que ele não quer um casinho. Ele é do tipo que entra em uma relação por, como você diria, anos-luz.

Sheldon: Eu não diria isso. Ninguém diria isso. Ano-luz é uma unidade de distância, não de tempo.

Penny: Obrigada por esclarecer (...); Sheldon, você tem algo para me dizer que tenha a ver com o que eu estou falando?

Sheldon: Bom, vejamos. Podemos considerar o gato de Schrodinger.

Penny: Schrodinger? Essa é a mulher que mora no 2A?

Sheldon: Não. (...) De qualquer forma, em 1935, Erwin Schrodinger, em uma tentativa de explicar a interpretação de física quântica de Copenhagen, propôs um experimento onde um gato era colocado em uma caixa com um vidro de veneno que poderia quebrar a qualquer momento. Já que ninguém sabia quando o veneno seria lançado, até a caixa ser aberta o gato poderia estar vivo ou morto.

Penny: Desculpa, eu não entendi seu ponto.

Sheldon: Bom, mas é claro que você não entendeu, eu não terminei ainda. Você teria que ser uma vidente para ver isso, e não existem videntes.

Penny: Sheldon, qual é o seu ponto?

Sheldon: Assim como o gato de Schrodinger, sua relação em potencial com o Leonard pode ser pensada como boa ou má. É só abrindo a caixa que você realmente vai descobrir do que se trata.” (Série “The Big Bang Theory”, 2012).

Este vídeo, que apresenta legenda em português e curta duração (aproximadamente 4 minutos), pode ser utilizado como um interessante método para chamar a atenção dos alunos ao assunto. Atualmente, os jovens consomem grande quantidade de material áudio-visual, e esta é uma forma do professor se aproximar do cotidiano dos estudantes, trazendo um conteúdo relevante, e ao mesmo tempo, de maneira lúdica. De acordo com Mello, 2003:

“O lúdico na educação é utilizado para valorizar a perspectiva do aluno. Reencontrar o lúdico, entender seu valor revolucionário, torna-se imperativo se deseja preservar os valores humanos [...]. Da mesma forma, por meio dele podemos resgatar a criatividade [...]. O lúdico precisa ser utilizado durante o processo ensino aprendizagem de conteúdos científicos. Ele não é o fim, mas um meio para alcançar objetivos de forma prazerosa”. (Mello, 2003, p. 31).

Assim, realizando o paralelo de um livro didático com a cena de um sitcom através de uma famosa plataforma de vídeos, o aluno apresentará uma probabilidade muito maior de se interessar pelo tópico de ensino, e consequentemente, o professor poderá desencadear o processo de aprendizagem significativa na turma. O sitcom “The Big Bang Theory” pode ser uma boa recomendação de entretenimento aos alunos, uma vez que eles podem se divertir, e ao mesmo tempo, ser instigados ao aprendizado. A série apresenta conteúdo científico mesclado com humor, e todo o seu conteúdo acadêmico foi validado pelo físico e professor de física e astronomia da Universidade da Califórnia em Los Angeles, David Saltzberg. Em uma entrevista para a revista “Super Interessante”, publicada originalmente em 15 de Julho de 2012, David afirmou que atuava como um consultor científico, sendo responsável pela revisão e correção dos erros que eventualmente poderiam ser gerados no texto original da série. Assim, o corpo docente não teria a preocupação sobre indicar aos alunos alguma fonte com informações inverídicas.

Em sua inusitada aventura no País do Quantum, Alice foi conduzida a um novo cenário importante, a Academia Fermi-Bose, onde foi apresentada ao Diretor Principal, descrito como: “uma figura

imponente, um homem largo e muito corpulento que parecia ainda mais pesado e enorme com a beca acadêmica e o chapéu de bacharel que usava. Seu rosto redondo e corado era enfeitado por um bigode volumoso e costeletas”.

A dupla adentrou a academia, e enquanto andavam pelo prédio, Alice entendeu que o local seria uma escola, e os alunos seriam as partículas. Na sequência, a menina passou por alguns elétrons criando uma certa “algazarra”, disparando por corredores laterais. Como os elétrons eram todos iguais, e havia muita bagunça, Alice comentou que o momento da chamada na aula deveria ser um inferno. O diretor então esclareceu que: “Os elétrons não são tão maus. Nós apenas os contamos e vemos se o total está correto. Pelo menos o número dos elétrons permanece sempre o mesmo, então sabemos quantos deveríamos ter, mas com os fótons, nem mesmo isso funciona. Fótons são bósons, e por isso não se conservam. Você pode começar a aula com, digamos, trinta, e acabar a aula com cinquenta. Ou o número pode cair para menos de vinte - é difícil adivinhar. Isso dificulta muito a vida dos empregados da escola”.

Ao passo que a menina não entendeu o que seriam “bósons”, o diretor a levou até a aula de “Fatos de simetria para iniciantes”. Na aula, o professor disserta que: “A probabilidade de se fazer uma observação é dada pelo quadrado de sua função de onda, isto é, o valor da função multiplicado por si mesmo. Como vocês são todos idênticos, é óbvio que quando dois de vocês trocam de lugar, a diferença não é observável e por isso o quadrado de sua função de onda não se altera. Pode até parecer que não houve alteração nenhuma. Alguém sabe me dizer o que pode se alterar? Um dos “alunos-elétrons” responde que o sinal pode se alterar, e o professor confirma e complementa: “Há dois casos em que o quadrado de suas amplitudes não muda. Pode ser que a amplitude não se altere quando dois de vocês mudam de lugar. Nesse caso, as partículas são bósons, como vocês, os fótons. Contudo, há ainda outra possibilidade. Quando dois de vocês trocam de lugar, a amplitude pode se inverter. Muda de positiva para negativa e vice-versa. Neste caso, o quadrado permanece positivo e a distribuição de probabilidades fica inalterada, pois multiplicar a amplitude por si mesma leva duas inversões, o que resulta em nenhuma mudança. É isso que acontece com férmions como vocês, elétrons”.

Interferência didática 8: Este capítulo da obra de Gilmore é relevante para que o professor apresente aos alunos a discussão sobre partículas elementares, lembrando alguns conteúdos sobre a estrutura do átomo, e explicando outros tópicos novos. Assim, o professor poderia partir do subentendido de que os alunos, no ensino médio, já possuem o conhecimento

de que os átomos constituem todos os elementos. Com base neste princípio, o docente pode fomentar a discussão de “será que existe alguma estrutura ainda mais fundamental do que o átomo?”, de forma a instigar os alunos a participarem da aula, lembrando conceitos e definições de que o átomo é constituído de prótons, elétrons e nêutrons.

Considerando o universo das partículas, existem ainda outras subpartículas elementares que compõem os prótons, elétrons e nêutrons, que são os férmions e bósons, mencionados no trecho da história de Alice destacado anteriormente. Portanto, esta seria uma oportunidade do professor explicar sobre a existência dessas subpartículas, mencionando que são muito instáveis, razão pela qual, no trecho do livro destacado acima, o personagem professor utiliza a alusão de que, para os “alunos-bósons”, é difícil determinar a quantidade de estudantes que permanecem em sala de aula até o final, pois existe grande variação. De acordo com Resnick e Eisberg (1994):

“Nas estatísticas quânticas, as partículas descritas por autofunções anti-simétricas são denominadas férmions e as partículas descritas por autofunções simétricas são chamadas de bósons. Em outras palavras, as autofunções de um sistema de férmions mudam de sinal quando se trocam os índices de dois deles, enquanto as autofunções de um sistema de bósons não mudam de sinal numa tal troca de índices”. (Resnick e Eisberg, 1994, p. 481).

Apesar desta definição ser esclarecedora para o nível docente, é totalmente compreensível que o aluno do ensino médio não saiba o que é uma “autofunção”, e também não saiba sobre conceitos de simetria. Logo, se o professor explicasse unicamente com base na definição deste livro, haveria uma grande probabilidade do aluno não entender. Entretanto, na obra de Gilmore, durante a aula de “Fatos de simetria para iniciantes”, o personagem professor comenta sobre funções de onda de maneira geral, e traz exemplos de inversão ou não de amplitudes quando as partículas “trocam de lugar”. Ou seja, é a mesma explicação sobre férmions e bósons, porém com uma linguagem que se aproxima mais do ensino médio.

Adicionalmente, o professor poderia destacar para os alunos que o nome do capítulo do livro que está sendo estudado (Academia Fermi-Bose), se trata de uma homenagem a dois renomados físicos, Enrico Fermi e Satyendra Nath Bose, cujos trabalhos trouxeram grandes avanços no desenvolvimento das estatísticas quânticas.

Em um segundo momento, o diretor detalhou melhor sobre qual seria a diferença entre bósons e férmions: “Férmions são individualistas. Dois deles nunca farão

exatamente a mesma coisa, enquanto os bósons são sociáveis. Adoram andar em gangues, onde cada um se comporta da mesmíssima maneira que os outros.”

Nessa hora, o Mecânico Quântico levou Alice para fora da sala de aula. “Aí está”, ele disse. “Este é o Princípio de Pauli. Ele diz que dois férmions do mesmo tipo não podem nunca estar fazendo a mesma coisa, por isso só se pode ter apenas um em cada estado. O princípio se aplica a férmions de todo tipo, mas não a bósons”.

Interferência didática 9: Neste ponto, o professor pode elucidar mais características de férmions e bósons, para melhor compreensão dos alunos e ajuda no entendimento da comparação do autor do livro de Alice com um comportamento “individualista”. Assim, o docente poderia deixar claro que férmions possuem spins fracionários (como por exemplo, o elétron, que apresenta número quântico de spin igual a meio), enquanto bósons apresentam spins com valores inteiros (por exemplo, o fóton, que apresenta spin igual a 1).

Entretanto, esta explicação ainda não responde à pergunta sobre o “comportamento individualista”, pois esta característica é uma consequência do Princípio da exclusão de Pauli, citada em sequência no trecho destacado, pelo personagem “Mecânico Quântico”. De acordo com a definição de Atkins (2003):

“Somente dois elétrons podem ocupar um único orbital e, se dois ocupam um único orbital, então seus spins devem estar emparelhados. ‘Emparelhado’ significa que o spin de um elétron deve ser $\uparrow$ e o do outro $\downarrow$; o par é simbolizado por $\uparrow\downarrow$. Outra forma de expressar o princípio é observar que, pelo fato de um elétron num átomo ser descrito por quatro números quânticos variáveis, dois elétrons não podem ter os mesmos quatro números quânticos. O princípio de Pauli foi originalmente introduzido para esclarecer a ausência de certas transições no espectro atômico do hélio.” (Atkins, 2003, p. 33)

Novamente, o trecho acima faz uso do modelo de Bohr para descrever a “ocupação de orbitais” por elétrons. Sabe-se que a diferenciação do número quântico de spin na mecânica quântica se dá na função de onda descrita para cada elétron.

Assim, retomando as características de férmions e bósons, o professor pode orientar que apenas os férmions obedecem ao princípio de exclusão de Pauli, enquanto os bósons apresentam comportamento distinto, ou seja, não há restrição quanto ao número de espécies em um mesmo nível de energia. Portanto, quando Gilmore cita

“comportamento individualista” dos férmions, em que “dois deles nunca farão exatamente a mesma coisa, enquanto os bósons são sociáveis”, o autor está simbolizando de forma lúdica a relação entre essas partículas subatômicas e a associação com o princípio da exclusão de Pauli. Os bósons são “sociáveis”, pois podem ser acumulados em um determinado nível de energia, enquanto o mesmo não ocorre com os férmions, pois estes obedecem a uma hierarquia nos níveis de energia. A tabela abaixo pode ser utilizada em sala de aula para resumir o conteúdo abordado:

	Bósons	Férmions
Características básicas	Partículas idênticas de spin zero ou inteiro Ex: Fótons (spin = 1) Ex: Partícula alfa (spin = 0)	Possuem spins fracionários. Ex: elétrons, prótons, nêutrons, pósitrons; (todos com spin = 1/2)
Obedece ao Princípio de Exclusão de Pauli?	Não	Sim
Autofunções das partículas	Simétricas numa troca de índices das partículas	Anti-simétricas numa troca dos índices das partículas

Tabela 1: Conteúdo adaptado de EISBERG e RESNICK. Física Quântica - Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas GEN LTC; 1ª edição (30 julho 1979). Cap. 11: Estatística Quântica.

Em relação ao Princípio da Exclusão de Pauli, o docente pode ainda promover a discussão sobre: “Como dois elétrons podem coexistir num mesmo orbital se, por terem cargas de mesmo sinal, eles se repelem?” Discussões dessa natureza fazem com que os alunos participem mais ativamente da aula, e possam refletir criticamente sobre os conteúdos aprendidos. Nesse caso, seguindo o princípio da exclusão de Pauli, os elétrons que coexistem no orbital devem conter spins emparelhados. Logo, spins contrários apresentam a repulsão da carga negativa, entretanto, como giram em sentidos opostos (um gira no sentido horário, e o outro gira em sentido anti-horário), a consequência é que são gerados campos magnéticos invertidos, que irão se atrair; e a atração entre os campos magnéticos compensa a repulsão entre as cargas.

Um outro exemplo interessante de ser abordado, com relação ao cotidiano dos estudantes, é o laser. O Professor do IFRJ, Antonio Florencio, em sua vídeo-aula denominada “Quarks, Férmions, Bósons, Mésons, etc - Uma grande família de subpartículas”, publicada em agosto de 2017, cita que “a própria existência do laser é uma consequência dos fótons serem bósons, e portanto, é possível acumular fótons em um determinado nível de energia”. Assim, a luz do laser é uma forma particular de luz produzida através de um processo chamado de emissão estimulada. Uma característica importante do laser a ser ressaltada em sala de aula é que todas as pequenas porções de luz produzidas apresentam comportamento idêntico. Isso ocorre porque a

emissão estimulada faz com que os elétrons decaiam de maneira ordenada e sincronizada, gerando uma onda de luz com todos os fótons com a mesma direção.

CONCLUSÃO

A partir de toda a estrutura apresentada neste trabalho, foi demonstrado que é viável introduzir conceitos de Química Quântica no ensino médio, e que o paradigma de aulas estritamente conceituais e teóricas pode ser rompido através da ludicidade. O livro “Alice do País do Quantum” configura-se como uma importante aquisição pedagógica neste sentido, em que o professor consegue conduzir o aluno em uma jornada científica rumo às fronteiras do mundo subatômico, utilizando referenciais teóricos que sustentam essa prática teórico-metodológica.

Acredita-se que os trechos e capítulos selecionados da obra literária de Robert Gilmore, que englobam conceitos da mecânica quântica, possibilitam a compreensão do jovem estudante em sua última etapa da educação básica de ensino no Brasil. O papel do professor desencadeia-se como sendo fundamental neste processo, uma vez que, através das interferências didáticas apresentadas, o docente realiza a mediação entre os conhecimentos, e desmistifica a concepção comumente popularizada, de que a química em si seria árdua, dificultosa, e sem correlação com a realidade do estudante. Este trabalho evidenciou que, mesmo não utilizando a formalização matemática de Cálculo Diferencial e Integral, foi possível discutir sobre conceitos como o princípio da incerteza de Heisenberg, dualidade, distribuições de probabilidade, entre outros que compõem o universo quântico. Mesmo de forma qualitativa, esses conteúdos podem ser assimilados com uma aprendizagem estimuladora.

É extremamente importante que o aluno se aproprie de conhecimentos científicos para a sua formação como cidadão crítico e atuante na sociedade. Os avanços da pesquisa quântica em relação à tecnologia são incontestáveis, e este é um tema cada vez mais presente no cotidiano dos estudantes, como por exemplo no desenvolvimento da computação quântica e da nanotecnologia.

Em face do exposto, a educação científica na escola precisa ajudar o jovem a construir uma base sólida em relação a fenômenos químicos, para que ele consiga não apenas se posicionar frente a situações do cotidiano, com uma visão holística, mas também identificar inconsistências em pseudo-ciências, como teorias de “cura quântica”, que podem até mesmo gerar consequências graves em termos de saúde pública. Para este trabalho, foi utilizada uma obra literária como ferramenta para o lúdico, e destaca-se que é essencial que o lúdico seja aplicado com planejamento de conteúdo e de forma proposital, a

fim de que não seja apenas uma “aula divertida”, mas também um espaço de aprendizagem significativa.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. P. Sequência Didática para o ensino de Quântica. Universidade Federal do Tocantins, 2018.

ATKINS, P.W. Química Inorgânica. Editora Bookman, São Paulo, 2003.

CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. Química. Porto Alegre: Bookman, 2013.

COSTA, S.D.F. Física e Realidade. Escola de Ciências Exatas e da Computação. Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO). Junho de 2021. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1904/1/TCC_F%C3%ADsica%20e%20Realidade_Solu%C3%A1%20Daniele%20Freire%20da%20Costa%20_21junho2021.pdf>. Último acesso em 26/02/2023.

EISBERG, R.; RESNICK, R. Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos Partículas. Editora Campus, Rio de Janeiro, 1994.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. The Feynman lectures on Physics. 3.ed. v.1. São Paulo: Bookman, 2008.

FLORENCIO, A. Anotações de aula. Professor do IFRJ Maracanã, Vídeo-aula denominada “Quarks, Férmions, Bósons, Mésons, etc - Uma grande família de subpartículas”, publicada em agosto de 2017.

GILMORE, R. Alice no País do Quantum: A física quântica ao alcance de todos. Editora Zahar, Rio de Janeiro, 1998.

GOMES, G.G., e PIETROCOLA, M. O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: Um exemplo de quasi-história. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 2, 2604 (2011).

HOULLAUER, E. Química Quântica. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2007.

KRAUSE, D. “O gato de Schrödinger não está vivo e morto antes da medição: sobre a interpretação dos resultados quânticos”. Disponível em: <http://lna.unb.br/lna_n01_08_dkrause.pdf>. Último acesso em 18/12/2022. DOI:10.21452/LnA_serie_n_v01_book_seminario-logica-no-aviao-2013-2018_decio-krause_p.104-122.

MACHADO, S.S.L. Implicações culturais da teoria quântica: Caminhos metafóricos e as apropriações indêbitas. Universidade Federal de Santa Catarina. 2017. Disponível online através do link: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/186995/PECT0344-D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Último acesso em 06/11/2022.

MELLO, M. M. O Lúdico e o Processo de Humanização. In: MARCELLINO, N. C. Lúdico, Educação e Educação Física. Ijuí: Editora Unijuí, 2003.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem Significativa: a teoria e textos complementares. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2011.

NEVES, L.A.S. e ; SOUZA, A.R O livro paradidático no ensino de Física: Uma análise fabular, científica e metafórica da obra Alice no País do Quantum: A Física Quântica ao alcance de todos. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 33, n. 3, p. 1145-1160, dez. 2016.

OLIVEIRA, A. Universidade Federal de São Carlos. “O spin que move o mundo”. Publicação na Revista online “Ciência Hoje”. Disponível em: <[https://cienciahoje.org.br/coluna/o-spin-que-move-o-mundo/#:~:text=O%20spin%20%C3%A9%20uma%20propriedade,down%E2%80%9D%20\(para%20baixo\)>](https://cienciahoje.org.br/coluna/o-spin-que-move-o-mundo/#:~:text=O%20spin%20%C3%A9%20uma%20propriedade,down%E2%80%9D%20(para%20baixo)>)>. Último acesso em 21/12/2022.

SAKURAI, JJ; NAPOLITANO, Jim. Mecânica quântica moderna. Tradução técnica: Silvio Renato Dahmen. Porto Alegre: 2. ed. Bookman, 2013. 548 p.

SANTOS, K.B., MOREIRA, M.C.A.. A utilização das histórias do Homem Formiga como contexto para o Ensino de Física. Olhar de professor, Ponta Grossa, v. 25, p. 1-25, e-20055.037, 2022. Disponível online através do link: <<https://revistas.uepg.br/index.php/olhardeprofessor/article/view/20055/209209216880>>. Último acesso em 23/03/2023.

STENGER, V. The Unconscious Quantum: Metaphysics in modern physics and cosmology. Editora Prometheus Books, Michigan, 1995.

SOUZA, J.R., GUSMÃO, L.A. Transições eletrônicas do átomo de Hidrogênio descritas por sequências. Sociedade Brasileira de Matemática. XXXI Colóquio Nacional de Matemática Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada. 2013.

SUSSUCHI, E. M. e SANTOS, D.O. Anotações de aula. Professor da Universidade Federal do Sergipe (UFS). Aula sobre Orbitais atômicos e transições eletrônicas.