



MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

UNIVERSIDADE REGIONAL DO CARIRI
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 31

Edson Florindo Rabelo Ido

Conhecimento construído historicamente, em comunidade e no indivíduo: Uma proposta de texto de apoio para introdução à Mecânica Quântica no ensino médio articulando conceitos das teorias de Kuhn e Vigotski.

Juazeiro do Norte-CE

2025

Edson Florindo Rabelo Ido

Conhecimento construído historicamente, em comunidade e no indivíduo: Uma proposta de texto de apoio para introdução à Mecânica Quântica no ensino médio articulando conceitos das teorias de Kuhn e Vigotski.

Dissertação apresentada ao Polo 31 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Regional do Cariri como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Ensino de Física.

Orientador: Dr. Wilson Hugo Cavalcante Freire

Juazeiro do Norte - CE
2025

Ficha Catalográfica elaborada pelo autor através do sistema
de geração automático da Biblioteca Central da Universidade Regional do Cariri - URCA

Ido, Edson F. Rabelo

I21c Conhecimento construído historicamente, em comunidade e no indivíduo
Uma proposta de texto de apoio para introdução à Mecânica Quântica no ensino
médio articulando conceitos das teorias de Kuhn e Vigotski / Edson F. Rabelo Ido.
Juazeiro do Norte - CE, 2025.

85p. il.

Dissertação. Programa Nacional de Mestrado Profissional em Ensino de Física
da Universidade Regional do Cariri - URCA.

Orientador(a): Prof. Dr. Wilson Hugo Cavalcante Freire

Coorientador(a): Prof. Dr. Cláudio Rejane da Silva Dantas

1.Ensino de Física, 2.Mecânica Quântica, 3.Sistematização de conceitos,
4.Vigotski, 5.Kuhn; I.Título.

CDD: 370.11

Edson Florindo Rabelo Ido

Conhecimento construído historicamente, em comunidade e no indivíduo: Uma proposta de texto de apoio para introdução à Mecânica Quântica no ensino médio articulando conceitos das teorias de Kuhn e Vigotski

Dissertação apresentada ao Polo 31 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Regional do Cariri como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Ensino de Física.

Aprovada em 22 de agosto de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Wilson Hugo Cavalcante Freire - Orientador
Universidade Regional do Cariri

Dr. Cláudio Rejane da Silva Dantas – Coorientador
Universidade Regional do Cariri

Dr.^a Francineide Amorim Costa Santos – Examinadora
Universidade Federal do Cariri

Dr. Thiago Alves Moreira Nascimento – Examinador
Universidade Regional do Cariri

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus filhos, Levi, Felipe e Elisa, cujas iniciais usei para dar nome a sequência didática apresentada neste trabalho. Em especial, dedico àquela que foi minha companheira por mais de 25 anos e que, mesmo nos momentos mais difíceis, jamais deixou de me apoiar e torcer por mim. Somente ela, além de mim mesmo, tem dimensão completa da importância que a conclusão desta dissertação tem na minha vida. À Karoline Alencar, gratidão eterna por seu carinho e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos colegas e professores do MNPEF Polo 31. Em especial, ao orientador deste trabalho que além de orientação compartilhou comigo longas conversas que me motivam e inspiram a estudar física.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

EPIGRAFE

“O homem procura formar, de qualquer maneira, mas segundo a própria lógica, uma imagem simples e clara do mundo. Para isso, ultrapassa o universo da sua vivência, porque se esforça, em certa medida, por substituí-lo por essa imagem. De certo modo, é esse o procedimento de cada um, quer se trate de um pintor, de um poeta, de um filósofo especulativo [um metafísico] ou de um físico” (Einstein, 1981, p. 138-139).

RESUMO

O presente trabalho se propôs a produção de um texto didático de apoio que permita a introdução da Mecânica Quântica (MQ) no ensino médio. Dentre as características do conhecimento científico que, para Vigotski, são cruciais para a mudança qualitativa do pensamento do indivíduo está a sistematização dos conceitos. Portanto, buscou-se a construção de um texto que apresentasse uma organização conceitual e não apenas tópicos isolados de uma estrutura. Sobre a sistematização conceitual, argumentou-se que ela é encontrada em tempos em que a ciência normal de Kuhn se situa, ou seja, em torno de paradigmas. O texto produzido, após alguma discussão filosófica sobre as características da MQ, a organiza em três princípios e representações matemáticas utilizando uma introdução histórica para o primeiro princípio e um estudo sobre experimento de Stern-Gerlach (SG) e experimentos SG em sequência para apresentação dos outros princípios e as representações matemática num sistema de dimensão 2 e ênfase no princípio da incerteza. O texto foi usado com uma sequência didática que buscou destacar as características do conhecimento científico, conforme Vigotski e Kuhn. E foi aplicada para alunos do terceiro ano do ensino médio em uma escola da zona rural de município de Barbalha-CE, em agosto de 2024. Como resultado observou-se que o sistema de duas dimensões parece adequado, por sua simplicidade, à introdução do caráter estatístico da MQ e ainda deixa bastante evidente como um observável pode afetar a reprodutibilidade de um outro observável, relacionando isso ao princípio da incerteza. O texto é uma proposta inicial de sistematização da MQ neste nível e concluiu-se, também, que necessita ainda de melhorias, especialmente na adição de exercícios ou atividades que reforcem os conceitos a serem apreendidos pelos estudantes.

Palavras-chave: Mecânica Quântica; ensino de física; física moderna; Stern-Gerlach sistematização de conceitos; Vigotski; Kuhn.

ABSTRACT

The present work proposes a didactical support text which allows to introduce quantum mechanics (QM) at highschool level. Among the characteristics of scientific knowledge which, for Vygotsky, are crucial for qualitative change on the individual thinking is the concepts sistematization. For that, we have tried to develop a text that shows a conceptual organization, not only topics isolated from a structure. About conceptual sistematization, we have argued that it is found in times when Normal Science (Kuhn) takes place, which means, around paradigms. The produced text, after some philosophical arguments about QM's characteristics, has organized it in three principles and mathematical representations, using a historical introduction for the first principle and a study over the Stern-Gerlach experiment and sequential experiments of such to introduce the other principles and the mathematical representation in a two-dimension system emphasizing the uncertainty principle. The text was used with a didactical sequency which tries to stand out the characteristics of scientific knowledge according Vygotsky and Kuhn. It was applied to highschool students in a rural school of Barbalha-CE in august, 2024. As a result, we have pointed out that a two dimensional system seems to be adequate, by simplicity, to introduce the statistical feature of QM and, yet, pops out how an observable can affect the reproducibility of another, connecting this to the uncertainty principle. The text is an initial proposal for sistematization of QM at this level and we have also conclude that it needs some improvements related specially to the addition of activities or exercises which help students to learn the concepts.

Keywords: quantum mechanics; physics teaching; modern physics; Stern-gerlach; conceptual sistematization; Vygotsky; Kuhn.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 DIFICULDADES DO ENSINO DE FÍSICA QUÂNTICA NA EDUCAÇÃO BÁSICA	16
3 HISTORICIDADE DOS CONCEITOS: KUHN E VIGOTSKI.....	23
4 CONCEITOS DA MECÂNICA QUÂNTICA.....	31
5 METODOLOGIA E SEQUÊNCIA DIDÁTICA	36
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS	46
APÊNDICE A – Observação de Resultados Experimentais simulados e Construção de Modelos Interpretativos dos Experimentos Stern-Gerlach Sequenciais.....	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formação e Trajetória Profissional

Olhou mais de perto para a que estava mais próxima e observou uma figura pequena, da altura da sua cintura, no máximo. Era muito difícil defini-la, pois ficava pulando de um lado para o outro e se mexendo tão rápido que mal dava para ver direito. [...]

[...] “Por favor”, disse Alice a seu mais novo conhecido. “Poderia fazer a gentileza de parar por um momento para que eu possa vê-lo com mais clareza?”

“Sou bastante gentil”, disse o elétron, “mas receio que não haja espaço bastante. Mas vou tentar de qualquer forma.” Assim dizendo, ele começou a diminuir sua taxa de agitação. Mas quanto mais devagar se movia, mais se expandia para os lados e mais difuso ia ficando.

(Alice no País do Quantum, Robert Gilmore. ‘p. 2-3’)

O meu interesse por Física começou no Ensino Médio. A construção lógica e elegante com que a Física Newtoniana descrevia o mundo me fascinou, tudo parecia fazer sentido. Não me dei conta, e nem poderia pela forma como ela é apresentada aos estudantes do ensino básico, de dificuldades filosóficas apontadas já por contemporâneos de Newton, como Leibniz e o bispo G. Berkeley (Assis, 1998. Cap.5). Estava sendo instruído numa tradição científica de mais de três séculos. Os professores também comentaram brevemente sobre tópicos de Física Moderna e que aquela Física que estávamos estudando, embora funcionasse bem, era limitada em sua aplicação. Ao ler “Uma Breve História do Tempo” de Stephen Hawking achei muito interessante, mas entendi muito pouco da Física descrita ali. Uma coisa, porém, me intrigou muito: “como é que eles chegaram nessas ideias tão estranhas?”, “Como eles descobriram que as coisas funcionam assim?” A Física Quântica não parecia fazer sentido como a Clássica. Por já ter respeito ao conhecimento científico, acreditei que se eu fosse mais fundo no desenvolvimento histórico da questão eu iria, se não entender completamente, pelo menos responder as duas perguntas acima. Também acreditei ser esse o caminho para apresentar esses conceitos aos estudantes, visto que as discussões sobre o desenvolvimento histórico e filosófico da ciência têm pouco espaço, especialmente no ensino básico. Esta impressão foi confirmada durante meus estudos para este trabalho, Caruso e Oguri (2006) dizem concordar com Werner Heisenberg que, no prefácio de seu livro *Física e Filosofia*, afirma que “talvez a melhor maneira de abordar os problemas de Física Moderna seja através de uma descrição histórica do desenvolvimento da teoria quântica”. Ora, se nossa experiência atual mostra que temos tido problemas com movimentos negacionistas mesmo com fatos científicos concretos como o formato da Terra (a Terra já foi vista e fotografada desde uma perspectiva que permite-nos ver seu formato), o que esperar dos conceitos da Relatividade e Mecânica Quântica? O trecho do

livro de Robert Gilmore (1998) citado no início desta introdução parece realmente um conto como o de Alice no País das Maravilhas, cheio de coisas estranhas e irreais.

“Isto é o melhor que posso fazer” resfolegou o elétron. “Receio que quanto mais lentamente eu me mover, mais espalhado eu fico. As coisas são assim aqui no País do Quantum: quanto menos espaço você ocupa, mais rápido você tem de se mover, **h**. Uma das regras, e não há nada que eu possa fazer.”
(Gilmore, 1998)

Minha história no estudo de física continuou após o ensino médio, quando comecei a cursar licenciatura na Universidade Estadual do Ceará em Fortaleza, mas foi interrompida por ter seguido caminho profissional diverso, em empresa pública. Em 2017, retornei ao curso de Licenciatura em Física na Universidade Regional do Cariri (URCA). Enquanto na primeira vez que iniciei o curso em licenciatura eu tenha focado meus estudos mais na física pura, nesta segunda oportunidade, minha atenção se voltou mais às questões histórico-epistemológicas e de ensino de física. O primeiro parágrafo deste tópico é parte da introdução do meu trabalho de conclusão de curso. O interesse nestas questões se deveu, principalmente, pelo fortalecimento de movimentos anticientíficos e ainda ao aparecimento de diversas ideias pseudocientíficas, especialmente as adjetivadas de quânticas. Isto, aliado ao problema interessantíssimo e desafiador de abordar a física quântica numa linguagem acessível ao estudante do ensino médio me motivou na escolha do tema. A leitura de alguns artigos relacionados a história da Física, especialmente em um livro emprestado pelo orientador deste trabalho (Martins e Rosa, 2014) *História da Teoria Quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie* e *A Estrutura das Revoluções Científicas* (Khun, 2017), foram, também especialmente relevantes como motivação pessoal para essa escolha.

Do ponto de vista profissional, permaneci na empresa pública citada, mas voltei, após conclusão da licenciatura, a lecionar principalmente em escolas particulares com contratos temporários. Apesar de aprovado em concurso público para professor da rede estadual do Ceará de 2018, só assumi como efetivo em 2024 tendo usado essa oportunidade para aplicação deste trabalho em duas turmas de terceiro ano da Escola de Ensino Médio de Tempo Integral (EEMTI) Almiro da Cruz na zona rural do município de Barbalha-CE durante o mês de agosto do mesmo ano. Permaneço lotado na referida escola onde os desafios para o ensino de física permanecem, especialmente após redução da carga horária da disciplina.

1.2 Problemática e Objetivos

O ensino de física apresenta diversos desafios, desde a complexidade da disciplina, que envolve interpretação de problemas a partir de modelos e teorias que incluem representações matemáticas, até o problema do crescente movimento de negação da ciência. Hoje, vivemos ainda, no Brasil, uma desvalorização da disciplina que se vê na redução de sua carga horária. Os desafios parecem maiores quando pensamos na inserção de tópicos de física moderna, em especial a mecânica quântica. A complexidade do tema é maior pois o surgimento do que se chama de física moderna se apresenta na crise de conceitos clássicos e numa discussão profunda dos físicos do início do século XX sobre os fundamentos da física. A física quântica (FQ) é provavelmente a que apresenta maior complexidade conceitual pois seu formalismo, além de matematicamente complexo, permite uma grande diversidade de interpretações (Pessoa Jr. 2019) gerando uma dificuldade adicional nas tentativas de abordar FQ no ensino básico. Soma-se a isso a inadequação de materiais didáticos que, pelas dificuldades citadas, apresentam muitas vezes conceitos imprecisos ou desconectados em tópicos isolados que não permitem uma visão conceitualmente sistematizada da FQ.

As abordagens educacionais são diversas, onde destaca-se no capítulo 2 a discussão de Ostermann *et al* (2009) e Lima *et al* (2022) com uma abordagem mais fenomenológica ou mais histórica. Discute-se, também no capítulo 2, o problema educacional de se ter diversas interpretações da FQ e, também da dificuldade de identificar a essência que a diferencia da física clássica. Chamou-se esses problemas anedoticamente de “superposição” interpretativa e essencial. Pela falta de material adequado à abordagem do tema a nível do ensino médio mais as dificuldades inerentes à FQ, delimitou-se o objetivo deste trabalho: produzir um texto didático de apoio para o ensino de mecânica quântica na educação básica que seja historicamente consistente e possua sistematização conceitual tanto compreensível quanto cientificamente correta.

Tem-se, então, três questões a serem discutidas. A primeira: no que se refere a produção do texto de apoio como produto educacional, possui publicação com um de artigo de orientações no *site* do MNPEF, o qual apresenta orientações sobre a questão e aponta a pouca produção sobre temas de Física Moderna e Contemporânea, conforme Iramaia Jorge Cabral de Paulo, Coordenadora CPG Nacional do MNPEF-SBF. Destaco ainda do referido artigo, a ênfase que deve ser dada a uma leitura reflexiva e prazerosa que instiga a criatividade em contraste com a leitura rasa e volumosa, comum na formação acadêmica. Procurou-se seguir estas orientações na construção do nosso texto de apoio e, também nas duas outras questões, a

da consistência histórica e da sistematização conceitual compreensiva e cientificamente correta, questões que serão melhores discutidas em capítulos à frente.

A mecânica quântica (MQ) é um ramo da física altamente fundamentado em resultados experimentais e sua interpretação dominante foi construída sobre ideias positivistas (Pinto Neto, 2010). O positivismo nega que o inobservável possa ser conhecido (antirrealismo epistemológico) e defende que a ciência é uma descrição de fatos observáveis e uma teoria é um modo de ordenar o conhecimento desses fatos (Lisboa; Pessoa Jr., 2019). Apesar dessas características, a mecânica quântica permite um número muito grande de interpretações e, entre essas interpretações mais o uso de falas descontextualizadas de cientistas há a disseminação de possibilidades do uso de seus conceitos em movimentos ou correntes pseudocientíficas. Daqui surge um problema socioeducacional. Como evitar ou pelo menos mitigar a potencialidade de distorções do entendimento místico de fenômenos quânticos?

É possível avaliar que um estudo histórico crítico possa mostrar com clareza que a fundamentação da MQ está em experimentos muitos específicos onde se é possível observar comportamentos quânticos. Porém, objetivando-se a produção de um texto de apoio que leve a MQ à educação básica, um estudo histórico mais aprofundado poderia nos levar a uma aula puramente de história e filosofia da ciência ou nos fazer entrar em experimentos e artigos que dificilmente seriam bem compreendidos por estudantes sem treinamento científico. Uma outra característica da MQ que se destaca, e é importantíssima para o seu entendimento, é que ela foi estruturada sobre uma base muito abstrata matematicamente, o que a torna difícil de transpor didaticamente para a educação básica sem que se perca sua característica de uma mecânica bem estruturada formalmente ou, ainda, ao se tentar evitar essa estrutura matemática, seja perdida a relação entre seus conceitos.

Com o objetivo de abordar a MQ de forma que haja um entendimento básico dessa estrutura e que é desta estrutura que surgem as dificuldades e variedades de interpretações, buscou-se pressupostos teóricos que permitam tanto avaliar a construção e o posicionamento histórico deste ramo da física e, também, que permita compreender a importância dessa estrutura conceitual (sistematização) no desenvolvimento intelectual dos estudantes. No próximo capítulo, discutiremos os problemas encontrados sobre como abordar a FQ no ensino básico. A escolha dos teóricos se deu por estes trabalharem o posicionamento conceitual histórico (Kuhn) e a importância do conhecimento científico sistematizado para que o indivíduo passe usar conceitos de forma conscientizada (Vigotski). No capítulo 3 explicitaremos como pressupostos teóricos de Kuhn e Vigotski nos conduziram ao entendimento de que o conhecimento científico é uma construção histórica desenvolvida e aceita dentro de uma

comunidade (Kuhn, 2017) e que este conhecimento possui características que mudam qualitativamente o pensamento do indivíduo na interação interna entre conceitos espontâneos e científicos (Vigotski, 2009). No capítulo 4 revisamos aspectos de como a mecânica quântica está estruturada em torno de um formalismo matemático que a caracteriza de onde destacamos conceitos como a quantização, a interpretação probabilística e o princípio da incerteza. O capítulo 5 discute a metodologia de ensino e aplicação do texto de apoio desenvolvido em uma escola na zona rural do município de Barbalha-CE para duas turmas do terceiro ano do ensino médio. O capítulo 6 traz as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido.

2 DIFICULDADES DO ENSINO DE FÍSICA QUÂNTICA NA EDUCAÇÃO BÁSICA

O problema do ensino da física quântica (usamos esse termo num sentido mais geral que mecânica quântica) insere-se em um problema mais amplo que é o da inserção de tópicos de física moderna e contemporânea na educação básica. A intenção principal deste capítulo é indicar o caminho do estudo do tema que nos conduziu, após reflexões baseadas nos pressupostos teóricos discutidos no capítulo seguinte, à estruturação do nosso texto didático de apoio.

2.1 O Problema do uso da História e Filosofia da Ciência (HFC) para abordar FQ

A proposta inicial do uso da História e Filosofia da Ciência (HFC) nos levou à muitos altos e baixos durante a pesquisa e produção do texto. Ao que o caminho histórico da aceitação da ideia de quantização da energia e suas consequências parecesse ser seguro de seguir cronologicamente, passar deste caminho para uma mecânica quântica estruturada é um problema tanto interessante quanto complexo que nos deixaria presos muito mais ao ensino de história da ciência do que ao ensino da MQ. Não à toa, alguns autores passam a renunciar a abordagem histórica por uma mais fenomenológica. Ostermann *et al* (2009) defendem que seu grupo optou por abordar a FQ a partir dos seus fundamentos explorando, por analogias, suas diferenças com a física clássica. Esses autores defendem ainda que, a abordagem numa sequência cronológica das propostas teóricas e descobertas experimentais favorecem uma visão corpuscular gerando obstáculos epistemológicos. Assumem posteriormente que a abordagem histórica pode ser efetiva, mas apontam, com razão, que essa abordagem exige tanto um conhecimento muito vasto do professor quanto muito tempo para uma discussão ampla com os estudantes. Por fim, este grupo propõe uma abordagem com ênfase no conceito de dualidade onda-partícula e uma analogia com a óptica ondulatória utilizando o interferômetro de Mach-Zhender virtual construído pelo mesmo grupo (Ostermann *et al.* 2008; Ostermann *et al.* 2006).

Concordamos com Ostermann sobre as dificuldades no uso da história da ciência para o ensino da FQ, todavia propomos não sua renúncia, mas seu reposicionamento na estrutura da apresentação dos conceitos da FQ como melhor explicitado na metodologia. Lima *et al.* (2022) afirmam que muitos pesquisadores em Ensino de Física defendem usar, ao menos um pouco, a história da teoria quântica no seu ensino e propõem o uso de textos originais. Entendemos que a proposta do autor é direcionada principalmente para o ensino nas licenciaturas, onde já apresenta grandes desafios. Nossa proposta, porém, considera, em parte, essa ideia na construção do nosso material, não com textos originais completos pois eles seriam ininteligíveis

aos estudantes de nível médio. Procuramos utilizar, então, pequenos trechos desses artigos de forma a enriquecer a discussão da construção da ciência enquanto empreendimento humano. Portanto, não nos privamos de aproveitar a oportunidade de discutir natureza da ciência. El-Hani (2006), com base nas sínteses de McComas *et al* (1998) e Gil *et al* (2001) sobre ideias amplamente aceitas acerca da natureza da ciência, apresenta 14 pontos destacados por filósofos da ciência. Destes pontos queremos sintetizar o que contribui como proposta deste trabalho. *A ciência é uma construção sociocultural, portanto eminentemente humana, que busca explicações baseadas em observações da natureza, hipóteses e experimentos construídos para corroborar ou falsificar essas hipóteses.*

Neste sentido, ensinar ciências para o ensino básico é ensinar também cultura científica. Observou-se, numa primeira leitura de alguns livros didáticos, que é muito comum uma apresentação tradicional e linear da teoria quântica, apresentando equívocos históricos onde se pode entender a quantização da luz já no trabalho de Planck (1900), inclusive incluindo o nome dele no tópico de explicação do efeito fotoelétrico, quando é bem conhecida a ressalva de Planck (1911) ao “erro” de Einstein em defender a quantização da luz. Observou-se também afirmações problemáticas sugerindo que Einstein se inspirou no trabalho de Planck e assim ajudou a consolidar o seu nome, ou que Einstein removeu todos os problemas relativos ao efeito fotoelétrico. Problemas como esses ajudam a reforçar uma visão de uma Ciência construída por inspiração de grandes gênios, reduzindo seus conceitos a momentos de descobertas fantásticas.

Poderíamos ainda pensar, relativamente à FQ, se esses conceitos colocados de forma descontextualizada e às vezes de forma muito exagerada na divulgação científica, não poderiam ser fonte de eventos onde a palavra, exercendo influência sobre o pensamento, faz surgir mitos, conforme discussão de Cassirer (2013). “Toda designação linguística é essencialmente ambígua e, nesta ambiguidade, nesta ‘paronímia’ das palavras está a fonte primeva de todos os mitos” (p.18). E, ainda, “Mitologia, no mais elevado sentido da palavra, significa o poder que a palavra exerce sobre o pensamento...” (p.19). Acreditamos que esse tipo de apresentação da ciência facilita o uso descontextualizado de termos da ciência pelos movimentos anticientíficos ou pseudocientíficos que vêm se consolidando nos últimos anos com visíveis efeitos sociais e no ensino. Ao colocar o conhecimento científico historicamente aceito no mesmo patamar que sua mitologia, o indivíduo pode, a qualquer momento, se converter daquele para este no momento de lidar com informações do dia a dia, com grandes chances a favor de suas próprias mitologias pois já são parte de sua visão de mundo. Esta é uma outra preocupação com relação ao ensino de FQ: ensiná-la de forma a remover ideias místicas relacionadas ao uso descontextualizados dos conceitos da Física Quântica.

Os problemas citados no primeiro parágrafo não surgem, necessariamente, de uma falta de preocupação de autores e professores com questões epistemológicas, mas muitas vezes, da dificuldade de produzir material adequado que exponha de forma didática o conteúdo que se pretende ensinar e ainda conseguir apresentar uma visão adequada sobre a natureza da ciência. Uma abordagem cronológica pode deixar a impressão de cumulatividade na construção do conhecimento pois se quer sempre chegar no tópico a ser ensinado de forma mais ou menos concatenada. Uma abordagem histórica que enfoque muito a influência social, econômica, política e cultural sobre as ciências, embora tenha grande valor educacional, provavelmente vá contribuir pouco se o objetivo é ensinar um conteúdo específico. Apesar de nosso interesse em todos os aspectos relativos a esse empreendimento humano denominado de Ciência, decidimos nos ater as questões de ensino dos conceitos de Física Quântica e nossa atenção deve se dirigir à história dos conceitos que, por si mesma, já deveria excluir interpretações fora do contexto científico. Todavia esse problema parece não se resolver de forma tão “simples”.

A história da Física mostra um amplo debate sobre seus conceitos questionando seus fundamentos filosóficos do ponto de vista experimental e teórico-matemático (Max Jammer, 2011), o que sugere que aprender e ensinar Física não é trivial. Não ser trivial não implica ser impossível ou inacessível ao público amplo, quer dizer que o conhecimento produzido pela Física tem características que exigem dos estudantes engajamento na compreensão de estruturas conceituais que não se faz naturalmente no dia a dia. Ao estudar física, pode ser conveniente aceitar modelos explicativos que muitas vezes fogem de nossa percepção de mundo para que se possa, a partir deles, investigar seu potencial explicativo em problemas e experimentos, ou seja, é preciso que o estudante possua disposição para discutir a natureza filosoficamente (buscando entendimento e não apenas confirmações do que já se sabe). O estudante aceitar discutir a natureza do ponto de vista da Física implica aceitar que existem outros pontos de vistas que poderão gerar conflitos com sua visão de mundo. Nossa preocupação aqui não é, a priori, ensinar Física para quem vai ser físico, mas apresentar a Física aos estudantes do ensino básico de um ponto de vista filosófico, conceitual. É preciso destacar que dizer que se quer ensinar Física de um ponto de vista filosófico não significa dizer que se pretende fugir da matemática presente na Física ou do seu conteúdo historicamente situado. Nossa opinião é de que ignorar a matemática na Física é ignorar a origem e as características desta ciência. Ainda mais, desconsiderar as representações matemáticas na Física é desprezar um aspecto que se encontra no cerne das discussões sobre os conceitos desta ciência, especialmente com relação a Mecânica Quântica. Conceitos físicos não se desenvolvem e se modificam apenas no uso de palavras, eles carregam também significados em suas representações matemáticas. Sobre esta

questão, Pinto e Zanet (1999) apontam que alguns alunos de sua pesquisa viram como ataque à matemática sua tentativa de evitá-la no ensino de Física Moderna e propõe uma (re)valorização do formalismo da Física e da descrição matemática, ou seja, perceberam “a necessidade de enfatizar também a importância fundamental da descrição matemática para a Física, dando a ela seu verdadeiro significado...” (p.19).

Apresentam-se os seguintes desafios: Produzir um material que apresente um conhecimento atualizado (historicamente situado) da MQ, evitar uma abordagem puramente descritiva dessa teoria que não valoriza o desenvolvimento histórico e, conseqüentemente, não explicita o caráter dialético do conhecimento científico e, ainda, evitar que esse material seja puramente uma aula de história da ciência e não uma aula do tópico da física que se pretende ensinar.

2.2 SUPERPOSIÇÃO INTERPRETATIVA: O problema das diversas interpretações da FQ.

Uma dificuldade didática adicional que aparece ao se tentar montar um texto de apoio conforme proposto diz respeito às diversas interpretações da FQ. A Mecânica Quântica é uma teoria científica de imenso sucesso do ponto de vista de sua capacidade de produzir novas tecnologias e explicar/mapear sistemas em escala atômico-molecular e subatômica. O formalismo matemático desenvolvido na segunda década do século XX aumentou nossa compreensão da estrutura da matéria e, conseqüentemente, nossa capacidade de modificar a natureza para nossos interesses.

Guido Beck (1903-1988) afirmou, em 1945, que teorias físicas pretendem nos fornecer uma imagem de fenômenos físicos em um certo domínio. Os físicos estão mais acostumados a lidar com esta imagem do que com todos os fenômenos que ela possa representar e, finalmente, Beck afirma que foi na teoria quântica que pela primeira vez foi necessário separar formalismo matemático e representação (imagem) física (Beck, 2022). O que entendemos é que a falta de uma imagem bem definida da MQ seja responsável por suas diversas interpretações. Há pelo menos quatro interpretações básicas para a MQ, segundo a Interpretação Ondulatória, Corpuscular, Dualista Realista e a Interpretação da Complementaridade (Pessoa Jr.,2019). Isto cria uma dificuldade adicional para o ensino de física, já que não se pode apresentar uma imagem única fora do formalismo matemático. É, de fato, um problema filosófico.

Isto posto, faz-se necessário um posicionamento honesto de nossa parte ao propormos ensinar MQ sobre qual interpretação utilizar. A interpretação de Copenhagen ligada ao grupo de cientistas e relacionada ao princípio da complementaridade de Niels Bohr é a mais aceita

entre os físicos, ou pelo menos é a ensinada na maioria dos livros-texto que instrui os estudantes de Física e será a adotada por nós. A questão é tão complexa, que Pessoa Jr. (2019) aponta três tipos de complementaridade apresentadas por Bohr, e adotaremos a complementaridade de observáveis incompatíveis, como posição-momento, pois este tipo se conecta bem, conceitualmente ao princípio da incerteza. Talvez isso desaponte alguns autores de ensino de física, mas nosso motivo não é apenas por ser a interpretação mais aceita. Não se trata de aceitar o *status quo*, temos motivações ligadas ao objetivo do nosso trabalho que é de apresentar ao estudante do ensino básico do que se trata e quais princípios regem a MQ. O formalismo matemático da MQ em termos de postulados ligados a uma álgebra não-comutativa contém a parte operacional da mesma, embora deixe questões em aberto como uma explicação para o colapso da função de onda (o problema da medida).

A complementaridade de Bohr nos permite uma representação dos fenômenos associada a como o experimento foi construído e, a partir do conhecimento deste experimento, atribuir estados de acordo com a construção experimental. Desta forma, evita-se discussões sobre a realidade da função de onda antes que se entenda como um sistema quântico funciona. O estado é uma representação de potencialidades e só passa a ter significado físico mensurável quando associado matematicamente a um operador de uma grandeza física observável. A ideia é não atribuir realidade ontológica às ondas ou partículas. A dualidade onda-partícula se transforma no problema de se representar o estado do objeto quântico com uma função de onda colapsada ou não. Na verdade, ao desenvolver uma explicação de experimentos de Stern-Gerlach sequenciais usando o princípio da incerteza adaptado para nosso texto, a questão da dualidade sequer surge. Isto é proposital para evitar discussões que normalmente parecem tratar de uma mudança de natureza do objeto quântico e não uma mudança de arranjo experimental com características complementares. Alguns autores (Carvalho e al., 2023; Ostermann *et al.*, 2009; Lima *et al.*, 2022) seguem, direta ou indiretamente, a linha do uso da dualidade como conceito principal da MQ, talvez influenciados pela formação como físicos, o uso da analogia com fenômenos ópticos ou até mesmo pela cronologia histórica dos fenômenos quânticos. Nossa proposta segue mais o entendimento de Novaes e Studart (2016) que evitam o uso de conceitos clássicos como ondas e partículas e indicam a dualidade como um conceito difícil que pode dificultar a aprendizagem, o que concorda com a proposta da explicação do experimento de Stern-Gerlach usada em nosso texto.

2.3 SUPERPOSIÇÃO ESSENCIAL: O problema de caracterizar a essência da FQ relativamente à clássica.

Pessoa Jr. (2019), ao discutir qual seria a essência da Física Quântica (FQ), aponta nove formas de diferenciá-la da Física Clássica (FC). A primeira trata sobre o nome **quântico** que deriva de quantidades discretas como o *quantum* de energia. A presença de quantidades discretas em si não era novidade para a Física nos anos 1920 (quantização da carga, por exemplo), o que talvez caracterize melhor a FQ e a adjetive sejam os processos descontínuos, também citado pelo autor. Este também cita o caráter probabilístico e o princípio da superposição. Embora num contexto quântico esses dois pontos tenham diferenças essenciais da FC, a questão probabilística já aparecia na mecânica estatística e podemos ver superposição na descrição de ondas e até mesmo de partículas onde o vetor posição, por exemplo, é uma superposição de vetores unitários convenientemente escolhidos. Das outras formas possíveis de diferenciação entre FQ e FC descritas pelo autor, o papel do observador também poderia ser encontrado na FC, mas numa forma que dificilmente se faça paralelo, mesmo que matemático, com a FQ pois nesta, o que é chamado de observador está ligado ao problema da medida que modifica de forma essencial a descrição do fenômeno quântico. Para nós, o que vai caracterizar bem a FQ é o papel essencial da constante de Planck (h) cujo valor coloca uma escala onde os fenômenos quânticos devem ser considerados, os efeitos quânticos individuais. Também, o “Princípio da Incerteza” que nos ajudará a compreender como duas grandezas físicas observáveis guardam uma relação essencial (característica da natureza quântica do fenômeno) que impede o conhecimento preciso das duas ao mesmo tempo. E ainda, o caráter probabilístico da representação dos estados.

Dado que nosso texto de apoio se destina ao ensino básico, decidimos utilizar o termo **princípio** de uma forma livre indicando tratar-se de conceitos básicos para o funcionamento dos fenômenos quânticos. O termo **postulado** foi evitado por buscarmos uma abordagem histórico-conceitual e nem tanto formal do ponto de vista matemático. Os “postulados da mecânica quântica” podem ser encontrados em diversos livros-texto do ensino superior e sua linguagem matemática é inacessível ao ensino básico. O caso mais evidente dessa nossa escolha está já no primeiro princípio (Princípio Quântico) que pode ser imediatamente identificado com o “Postulado Quântico” de Bohr (Pessoa Jr., 2019, cap XIII).

Por tudo apresentado até aqui, além de uma introdução histórica para fundamentar o “Princípio Quântico” decidimos utilizar o experimento de Stern-Gerlach para um sistema de

dois estados. Conforme Sakurai (2013), este experimento explicita a “maneira quântica de pensar” ou, como preferimos dizer, deixa escancarado como um fenômeno quântico se comporta, como sua mecânica é descrita. Propomos uma apresentação da MQ para o ensino básico resumida em três princípios básicos e três regras de representação matemática. Apenas o primeiro princípio (quântico) terá uma justificativa mais histórica da origem do uso da constante de Planck, os demais serão apresentados com base na análise do experimento de Stern-Gerlach (ESG) e ESG sequenciais. O ESG original guarda, ainda, uma relação histórica com a chamada “quantização do espaço” de Bohr e, portanto, não será introduzido sem contexto histórico.

3 HISTORICIDADE DOS CONCEITOS: KUHN E VIGOTSKI

3.1 A Ciência Normal de Thomas Kuhn

Em seu livro clássico, *A Estrutura das Revoluções Científicas*, Thomas Kuhn afirma que a ciência não se desenvolve de forma linear e cumulativa, mas que possui saltos de desenvolvimento por meio do que ele chama de revoluções. Para ele a ciência passa por períodos os quais a pesquisa segue exemplos de uma ou mais realizações científicas que servem de modelos para a resolução de problemas, os paradigmas. A esses períodos ele chama de Ciência Normal, durante os quais, os novos cientistas são educados nestes paradigmas por meio de manuais e obras de referência. A prática da Ciência Normal, segundo Kuhn, é a de utilização dos paradigmas para a resolução de quebra-cabeças, no sentido de que, ao atacar determinado problema, o cientista acredita não só que dispõe de ferramental teórico para resolvê-lo como acredita que este tem solução (Kuhn, 2018, p.108). Durante a prática da Ciência Normal aparecem problemas que, sem a especialização e delimitação dos pontos relevantes a serem observados por um paradigma, jamais apareceriam. Alguns desses problemas podem parecer sem solução. Em um primeiro momento, a não solução é atribuída à incapacidade do cientista em articular o paradigma para resolver o problema (quebra-cabeça). Então ele passa a ser abordado de diversas maneiras e por vários membros dessa comunidade científica e, quando este parece realmente sem solução com o ferramental disponível, faz com que cientistas busquem alternativas explicativas que podem ser contrastantes com os paradigmas vigentes, isto pode provocar uma crise numa comunidade de especialistas e os paradigmas dessa comunidade passam a ser questionados. Surgem correntes de pensamentos concorrentes até que, após um período de crise, um novo paradigma pode surgir substituindo o anterior.

A epistemologia de Thomas Kuhn baseia-se em seus estudos históricos onde comumente se destaca os períodos de revoluções, onde há uma drástica mudança na estrutura conceitual de um campo científico que gera até mesmo dificuldades na comunicação entre cientistas por problemas de linguagem (incomensurabilidade de conceitos). A obra de Kuhn nos dá um entendimento histórico da ciência. “Se a história fosse vista como um repositório para algo mais do que anedotas e cronologias, poderia produzir uma transformação decisiva da imagem de ciência que atualmente nos domina.” (Kuhn, 2018, p.59) Após esta citação, Kuhn argumenta que mesmo a história, se perseguir o estereótipo a-histórico tirados dos textos e manuais científicos, contribuirá pouco para essa mudança na imagem da ciência. A imagem a que Kuhn se refere é imagem de uma ciência que vai linearmente acumulando conhecimentos, e ainda que esses conhecimentos são realizações acabadas. Credo desta forma, a História (da

Ciência) buscaria registrar apenas esses aumentos de conhecimento e os obstáculos para chegar a eles. Kuhn argumenta então, que haveria dificuldades em registrar esses eventos pois alguns são difíceis de precisar quando ocorreram (O descobrimento do oxigênio, por exemplo, ou quem concebeu a conservação de energia). Além disso o historiador se veria em dificuldades epistemológicas pois “*Teorias obsoletas não são em princípio acientíficas simplesmente porque foram descartadas.*” (Kuhn, 2018, p.61) Kuhn defende então que questões pessoais e históricas contribuem para formar as crenças de uma comunidade científica em determinada época, e admite, porém, que as observações e as experiências reduzem bastante a abrangência das crenças consideradas admissíveis. Dessa forma percebe-se que o conhecimento científico se localiza historicamente dentro de uma comunidade que produz este conhecimento e este não é estático, mas porque essa comunidade compartilha uma visão de mundo, dizemos que esse conhecimento está historicamente situado.

O destaque dado aos períodos de revoluções pode facilmente deixar apagado a importância que os períodos de prática da ciência normal têm na produção de momentos de revolução. Para exemplificar como a ciência normal conduz a problemas que detectam anomalias que podem gerar crises, precisamos deixar claro o que entendemos por ciência normal. Embora sejam bem conhecidos no meio acadêmico, alguns termos usados por Kuhn podem ter se tornados imprecisos ou até ter tomado um sentido negativo. Na edição de comemoração aos 50 anos, cuja tradução ao português usou-se neste trabalho, Ian Hacking cita em seu ensaio inicial que Kuhn admite, já no início dos anos 70, ter perdido o controle do vocábulo ‘paradigma’ (Estrutura, p.22. Referência à *Reflections on My Critics*). De forma que faremos um parêntese para deixar claro o sentido que se quer dar ao termo paradigma, essencial para identificar o que é Ciência Normal.

3.1.1 Paradigmas

Em um posfácio escrito em 1969 (7 anos após a primeira edição da “*Estrutura*”) Kuhn admite que a formulação inicial de sua obra mais famosa gerou dificuldades e mal-entendidos gratuitos e que, a maior parte dessas dificuldades giram em torno do conceito de paradigma. (Kuhn, 2017, p.279-280). Ele passa então a esclarecer que, embora tenha sido apontado que o termo fora utilizado de muitas maneiras diferentes na *Estrutura*, isso se dava principalmente devido a problemas estilísticos e que, corrigidos esses problemas, restariam dois usos distintos do termo. O primeiro uso, mais global, ele afirma que cientistas se refeririam como “teorias”, mas que o uso desse termo para Filosofia da Ciência restringiria o sentido que ele queria dar e, por isso, usaria o termo “matriz disciplinar”. Essa matriz disciplinar seria composta de:

‘generalizações simbólicas’, expressas em palavras ou símbolos matemáticos usadas pelo grupo sem discussão, funcionam como leis ou definições; ‘Modelos heurísticos ou ontológicos’, fornecem analogias ou metáforas preferíveis ou aceitáveis ao grupo; ‘Valores compartilhados’, dizem respeito a critérios para julgar proposições ou teorias. Valores que dizem respeito às predições como acuracidade e preferência às predições quantitativas sobre as qualitativas recebem adesão com mais intensidade, enquanto julgamentos relativos à simplicidade, coerência e plausibilidade variam muito de indivíduo para indivíduo. (p.292)

O segundo sentido para paradigmas é o de exemplos compartilhados. Este tem uma relação estrita com a educação do cientista e, para ser mais bem compreendido, é preciso entender que essa educação se dá em diversos níveis de complexidade. Em um nível inicial, se refere à assimilação dos conceitos e teorias vigentes por meio da resolução de problemas e exercícios no final de cada capítulo dos manuais. Kuhn cita um fenômeno comum no processo de aprendizagem do cientista que são os relatos de que, mesmo após ler e compreender o conteúdo de um capítulo de seu manual, o estudante sente dificuldades em resolver os problemas encontrados ao fim dele (p.297). Após encontrar maneiras de resolver esses problemas, estes passam a servir como exemplos para resolver outros que apareçam. Vejamos um trecho que julgamos importante para o entendimento do termo paradigma como exemplo compartilhado. “*o esboço da lei, digamos $f=ma$, funcionou como instrumento, informando ao estudante de similaridades procurar, sinalizando o contexto (gestalt) dentro do qual a situação deve ser examinada.(...)*” O estudante passa a resolver exercícios aplicando e observando similaridades “*Nesse meio tempo, assimilou uma maneira de ver testada pelo tempo e aceita pelo grupo.*” (p.298). O que Kuhn está fazendo aqui é tentar mudar a localização do conteúdo cognitivo da ciência (eu diria do cientista), mudar a ideia de que o conhecimento científico está fundamentado nas teorias e regras e que os problemas são fornecidos para desenvolver destreza no uso dessas teorias e regras (p.296). Esclarece então:

“Talvez ‘conhecimento’ seja uma palavra inadequada, mas há muitas razões para empregá-la. Aquilo que constitui o processo neurológico que transforma estímulos em sensações possui as seguintes características: foi transmitido pela educação; demonstrou ser, através de tentativas, mais efetivo que seus competidores históricos num ambiente de um grupo; e, finalmente, está sujeito a modificações tanto através da educação posterior como a descoberta de desajustamentos com a natureza. Essas são as características do conhecimento e explicam por que uso o termo.” (Kuhn, 2017. p.306)

Portanto, a construção de paradigmas como exemplos compartilhados está ligado diretamente à educação científica, e esta molda como um grupo de especialistas percebem

(dentro de um campo de pesquisa) a natureza e, conseqüentemente, norteiam seus trabalhos. Entendemos que o sentido mais geral, de matriz disciplinar, poderia ser mais facilmente relacionado, no estudo histórico, à um campo de pesquisa, enquanto o sentido mais restrito está mais relacionado a como o cientista assimilou essa matriz curricular por meio da educação. De fato, o conceito de paradigma é apresentado na ‘Estrutura’ de forma muito circular, gerando algumas dificuldades de entendimento. Aqui, paradigma será a matriz disciplinar, situada historicamente em uma comunidade científica que é assimilada por novos membros dessa comunidade por meio da educação.

3.1.2 Ciência Normal

Para entendermos como um paradigma pode gerar um campo de pesquisa científica, é preciso perceber que ele não é um modelo apenas para se reproduzir, como são os paradigmas de conjugações verbais de uma língua, mas é um objeto a ser articulado e precisado em condições novas e mais rigorosas (p.88). Aparece como uma promessa de sucesso.

“A ciência normal consiste na atualização dessa promessa, atualização que se obtém ampliando o conhecimento daqueles fatos que o paradigma apresenta como particularmente relevantes, aumentando a correlação entre esses fatos e as predições do paradigma e articulando ainda mais o próprio paradigma”. (KUHN, 2017. p.88)

Ciência Normal é a pesquisa firmemente baseada em realizações científicas passadas, paradigmas, por um grupo de pesquisa. Essas realizações são apresentadas, em campos de pesquisa bem amadurecidos, na forma de livros-texto que servem para educar o novo membro de um grupo científico. Como Kuhn esclarece, clássicos famosos da ciência desempenham, ou desempenharam, função semelhante, para determinados grupos. Por exemplo: *A Física de Aristóteles*, o *Almagesto* de Ptolomeu, a *Eletricidade* de Franklin, os *Principia* de Newton. (p.71). A ciência normal é, portanto, prática de pesquisa especializada em torno de paradigmas. Kuhn coloca que “*A aquisição de um paradigma e de um tipo de pesquisa mais esotérico que ele permite é um sinal de maturidade no desenvolvimento de qualquer campo científico que se queira considerar.*” (p.73)

Desde o ponto de vista de Thomas Khun, ciência normal, em torno de um paradigma, é sinal de maturidade de um campo de pesquisa bastante especializado. É evidente a influência da física na construção da epistemologia de Khun e, embora não necessariamente seja ideal para outras ciências, é possível concluir que só ensinamos física como ciência normal, em torno de um paradigma nos sentidos discutidos acima. Pode soar limitante do ponto de vista

educacional dizer que ensinamos somente em torno de um paradigma, mas, quando se tem consciência disto, é possível deixar explícito para os estudantes que ele está aprendendo sobre uma explicação dentre outras possíveis e, ainda, que esta foi a explicação estruturada historicamente dentro de uma comunidade científica. Isso também nos ajudou a compreender que para produzir um texto de apoio cientificamente correto ele deveria estar de acordo com o paradigma da física quântica enquanto ciência normal.

Ainda pode parecer, principalmente para nós que estamos pesquisando no campo de ensino de física, que se está caminhando para uma proposta de ensino tradicional ou bancário, mas isso se deve principalmente ao sentido negativo que o termo paradigma ganhou, especialmente nas ciências sociais. A ideia de que o paradigma é uma promessa sendo articulada pela comunidade científica já quebra um pouco a noção de rigidez conceitual que o termo possa carregar. Discutiremos na seção seguinte, como, segundo Vigotski, o conhecimento científico estruturado nos ajuda a pensar através de conceitos reais, conscientizados.

3.2 Conhecimento Científico em Vigotski

Utilizaremos, também, como referencial na construção do nosso trabalho a Teoria Histórico-Cultural de Vigotski e seu entendimento sobre as bases culturais dos conceitos em crianças e adultos. Vigotski (2009) defende, com base em experimentos realizados por ele e seus colaboradores, que antes da puberdade as crianças não usam verdadeiros conceitos no sentido dialético do termo. Para ele, as crianças (também os adultos em alguns casos, embora já tenham condições de usar conceitos reais) dão significados às palavras pensando-as em forma de complexos que são construídos através de experiências concretas e que, a palavra associada a um complexo funciona como o nome de uma família de objetos ou situações concretas associadas entre si por meio da escolha de um “traço” que depende das experiências do indivíduo. Segundo Vigotski (2009), somente em situações experimentais como as que ele realizou, ocorre de a escolha desse traço ser aleatória. No desenvolvimento real da criança esses traços são influenciados pelos adultos, já que se observa que o uso das palavras da criança, que já tenham certo domínio da fala, coincidem com a dos adultos e estes conseguem se comunicar sem muitas dificuldades (a linguagem é social). Embora essas palavras tenham, fenotipicamente, a mesma função dos conceitos, elas se originam numa forma de pensamento diferente, por complexos, e não em conceitos em sua forma natural e desenvolvida que, para Vigotski:

[...]pressupõe não só a combinação e generalização de determinados elementos concretos da experiência, mas também a discriminação, a abstração e o isolamento de determinados elementos e, ainda, a habilidade de examinar esses elementos discriminados e abstraídos fora do vínculo concreto e fatural em que são dados na experiência. (2009; p.220)

Vigotski chama de pseudoconceitos essas palavras usadas como conceitos na comunicação, mas que tem origem no pensamento por complexos.

Todo conceito (ou pseudoconceito), que possa ser usado para se comunicar por meio de uma linguagem, tem uma história. Essa história possibilita a comunicação, mas não livra a representação linguística de imprecisões devidas às peculiaridades ou mudanças em grupos sociais onde ela é usada. Os conceitos científicos, por sua vez, têm sua história nas comunidades científicas e são passadas às gerações por meio do ensino e treinamento científico (Kuhn, 2018).

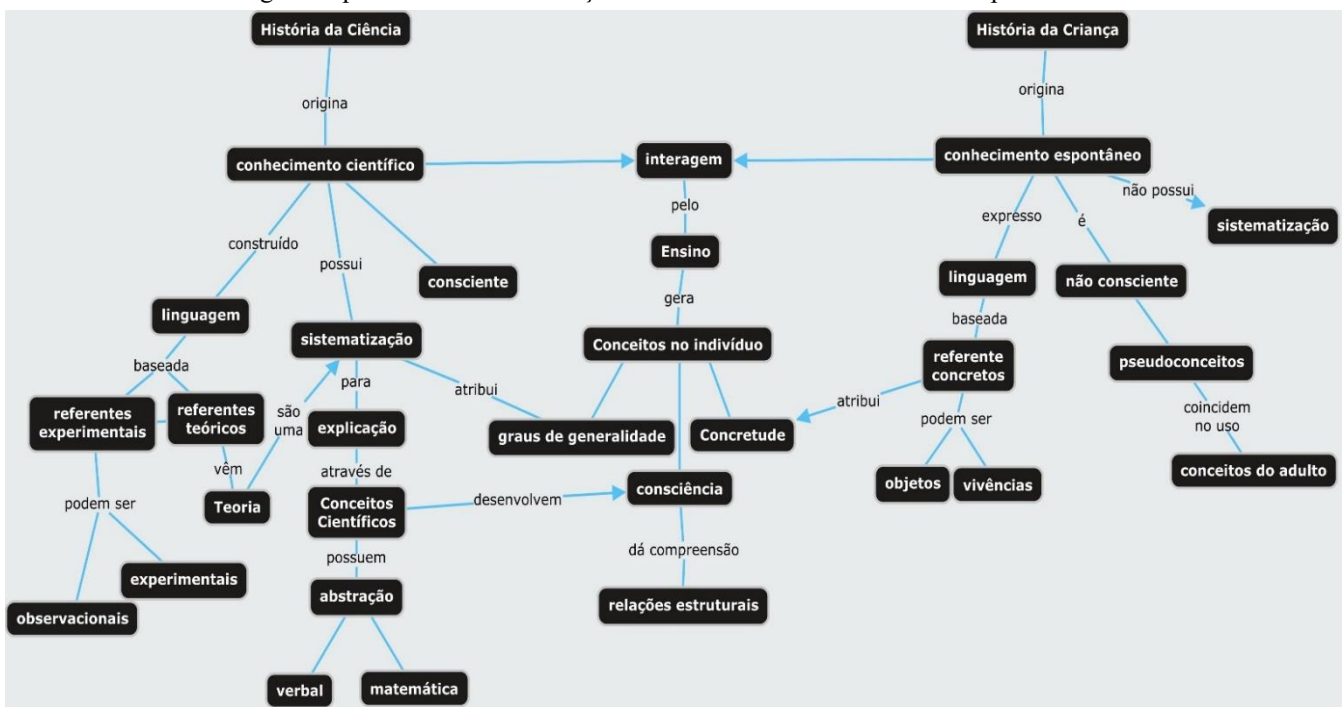
Conforme nossa interpretação da teoria de Vigotski, observamos por seus estudos que, diferentemente dos conceitos espontâneos que têm origem na história da criança e possuem referentes concretos (objetos e ações da vivência com um grupo social), os conceitos científicos, por sua origem na história da ciência, possuem características importantes para o desenvolvimento da criança. Estas características são:

- a) **Sistematização:** Conceitos científicos são definidos em termos de outros conceitos e, portanto, possuem uma hierarquização (graus de generalidade);
- b) **São Conscientizados:** Pela forma como foram construídos, têm-se uma consciência, pelo menos histórica, do que se sabe daquele conceito, são conceitos reais no sentido de Vigotski. Por sua natureza dialética, estão sujeitos a contradições e análise crítica e, portanto, podem ser articulados, reposicionados hierarquicamente na sistematização;
- c) **Têm referentes teóricos e experimentais:** A ampliação dos tipos de referentes possibilita a arbitrariedade (sentido Vigotski) no uso de conceitos, ou seja, pode-se utilizar conceitos em situações hipotéticas e testá-los por meio de experiências criadas para tal.

Pretendemos, na construção e desenvolvimento de nossa sequência didática levar esses três pontos em consideração. Ao colocar os alunos em contato com os referentes teóricos e experimentais retirados da história da ciência, pretende-se destacar a natureza dialética desses conhecimentos, especialmente quando do surgimento de um novo conceito ou ideia, como no caso da quantização da energia em Planck e suas contradições com o quantum de luz de Einstein, a quantização no átomo de Bohr e, finalmente o uso do experimento de Stern-Gerlach. É uma proposta onde se espera que estudante e professor interajam tomando consciência dos conceitos discutidos em vários níveis, individual e histórico.

Conforme mapa conceitual (Figura 1), baseado nas ideias de Vigotski (2009) o conhecimento científico interage com o conhecimento espontâneo por meio do ensino e o modifica num nível estrutural dando a eles consciência e sistematização, possibilitando a aplicação destes em situações hipotéticas. Por outro lado, conceitos científicos ganham concretude à medida que se tem contato e se possibilita seu uso em situações variadas. Em certo sentido, ele ganha mais realidade para o indivíduo.

Fig. 1 Mapa conceitual da interação entre conhecimento científico e espontâneo no indivíduo



Vigotski (2007) discute como os processos psicológicos mediados por signos são uma característica essencial dos processos mentais superiores e que a operação com signos para resolução de problemas não é nem inventada pela criança e nem ensinada por um adulto, mas é um processo histórico onde a criança sofre várias transformações *qualitativas* em seu pensamento ocasionados pela relação dialética do uso do signo em seu desenvolvimento biológico e na interação sociocultural. Ocorre que, na adolescência, espera-se que, através da aprendizagem, o pensamento mediado pelo signo e a palavra já esteja desenvolvido. O adolescente, público de nosso trabalho, já possui capacidade de usar signo ou palavras para controlar suas funções psicológicas e orientá-la no sentido da resolução de problemas (Vigotski, 2009).

Percebe-se, então, a importância do conceito conscientizado, identificado em uma palavra ou signo, com o qual o adolescente é capaz de controlar e direcionar o próprio

pensamento para resolução de problemas. Desta forma, é importante que os conceitos científicos tenham, na história do indivíduo, uma relação muito próxima à história do conceito na comunidade científica onde nascem. Parte daqui nosso guia teórico e epistemológico para a construção do nosso texto didático e sequência de ensino. As palavras que aparecem no ensino da mecânica quântica precisam manter seus contextos históricos para uma associação cientificamente correta. O termo “quântico”, por exemplo, fica estruturado no que chamamos de “Princípio Quântico” associado ao trabalho de Planck (1900), sua constante, a quantização da luz de Einstein (1905) e ao átomo de Bohr (1913). A superposição e interpretação estatística associadas a representação dos estados como possibilidades na descrição matemática do experimento de Stern-Gerlach e a “incerteza” como princípio relacionado a descrição de observáveis como operadores não-comutáveis, mas com efeito físico real conforme exemplificado nos experimentos SG sequenciais.

4 CONCEITOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

A abordagem didática dos livros-texto sobre mecânica quântica sofre variações de acordo com o autor. Como exemplo, citemos Moysés (2014) que opta por um capítulo de introdução histórica (Primórdios da Física Quântica) onde aborda a hipótese de Planck, efeito fotoelétrico e Compton, átomo de Bohr e as ondas de De Broglie para, no capítulo seguinte, introduzir o formalismo usando como base a polarização da luz por ser descrita com um pequeno número de variáveis. Griffiths (2011) inicia sua exposição pela equação de Schrödinger, a interpretação probabilística de Born, para a função de onda, e a solução dessa equação para alguns sistemas físicos. O formalismo é então abordado em capítulo subsequente, sempre deixando uma forte conexão cognitiva com o conceito de função de onda. Sakurai (2013) propõe uma introdução mais direta (“tratamento de choque”) usando o experimento de Stern-Gerlach, por considerar que esse sistema, de duas dimensões deixe o leitor-estudante mais afinado com a maneira quântica de pensar.

Há outros livros-texto conhecidos que têm suas variações na abordagem do tema. Mas, todos eles seguem em alguma medida o mesmo formalismo básico, embora nem sempre explícito, dos “Postulados da Mecânica Quântica”, cuja primeira axiomatização foi feita por Von Neumann em 1932 (Pessoa Jr, 2019). A formalização inicial da Mecânica Quântica se deu por dois caminhos distintos. Heisenberg, Born e Jordan seguiram o caminho do entendimento que grandezas físicas observáveis obedeciam a uma álgebra não comutativa que culminou na mecânica quântica matricial, atribuída principalmente a Heisenberg. Schrödinger, sob forte influência do trabalho de Louis de Broglie, chega a uma equação que nos dá a evolução dinâmica de uma função de onda a partir dos potenciais a que o sistema quântico estaria submetido. Na formulação de Schrödinger nos é dada a evolução temporal do estado, enquanto na de Heisenberg nos é dada uma evolução temporal da grandeza física a ser observada. Na construção experimental, a formulação de Schrödinger se liga a preparação do estado quântico (energia, momento, spin), e na de Heisenberg estaria mais ligada ao arranjo do aparelho de medição. A interpretação estatística da função de onda e a posterior escolha para a representação matemática em um espaço vetorial complexo nos mostra que tanto o sistema quântico, representado pelo estado $|\psi\rangle$ quanto observável quântico, representado por um operador \hat{Q} , são necessários para o cálculo de probabilidades dos resultados experimentais. Passaremos agora a descrever, de forma sucinta, os postulados que regem a MQ.

4.1 Postulados da Mecânica Quântica

POSTULADO 1: Em um instante t_0 , o estado de um sistema físico fechado é definido por $|\psi(t_0)\rangle$, vetor normalizado em um espaço vetorial complexo \mathbf{V} , usualmente com produto interno.

Princípio da superposição: uma combinação linear de vetores de estado também é um vetor de estado. Decorre de \mathbf{V} ser espaço vetorial.

Vamos exemplificar com um espaço de estado, \mathbf{V} , de dimensão 2, ou seja, podemos definir uma base para este espaço com dois vetores de estado $|0\rangle$ e $|1\rangle$ (ortonormais) de modo que podemos escrever qualquer estado $|\psi\rangle$ como uma superposição de $|0\rangle$ e $|1\rangle$. Por exemplo,

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle, \quad [4.1.1]$$

onde a e b são números complexos e a condição de normalização exige que,

$$|a|^2 + |b|^2 = 1. \quad [4.1.2]$$

POSTULADO 2: Toda grandeza física mensurável (observável) Q é descrita como um operador autoadjunto \hat{Q} agindo em \mathbf{V} .

Seguindo a ideia de usar exemplos de espaços de duas dimensões, teríamos os operadores de spin dados por:

$$\hat{S}_x = \frac{\hbar}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \hat{S}_y = \frac{\hbar}{2} \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}; \hat{S}_z = \frac{\hbar}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad [4.1.3]$$

Uma base adequada onde esses operadores podem atuar seria constituída pelas matrizes ortonormais,

$$|1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ e } |0\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad [4.1.4]$$

POSTULADO 3: A evolução temporal do vetor de estado $|\psi(t_0)\rangle$ é linear regida pela equação de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = \hat{H}(t) |\psi(t)\rangle, \quad [4.1.5]$$

onde $\hat{H}(t)$ é o operador autoadjunto associado a energia do sistema (hamiltoniano).

Deixamos esse postulado sem maiores explicações por não ter sido abordado no texto de apoio. Porém, nesta apresentação à nível superior, convém apresentá-lo.

POSTULADO 4: O único resultado possível para cada medição de um observável Q é um dos autovalores q_i do operador \hat{Q} .

Considere a base canônica do nosso espaço V , $|0\rangle$ e $|1\rangle$, conforme a [4.1.4]. Façamos o operador \hat{S}_z atuar sobre cada vetor da base:

$$\hat{S}_z \cdot |0\rangle = \frac{\hbar}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = -\frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \text{ logo,}$$

$$\hat{S}_z \cdot |0\rangle = -\frac{\hbar}{2} |0\rangle.$$

Realizando operação análoga sobre $|1\rangle$, obtemos,

$$\hat{S}_z \cdot |1\rangle = +\frac{\hbar}{2} |1\rangle.$$

Dando então, como resultados possíveis de uma medida de spin, os autovalores $\pm \frac{\hbar}{2}$.

POSTULADO 5: Quando o observável Q é medido em um sistema num estado normalizado $|\psi\rangle$, a probabilidade $\text{Prob}(q_i)$ de se obter o autovalor do espectro discreto q_i , do operador correspondente \hat{Q} é:

$$\text{Prob}(q_i) = |\langle \psi_i | \psi \rangle|^2,$$

Onde $|\psi_i\rangle$ é o autoestado associado ao autovalor q_i de \hat{Q} .

Das equações [4.1.1] e [4.1.2] e do fato que, no caso de experimentos para spin $\frac{1}{2}$ usados aqui, a probabilidade dos estados $|0\rangle$ e $|1\rangle$ serem iguais ($a = b$), um resultado possível é:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |1\rangle. \quad [4.1.6]$$

Sendo $\langle 0|0\rangle = 1$ e $\langle 0|1\rangle = 0$, temos que:

$$\langle 0|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}},$$

$\text{Prob}\left(-\frac{\hbar}{2}\right) = |\langle 0|\psi\rangle|^2 = \frac{1}{2}$, como esperado para o experimento do tipo Stern-Gerlach.

POSTULADO 6: Se a medição de um observável Q em um sistema de estado $|\psi\rangle$ fornece o resultado q_i , então o estado imediatamente após a medição é a projeção normalizada de $|\psi\rangle$ no autosubespaço associado a q_i .

De forma bem direta, se medirmos, em um experimento Stern-Gerlach o autovalor $-\frac{\hbar}{2}$, o estado do sistema passa a ser $|0\rangle$. Importante enfatizar que essa projeção só vale para o elemento medido, no caso a partícula com spin *down*, um outro elemento preparado da mesma forma que o medido permanecerá numa superposição de estados até que seja feita uma medida

sobre ele. Amaral, Baraviera e Cunha (2011) chamam esse processo de medida de “teste”, num contexto de bits quânticos, mas destacam que isso também é encontrado em um contexto clássico onde podemos testar resultados aleatórios e este resultado será único para aquele teste realizado. Destacam então que o que distingue o bit quântico dos clássicos é a existência de testes incompatíveis, ou seja, observáveis incompatíveis.

4.2 O Princípio da Incerteza em um sistema de dois estados.

Escolhemos para base do nosso espaço V nos postulados, os vetores $|0\rangle$ e $|1\rangle$, ortonormais. Poderíamos escolher outra base como os vetores abaixo, também ortonormais:

$$\begin{aligned} |+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} |0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |1\rangle \text{ e,} \\ |-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} |0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |1\rangle. \end{aligned} \quad [4.1.7]$$

Esses vetores, estão associados a um experimento Stern-Gerlach com campo magnético orientado perpendicularmente ao anterior. Chamaremos o primeiro de Z e o segundo de X . Sabemos que, se medirmos um elemento no estado $|0\rangle$, ele se manterá neste estado se passarmos novamente no experimento Z , conforme o postulado 6. Porém, se passarmos no X , ele terá probabilidade de $\frac{1}{2}$ para o estado $|+\rangle$ e, também para $|-\rangle$. Para ver isto, basta aplicar o postulado 5 aos dois vetores da base de X como descritos acima.

Se, então, fizermos o mesmo para o X inicialmente, dando resultado o estado $|+\rangle$. Este estado se manterá se passarmos novamente em X , mas dará probabilidade $\frac{1}{2}$ para os $|0\rangle$ e $|1\rangle$ se passarmos por Z na sequência. Isso mostra que fazer uma medida no experimento X afeta a reprodutibilidade do experimento Z e vice e versa e, isso está conectado à ideia dos observáveis incompatíveis e conseqüentemente ao princípio da incerteza.

Historicamente, o princípio da incerteza está ligado à explicação física que Heisenberg (1927) deu ao fato de que a álgebra que regia os observáveis era uma álgebra não-comutativa. Heisenberg chegou a expressão que nos diz que o produto dos desvios padrão da posição (Δx) e do momento linear (Δp) obedece a relação,

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}. \quad [4.1.8]$$

Uma expressão mais geral (ROBERTSON, 1929) que serve para outros observáveis, e que usaremos para os operadores de spin, é:

$$\Delta \hat{S}_x \cdot \Delta \hat{S}_z \geq \frac{1}{2} |\langle \psi | [\hat{S}_x, \hat{S}_z] | \psi \rangle|, \quad [4.1.9]$$

onde:

$$[\hat{S}_x, \hat{S}_z] = \hat{S}_x \hat{S}_z - \hat{S}_z \hat{S}_x = \frac{\hbar^2}{2} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ (comutador) e,}$$

$\Delta\hat{S}_x$ e $\Delta\hat{S}_z$, os desvios padrão de \hat{S}_x e \hat{S}_z , respectivamente.

Como para o spin temos apenas os valores $\pm \frac{\hbar}{2}$, o valor médio será zero e o desvio padrão $\frac{\hbar}{2}$, dando: $\Delta\hat{S}_x \cdot \Delta\hat{S}_z = \frac{\hbar^2}{4}$. [4.1.10]

O cálculo do lado direito da desigualdade [4.1.9] utilizando o estado [4.1.6] nos devolveria um resultado $\frac{\hbar^2}{8}$ que, comparando com [4.1.10], obedece a desigualdade.

Interessante notar que, por tratar-se de grandeza discreta com apenas dois resultados possíveis, a medida de um experimento X gera uma incerteza em Z que se traduz na superposição como a descrita em [4.1.7] com probabilidade de 50% para o estado $|0\rangle$ ou $|1\rangle$ e foi esta ideia que usamos para explicar os experimentos Stern-Gerlach sequenciais no nosso texto de apoio.

5 METODOLOGIA E SEQUÊNCIA DIDÁTICA

5.1 Metodologia de Ensino

Conforme discutido na fundamentação teórica, Vigotski mostra a importância da interação dialética entre conceitos espontâneos e científicos para a criança modificando àqueles qualitativamente. Os conceitos científicos têm como características serem sistematizados, conscientizados e permitirem uma ampliação de referentes para o indivíduo e pretendemos enfatizar essas características na nossa sequência. Como vimos também, Kuhn descreve ciência normal como aquela que trabalha na atualização e articulação de um paradigma, este no sentido de “matriz disciplinar” ou “exemplos compartilhados” segundo o que foi discutido anteriormente. Entendemos que as características do conhecimento científico das quais Vigotski fala, dizem respeito não a momentos de rupturas ou mudança de paradigma onde a comunidade científica se divide em interpretações e discussões sobre o significado de seus próprios conceitos, mas à prática da ciência normal. Por tudo isso, tivemos que desenvolver uma proposta de sistematização dos conceitos da MQ que julgamos acessível ao aluno dos últimos anos do ensino médio, conforme discutido no capítulo anterior. Do ponto de vista da metodologia e construção da nossa sequência, essa sistematização tenta impedir que a introdução histórica se desconecte da estrutura conceitual mais atual do tema.

SEQUÊNCIA LFE

Descreveremos agora, a sequência didática desenvolvida sobre os pressupostos teóricos apresentados. Leva-se em conta, primeiramente, que o conhecimento científico é sistematizado (organizado conceitualmente) então, essa sequência visa dar uma visão geral de como determinado ramo da física está organizado conceitualmente. Depois, levamos em conta que este ramo possui referentes experimentais que não provam definitivamente, mas justificam esta sistematização apresentada e, também, que essa sistematização está situada historicamente. É preciso esclarecer a expressão “situado historicamente”. Nenhum conteúdo regular de sala de aula apresentado a turmas de ensino básico tratará de pesquisas de ponta em determinado ramo da física, mas tratará dos conceitos que são paradigmáticos neste ramo. Desta forma, situado historicamente se refere a sistematização dos conceitos básicos que é aceita em um momento histórico neste ramo. Por exemplo, pensando no ensino básico, a mecânica clássica está sistematizada em torno das três leis de Newton (expressa em linguagem mais atual), e com notação de vetores (posterior a Newton) para representação matemática dos seus conceitos. Esta ideia de historicamente situado levou-nos a escolher uma sistematização que foi usada na construção do texto didático propositivo e à qual a sequência didática a seguir pretende enfatizar

A sequência então, que chamaremos de **LFE** ficou dividida em três etapas:

1 – LER (2 encontros de 50 minutos): É a etapa de contextualização histórica e propõe-se a leitura de trechos de trabalhos originais ou artigos retirados de revistas especializadas em ensino ou história da ciência a serem discutidos em sala sob a orientação do professor. O objetivo é uma introdução histórica que destaque situações que permitiram o nascimento daquele ramo levando em conta as dificuldades iniciais e o trabalho em comunidade. É importante que essa discussão leve a um ou mais conceitos e que estes sejam colocados dentro da sistematização situada historicamente.

Esta etapa tem o objetivo de apresentar a ciência como construção histórica e cultural dentro de uma comunidade específica. Podem ser trabalhadas questões relacionadas a natureza da ciência e as diferenças com outros tipos de conhecimento.

2 – FAZER (1-2 encontros de 50 minutos): Com o objetivo de ampliar os referentes para os conceitos dos estudantes, propõe-se uma prática experimental que, dentro das possibilidades, implique aplicação e leitura de resultados de um experimento que seja relevante conceitualmente para o tema abordado. Propomos ainda que sejam feitos modelos representativos desse experimento para que haja uma discussão desses resultados na etapa posterior.

3 – EXPLICAR (2 encontros de 50 minutos): Esta é a etapa final e o objetivo principal é a interpretação dos experimentos dentro da estrutura conceitual do tema abordado. Por ser a culminância do trabalho, todas as características dos conceitos científicos devem ser enfatizadas. Sobre a sistematização, retoma-se a explicação do experimento apontando agora as representações matemáticas que possam surgir. Sobre os referentes, relembra-se todos os fenômenos experimentais abordados tanto na parte histórica (etapa 1) quanto o experimento escolhido para a etapa 2. Conscientização, é algo que já deve vir se construindo ao permitir que os conceitos sejam discutidos e questionados. Esse é o momento de apresentar a organização conceitual daquele ramo da física fundamentada agora histórico e experimentalmente.

5.2 Metodologia de Trabalho

Apresentamos, a seguir, como ocorreu a intervenção a partir da sequência LFE, usando-se o texto de apoio desenvolvido, em duas turmas de terceiro ano de uma escola pública estadual do município de Barbalha-CE onde se dispunha de duas aulas de física semanais. As aulas foram ministradas durante o mês de agosto de 2024 conforme detalhado abaixo.

ETAPA 1 – LER: A etapa de contextualização histórica, envolveu a leitura de trechos dos trabalhos originais discutidos com o professor. Para não haver desconexão com a estrutura conceitual mantendo assim a sistematização do conteúdo, característica essencial do conhecimento científico de acordo com Vigotski (2009), o “Princípio Quântico” é exposto antes da discussão histórica dos trabalhos de Planck (1900), Einstein (1905) e Bohr (1913). Desta forma, se entende que essa discussão é sobre a história do princípio quântico e não da mecânica quântica enquanto ciência normal (Kuhn, 2017). Uma solução que encontramos para evitar que se confunda esse período inicial, conhecido como velha física quântica, com o conhecimento atual, ao mesmo tempo que é possível discutir o processo histórico da formação de um conceito e até de uma nova área de pesquisa. Esta etapa foi dividida em duas aulas.

Aulas 1 e 2: Introdução Histórica ao Princípio Quântico.

Aula 1: Max Planck (1900) x Albert Einstein (1905): Visões diferentes na origem do quantum de ação

Nesta aula foram apresentadas a solução de Planck para o problema da distribuição de radiação do corpo negro e a explicação do efeito fotoelétrico de Einstein de forma sucinta. Detalhes sobre essas questões poderiam ser trabalhados, mas isto exigiria mais aulas que dispúnhamos. Nossa ênfase foi em como Einstein e Planck tinham pelo menos até 1905 (Einstein, 1906; Rosa, 2004), visões diferentes sobre o significado do uso do quantum de ação (constante de Planck) na física. As aulas foram expositivas e dialogadas, usando trechos dos artigos originais (traduzidos) de Planck (1900) e Einstein (1905) e comentários posteriores dos mesmos expostos em powerpoint. O uso dos artigos originais permite ao aluno ter contato com a fala original dos famosos cientistas para, com a ajuda do professor (indivíduo mais capaz, Vigotski), compreender que uma nova ideia, na ciência moderna, não nasce de uma hora para outra da iluminação de um indivíduo, mas é construída por uma comunidade de pessoas dedicadas a estudar o problema.

Aula 2:

Parte 1: Niels Bohr e o “átomo quântico”: Aceitação de princípios de quantização na descrição da natureza.

Ainda no caminho do estabelecimento histórico do Princípio Quântico, Apresentamos a solução de Bohr para a instabilidade do modelo de átomo de Rutherford (1913) tentando acompanhar o desenvolvimento no uso da quantização para a solução de problemas atômicos. Interessante notar que neste artigo Bohr afirma que a comunidade científica à época (Solvay, 1911) reconhece a incapacidade da eletrodinâmica clássica em descrever sistemas atômicos. A metodologia foi a mesma da aula 1 e, também, deu-se ênfase as questões históricas. Discutir com mais detalhes o chamado “Átomo de Bohr”, também é recomendável na disponibilidade de mais aulas.

Parte 2: História e descrição do experimento original de Stern-Gerlach (SG).

Nesta parte foi apresentado o experimento original feito por Stern e Gerlach em 1922. Seu resultado é discutido em comparação com a expectativa clássica e, também relacionado ao trabalho de Bohr.

ETAPA 2 – FAZER: Como discutido na fundamentação teórica, conceitos científicos possuem referentes para além dos objetos e vivências do dia a dia o que possibilita o uso dos conceitos em situações arbitrárias conforme Vigotski (2009). Daí a importância da introdução de referentes experimentais ligados à teoria quântica.

No sentido, então, de ampliar os referentes para os conceitos dos estudantes, em uma aula, simulamos uma leitura dos resultados de experimentos Stern-Gerlach em sequência seguida da construção de modelos interpretativos (maquetes) desses resultados.

Aula 3: Leitura de resultados e construção de modelos dos experimentos sequenciais com caixas de fósforos.

Nesta aula enfatizamos mais a interação social entre alunos e entre alunos e professor. A proposta foi criar um ambiente de laboratório simulado onde o professor é o orientador e os estudantes terão o papel de interpretar os resultados em cartões (representando chapas ampliadas de uma suposta sequência de experimentos SG) construindo um modelo com caixas de fósforos conectadas com palitos de churrasco (sem pontas). Uma descrição mais detalhada das chapas e dos modelos está no produto educacional (Apêndice A). Para essa atividade, propôs-se a divisão em equipes com não mais que 6 estudantes responsáveis por ler e construir os modelos, também estimulando-se a divisão de tarefas. O objetivo principal aqui é familiarizar os estudantes com os experimentos sequenciais de uma forma mais leve já que a

discussão do tema costuma ser muito desgastante intelectualmente. Essa familiarização é importante também porque pretende-se que os experimentos SG se tornem um paradigma (no sentido de exemplo compartilhado) para compreensão da MQ enquanto ciência normal conforme a teoria de Kuhn (2017).

ETAPA 3 – EXPLICAR: Como etapa final, objetivou-se a interpretação dos experimentos SG em sequência no sentido de identificá-lo como paradigma para entendimento das características da MQ. Portanto, sendo a culminância do trabalho, todas as características dos conceitos científicos explicitadas por Vigotski (2009) foram enfatizadas. Sobre a sistematização, retomou-se a explicação do experimento SG apontando a quantização e agora as representações matemáticas. Sobre os referentes, relembramos todos os fenômenos experimentais abordados na parte histórica enfatizando tanto a quantização quanto os fenômenos que a MQ descreve. Conscientização, é algo que foi construído ao permitir que os conceitos fossem sendo discutidos e questionados. Em especial, antes de apresentar a explicação proposta, deixamos que os estudantes arriscassem interpretações dos resultados dos experimentos sequenciais. Esta etapa ficou assim dividida:

Aula 4: Princípios da Mecânica Quântica: Uma explicação conceitual a partir dos resultados dos experimentos sequenciais SG.

Usando os modelos construídos pelos estudantes, passamos a discutir como seria a descrição daqueles resultados para uma única partícula. Neste momento foram introduzidas as regras de representação e os outros dois princípios (estatístico e da incerteza). Detalhes importante de como propomos esta interpretação e as representações dos estados estão no texto de apoio. Esta aula é uma continuação da aula 3 e segue uma sequência que enfatiza uma característica da Física, que é criar modelos teóricos para explicar resultados experimentais que não tenham uma explicação de teorias existentes. Aqui entra o “Princípio da Incerteza” de Heisenberg. Como detalhado no texto de apoio, optamos por este princípio para fazer a interpretação dos experimentos sequenciais.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Importante destacar que a sequência foi desenvolvida especificamente para o problema que nos propomos neste trabalho, pois nos deparamos com problemas não só pedagógicos e conceituais, mas também filosóficos. Percebemos também, que é possível usar a estrutura organizada no texto de apoio sem tanta ênfase histórica. Optamos por mantê-la para possibilitar um entendimento no estudante de que aquela estrutura conceitual tem, como qualquer conceito, origem histórica em uma comunidade apresentando a ciência como uma elaboração humana.

Durante a aplicação da sequência, observou-se que a proposta inicial de quatro aulas, para a intervenção a partir da sequência, não foi adequada. A discussão histórica sobre as visões diferentes na origem do quantum de ação acabou tomando duas aulas. Apesar do interesse dos estudantes na discussão, foi necessário um tempo significativo para contextualizar e fazer compreender os fenômenos da radiação do corpo negro e efeito fotoelétrico, sendo necessária também uma explicação sobre o espectro eletromagnético. As aulas 3 e 4 foram então substituídas por uma discussão rápida sobre o átomo de Bohr e o experimento Stern-Gerlach (SG) seguida da leitura e construção dos modelos dos experimentos SG sequenciais (figuras 02 e 03).



Fig. 02 Estudantes fazendo a observação e discutindo os resultados.



Fig. 03 – Estudantes finalizando maquete baseada na chapa II.

Foi necessário, portanto, reservar mais duas aulas para se discutir os princípios da mecânica quântica, o que se mostrou mais adequado já que havia a proposta de se retomar o princípio quântico e, posteriormente, discutir os resultados experimentais reproduzidos pelas maquetes. A sequência aplicada de fato ficou assim distribuída:

LER
<u>Aulas 1-2:</u> Max Planck (1900) x Albert Einstein (1905): Visões diferentes na origem do quantum de ação
<u>Aula 3:</u>
Parte 1: Niels Bohr e o “átomo quântico”: Aceitação de princípios de quantização na descrição da natureza.
Parte 2: História e descrição do experimento original de Stern-Gerlach (SG).
FAZER
<u>Aula 4:</u> Leitura de resultados e construção de modelos dos experimentos sequenciais com caixas de fósforos.
EXPLICAR
<u>Aula 5-6:</u> Princípios da Mecânica Quântica: Uma explicação conceitual a partir dos resultados dos experimentos sequenciais SG.

No desenvolvimento das atividades, observou-se que o termo quântico não era totalmente desconhecido dos estudantes. Estes associaram o termo a palavras como ondas, vibrações, frequências e até computação. A aula introdutória visou abrir discussão e entendimento de que o adjetivo ‘quântico’ está associado à quantum ou quanta e, conseqüentemente, quantidades discretas de energia foram se tornando relevantes na explicação de fenômenos com a radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico e estabilidade do átomo, sempre tendo em vista o princípio quântico. A segunda etapa, embora tivesse propósito principal de familiarização com os resultados dos experimentos de Stern-Gerlach em sequência, se mostrou um excelente momento de integração entre estudantes e entre estes e o professor, permitindo maior interação sobre o tema nas aulas seguintes. Deixou-se claro que, a observação das “chapas” era mais lúdica e que o objetivo era realmente familiarizá-los com os resultados reais. Durante a aula de interpretação dos resultados, o caráter estatístico foi compreendido com relativa facilidade por haver apenas duas opções de resultado no ESG (*spin up* ou *down*). Então, foi aceito pela maioria que, no caso de se passar apenas uma partícula o que teríamos seria 50% de probabilidade para cada um dos resultados. A relação entre os *spins* cima-baixo e esquerda-direta não teve a mesma facilidade de entendimento e obtivemos apenas um comentário que apontou na direção correta. Um estudante sugeriu que devia haver alguma coisa que impediria a obtenção de um resultado preciso para as duas direções (X e Z). Nas palavras dele, “quando X só passa em um lado, Z tem que poder passar nos dois e o contrário também, se X puder os dois, Z fica só em um”. Nesta aula usamos essa fala para introduzir a relação de incerteza entre esses observáveis e aplicá-la na interpretação dos resultados.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Começamos nosso trabalho com o objetivo de produzir um texto didático de apoio que aborde mecânica quântica de forma a ser historicamente consistente, que não gere interpretações equivocadas sobre a construção do conhecimento científico e que tenha uma organização conceitual compreensível (para alunos do último ano do ensino básico) sem perder a correção científica. O problema perpassou por diversas dificuldades. Nossa proposta inicial era usar História e Filosofia da Ciência para abordar cada conceito da física quântica, mas encontramos no estudo da HFC elementos que nos mostraram que os conceitos são ensinados conforme um contexto histórico de forma que, se queremos ensinar FQ hoje é nesse contexto que devemos pensar. Conforme nossos estudos seguiam, outras questões foram surgindo. Do ponto de vista do conteúdo, a MQ está fundamentada em um formalismo matemático inacessível ao ensino básico e percebemos que muito do significado dos conceitos que os físicos de hoje dão aos fenômenos quânticos se baseiam nesse formalismo. A solução para tentar, ainda que de forma superficial, abordar esses aspectos do formalismo, foi apresentar uma representação matricial dos operadores de spin agindo sobre os estados. A maior parte do estudo e reflexão se deu, porém, em cima do problema das interpretações e da essência da FQ. Acreditamos que a complementaridade de Bohr foi a mais adequada aos nossos objetivos pois mantém nossos “pés no chão” com relação ao que se pode afirmar sobre funcionamento da Mecânica Quântica atrelando este funcionamento a cada arranjo experimental. Como explicado anteriormente, o experimento SG foi escolhido pela reduzida possibilidade de resultados, apenas dois, onde a parte estatística pôde facilmente compreendida pelos estudantes e possibilitou, ainda que com certa dificuldades, evoluir a discussão aos experimentos sequenciais e relacioná-los ao princípio da incerteza de um ponto de vista que pareceu ser compreensível e não faz parecer que se trata de um problema de precisão de medida, como acontece ao associar o princípio à medidas de posição e momento por um fóton mais ou menos energético.

Acreditamos que o texto de apoio produzido atendeu as expectativas quanto ao proposto. Observamos ainda que o texto poderia ser ampliado com mais pesquisa e até enriquecido com proposta de exercícios e aplicações utilizando a representação matricial, mas isso exigiria mais tempo de estudo para transformar esses exemplos ou exercícios acessíveis aos estudantes do ensino médio e ainda, mais tempo de sala de aula, que não dispúnhamos, para aplicação destas questões pois até a proposta inicial de quatro aulas não foi o suficiente para o que tínhamos planejado. Com todas os desafios conceituais e metodológicos que o tema proposto nos

colocou, acreditamos que foi possível apresentar um material que não faz direcionamentos historicamente incorretos no entendimento do desenvolvimento inicial da FQ e ainda que associar esse período ao entendimento do que chamamos de princípio quântico impede ao estudante achar que a explicação do efeito fotoelétrico de Einstein em 1905, por exemplo, é MQ colocando esse importante artigo em sua devida posição histórica. A organização do tema em princípios e representações matemáticas pareceu atender a compreensibilidade desejada. Embora não tenha sido possível fazer avaliações quantitativas de aprendizagem, não notamos grandes diferenças no formato que as leis de Newton são apresentadas aos mesmos estudantes. É evidente que uma compreensão maior dos conceitos exigiria aplicações em problemas e situações diversas, como ocorre, também no ensino de qualquer tema de FC. A impressão geral deixada pela interação com os estudantes é que eles se interessam por tópicos de física moderna e contemporânea e, também, pelo processo de desenvolvimento desse conhecimento evidenciando a relevância da pesquisa nesses tópicos. Nosso objetivo, porém, não foi trabalhar um tópico isolado, mas tentar construir uma organização conceitual da MQ para que conceitos sobre esse assunto não apareçam deslocado de uma sistematização conceitual, ao que o texto de apoio também nos pareceu apontar numa direção interessante.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Bárbara; BARAVIERA, Alexandre; CUNHA, Marcelo. **Mecânica Quântica para Matemáticos em Formação**. Rio de Janeiro: IMPA, 2011.

ASSIS, André. **Mecânica Relacional**. Campinas: UNICAMP, Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, 1998.

BECK, G. **Formalismo Matemático e Representação Física**. Tradução: Antonio Videira; Tradução: Rafael Luz. 1 ed. São Paulo: Scientiae Studia, 2022.

BACHELARD, G. **A Filosofia do não** (Filosofia do Novo Espírito Científico - Título da tradução portuguesa); Lisboa :Editorial Presença, 1972.

BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, 2018.

CARUSO, Francisco; OGURI, Vitor. **Física Moderna: Origens clássicas e fundamentos quânticos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

CARVALHO, Alexandre; PIMENTEL, Rafael; CARVALHO, Regina; LABURU, Carlos. A linguagem, a epistemologia e o ensino conceitual da dualidade onda-partícula. **Revista Brasileira de Ensino de Física.**, v.45, 2023.

CASSIRER, Ernst. **Linguagem e mito**. Trad, J. Guinsburg, Miriam Schnaiderman, São Paulo: Perspectiva, 2013.

EINSTEIN, Albert. “Concerning an Heuristisc Point of View Toward the Emission and Transformation of Light.” *Anallen der Physik* (Leipzig) **17**, 1905, p. 132-148. Disponível em: [Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909 \(English translation supplement\) Page 86 \(100 of 416\) \(princeton.edu\)](#). Acesso em: 31 mai. 2021.

EINSTEIN, Albert. **Como vejo o mundo**. Trad. H. P. de Andrade. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1981.

EL-HANI, Charbel N. Notas sobre o Ensino de História e Filosofia da Ciência na Educação Científica de Nível Superior. In **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. SILVA, Cibelle C. (org.), São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

GIL, D.; FERNANDEZ, I., CARRASCOSA, J.; CACHAPUZ, A., e PRAIA, J. Para uma imagem não-deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**,v.7, n.2, p.125-153, 2001.

GRIFFITHS, David. **Mecânica Quântica**. Trad. Lara Freitas, 2 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

JAMMER, Max. **Conceitos de Força: Estudo sobre os fundamentos da dinâmica**. Trad. Vera Ribeiro, Rio de Janeiro: Contraponto: Ed PUC-Rio, 2011.

LISBÔA, Roseny; PESSOA Jr, Osvaldo. **Visões Filosóficas sobre a Ciência e Natureza: Uma análise das concepções de professores de física.** 1 ed. São Paulo: FiloCzar, 2019.

KUHN, Thomas. **A Estrutura das Revoluções Científicas;** Trad. Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira, 2 reimp da 13 ed. São Paulo: Perspectiva, 2018.

MARTINS, André F. P., História e Filosofia da Ciência no Ensino: Há muitas pedras nesse caminho... **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.24, n.1, p.112-131, abr. 2007.

MARTINS, Roberto; ROSA, Pedro. **História da Teoria Quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie.** 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

MCCOMAS, W. F.; ALMAZROA, H.; CLOUGH, M. P. The nature of science in science education: An introduction. **Science & Education**, v. 7, n. 6, p. 511-532, nov.1998.

NOVAES, Marcel; STUDART, Nelson. **Mecânica Quântica Básica.** 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016.

NUSSENZVEIG, Moysés. **Curso de Física Básica, 4: ótica, relatividade, física quântica.** 2 ed. São Paulo: Blucher, 2014.

OSTERMANN, F.; PRADO, S.D. e RICCI, T.S.F. Desenvolvimento de *software* para o ensino de fundamentos de física quântica. **A Física na Escola**, v.7, n.1, p.22-25.

OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Cláudio; PRADO, S. D.; RICCI, T. F. Investigando a aprendizagem de professores de física a cerca do fenômeno de interferência quântica. 2008. **Ciência & Educação.** v.14, n.1, p.35-54.

OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Cláudio; PRADO, S. D.; RICCI, T. F. Fundamentos da Física Quântica à luz de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. 2009. **Revista Eletrônica de Enseñanza de las Ciéncias.** v.8, n.3.

PAULO, Iramaia. **O Texto Didático de Apoio como Produto Educacional: Uma opção viável.** Disponível em: <https://www1.fisica.org.br/mnpef/sites/default/files/anexospagina/Orientacoes-Texto-Didatico-MNPEF.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2025.

PINTO NETO, Nelson. **Teoria e Interpretações da Mecânica Quântica.** 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2010.

PINTO, A. Custódio; ZANETIC, J. É possível levar física quântica para o ensino médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física.**, v.16, n.1: p. 7-34, abr. 1999.

PLANCK, Max. “On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum” *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* v. 2, 1900, p.237-245. English Translation from “The Old Quantum Theory” ed. By D. ter Haar, Perfamon Press, 1967, p. 82.

SAKURAI, J. J.; NAPOLITANO, Jim. **Mecânica Quântica Moderna.** Trad. Sílvia Renato Dahmem. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

VIGOTSKI, Lev S., **A formação social da mente**; Trad. José Cipolla Neto *et al.*, 7 ed. São Paulo: Martins Fonte, 2007.

VIGOTSKI, Lev S., **A construção do pensamento e da linguagem**; Trad. Paulo Bezerra, 2 ed. São Paulo: Martins Fonte, 2009.

APÊNDICE A



Universidade Regional do Cariri

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 31

Edson Florindo Rabelo Ido

PRODUTO EDUCACIONAL

PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA:
Uma proposta de sistematização conceitual para o ensino Básico

Juazeiro do Norte - CE
2025

Edson Florindo Rabelo Ido

PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA:
Uma proposta de sistematização conceitual para o ensino Básico

Este produto educacional é parte integrante da dissertação: **Conhecimento construído historicamente, em comunidade e no indivíduo:** Uma proposta de texto de apoio para introdução à Mecânica Quântica no ensino básico articulando conceitos das teorias de Kuhn e Vigotski., desenvolvida no âmbito do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 31 – URCA, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Dr Wilson Hugo Cavalcante Freire

Juazeiro do Norte – CE
2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos colegas e professores do MNPEF Polo 31. Em especial ao orientador deste trabalho que além de orientação compartilhou comigo longas conversas que me motivam e inspiram a estudar física.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

Sumário

Princípios da Mecânica Quântica: Uma proposta conceitual visando alunos dos últimos anos do ensino básico.	54
1 – Princípio Quântico.....	61
2. Princípios Probabilístico e da Incerteza	70
3 Experimentos SG Sequenciais.....	76
4 Considerações Finais	78
APÊNDICE A – Observação de Resultados Experimentais simulados e Construção de Modelos Interpretativos dos Experimentos Stern-Gerlach Sequenciais.....	81
REFERÊNCIAS	86

Princípios da Mecânica Quântica: Uma proposta conceitual visando alunos dos últimos anos do ensino básico.

INTRODUÇÃO

A Mecânica Quântica (MQ) é uma teoria científica de imenso sucesso do ponto de vista de sua capacidade de produzir novas tecnologias e explicar resultados de sistemas em escala atômica. O formalismo matemático desenvolvido nas primeiras décadas do século XX aumentou nossa compreensão da estrutura da matéria e, conseqüentemente, nossa capacidade de modificar a natureza para nossos interesses. Guido Beck (1903-1988) afirmou, em 1945, que teorias físicas pretendem nos fornecer uma imagem de fenômenos físicos em um certo domínio. Os físicos estão mais acostumados a lidar com esta imagem do que com todos os fenômenos que ela possa representar e, finalmente, Beck afirma que foi na teoria quântica que pela primeira vez foi necessário separar formalismo matemático e representação (imagem) física (BECK, 2022). O que entendemos é que a falta de uma imagem bem definida da MQ seja responsável por suas diversas interpretações. Há pelo menos quatro interpretações básicas para a MQ (PESSOA Jr. 2019) o que cria uma dificuldade adicional para o ensino de física, já que não se pode apresentar uma imagem única fora do formalismo matemático.

Isto posto, faz-se necessário um posicionamento honesto de nossa parte ao nos propor a ensinar MQ sobre qual interpretação utilizar. A interpretação de Copenhague ligada ao grupo de cientistas e relacionada ao princípio da complementaridade de Niels Bohr é a mais aceita entre os físicos, ou pelo menos é a ensinada na maioria dos livros-texto que instrui os estudantes de Física e será a adotada por nós. Talvez isso desaponte alguns autores de ensino de física, mas o motivo não é apenas por ser a interpretação mais aceita. Não se trata de aceitar o *status quo*, temos motivações ligadas ao objetivo do nosso trabalho que é de passar ao estudante do ensino básico do que se trata e quais princípios regem a MQ. O formalismo matemático da MQ em termos de postulados ligados a uma álgebra não-comutativa contém a parte operacional da mesma, embora deixe questões em aberto, como uma explicação para o colapso da função de onda (o problema da medida). A complementaridade de Bohr nos permite uma representação dos fenômenos associada à como o experimento foi construído e, a partir do conhecimento deste experimento, atribuir estados de acordo com a construção experimental. Desta forma, evita-se discussões sobre a realidade da função de onda antes que se entenda como um sistema quântico funciona. O estado é uma representação de potencialidades e só passa a ter significado físico mensurável quando associado matematicamente a um operador de uma grandeza física

observável. A ideia é não atribuir realidade ontológica às ondas ou partículas. A dualidade onda-partícula se transforma no problema de se representar o estado do objeto quântico com uma função de onda colapsada ou não. Na verdade, ao desenvolver uma explicação de experimentos de Stern-Gerlach sequenciais usando o princípio da incerteza adaptado para nosso texto, a questão da dualidade sequer surge. Isto é proposital para evitar discussões que normalmente parecem se tratar de uma mudança de natureza do objeto quântico e não uma mudança de arranjo experimental com características complementares.

Pessoa Jr. (2019), ao discutir qual seria a essência da Física Quântica (FQ), aponta 9 formas de diferenciá-la da Física Clássica (FC). A primeira trata sobre o nome quântico que deriva de quantidades discretas como o *quantum* de energia. A presença de quantidades discretas em si não era novidade para a Física nos anos 1920 (quantização da carga, por exemplo), o que talvez caracterize melhor a MQ e a adjective, sejam os processos descontínuos, também citado pelo autor. Este também cita o caráter probabilístico e o princípio da superposição. Embora num contexto quântico esses dois pontos tenham diferenças essenciais da FC, a questão probabilística já aparecia na mecânica estatística e podemos ver superposição na descrição de ondas e até mesmo de partículas onde o vetor posição, por exemplo, é uma superposição de vetores unitários convenientemente escolhidos. Das outras formas possíveis de diferenciação entre FQ e FC descritas pelo autor, o papel do observador também poderia ser encontrado na FC, mas numa forma que dificilmente se faça paralelo, mesmo que matemático, com a FQ, pois nesta o que é chamado de observador está ligado ao problema da medida que modifica de forma essencial a descrição do fenômeno quântico. Para nós, o que vai caracterizar bem a MQ é o papel essencial da constante de Planck (h) cujo valor coloca uma escala onde os fenômenos quânticos devem ser considerados, os efeitos quânticos individuais e o “Princípio da Incerteza” que nos ajudará a compreender como duas grandezas físicas observáveis guardam uma relação essencial (característica da natureza quântica do fenômeno) que impede o conhecimento preciso das duas ao mesmo tempo.

Dado que este texto de apoio se destina ao ensino básico, utilizamos o termo “princípio” de uma forma livre, indicando tratar-se de conceitos básicos para o funcionamento dos fenômenos quânticos. O termo postulado foi evitado por buscarmos uma abordagem histórico-conceitual e não muito formal do ponto de vista matemático. Os “postulados da mecânica quântica” podem ser encontrados em diversos livros-texto do ensino superior e sua linguagem matemática é inacessível ao ensino básico. O caso mais evidente dessa nossa escolha está já no

primeiro princípio (Princípio Quântico) que pode ser imediatamente identificado com o “Postulado Quântico” de Bohr (v. Pessoa Jr., 2019, cap XIII).

Nossa apresentação aqui se dará utilizando o experimento de Stern-Gerlach para um sistema de dois estados. Conforme Sakurai (2013), este experimento explicita a “maneira quântica de pensar” ou, como preferimos dizer, deixa escancarado como um fenômeno quântico se comporta, como sua mecânica é descrita. Propomos uma apresentação da MQ para o ensino básico resumida em três princípios básicos e três regras de representação matemática. Apenas o primeiro princípio (quântico) terá uma justificativa mais histórica da origem do uso da constante de Planck, os demais serão apresentados com base na análise do experimento de Stern-Gerlach (ESG) e ESG sequenciais. Esperamos, dentro das possibilidades de uma sala de aula real, passar uma visão estruturada da MQ.

METODOLOGIA E SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Vigotski (2009) mostra a importância da interação dialética entre conceitos espontâneos e científicos para a criança modificando àqueles qualitativamente. Os conceitos científicos têm como características serem sistematizados, conscientizados e permitirem uma ampliação de referentes para o indivíduo e pretendemos usar essas características na nossa sequência. Kuhn (2018), por sua vez, descreve ciência normal como aquela que trabalha na atualização e articulação de um novo paradigma, este no sentido de “matriz disciplinar” ou “exemplos compartilhados”. Entendemos que as características do conhecimento científico das quais Vigotski fala, dizem respeito não a momentos de rupturas ou mudança de paradigma onde uma comunidade científica se divide em interpretações e discussões sobre o significado de seus próprios conceitos, mas à prática da ciência normal. Por tudo isso, tivemos que desenvolver uma proposta de sistematização dos conceitos da MQ que julgamos acessível ao aluno dos últimos anos do ensino básico. Do ponto de vista da metodologia e construção da nossa sequência, essa sistematização tenta impedir que a introdução histórica se desconecte da estrutura conceitual mais atual do tema.

A nossa sequência então, que chamaremos de **LFE** (em homenagem aos meus filhos Levi, Felipe e Elisa) ficou dividida em três etapas:

1 – LER: É a etapa de contextualização histórica e envolve a leitura de trechos dos trabalhos originais discutidos com o professor. Para não haver desconexão com a estrutura conceitual mantendo assim a sistematização do tema, o “Princípio Quântico” é exposto antes da discussão histórica dos trabalhos de Planck (1900), Einstein (1905) e Bohr (1913). Desta forma, se entende que essa discussão é a discussão da história do princípio quântico e não da mecânica quântica como um todo. Uma solução que encontramos para evitar que se confunda esse período inicial, conhecido como velha física quântica, com o conhecimento atual ao mesmo tempo que é possível discutir o processo histórico da formação de um conceito e até de uma nova área de pesquisa. Esta etapa foi dividida em duas aulas.

Aulas 1-3: Introdução Histórica ao Princípio Quântico.

Aula 1-2: Max Planck (1900) x Albert Einstein (1905): Visões diferentes na origem do quantum de ação

Nesta aula deve ser apresentada solução de Planck para o problema da distribuição de radiação do corpo negro e a explicação do efeito fotoelétrico de Einstein de forma sucinta. Detalhes sobre essas questões podem ser trabalhados, na disponibilidade de mais aulas.

Enfatizamos em como Einstein e Planck tinham pelo menos até 1905 (EINSTEIN, 1906; ROSA, 2004), visões diferentes sobre o significado do uso do quantum de ação (constante de Planck) na física. A aula será expositiva e dialogada usando trechos dos artigos originais (traduzidos) de Planck (1900) e Einstein (1905) e comentários posteriores de acordo com o exposto no item 1.1 deste texto. O uso dos artigos originais permite ao aluno ter contato com a fala original dos famosos cientistas para, com a ajuda do professor (indivíduo mais capaz, segundo Vigotski), compreender que uma nova ideia, na ciência moderna, não nasce de uma hora para outra da iluminação de um indivíduo, mas é construída por uma comunidade de pessoas dedicadas a estudar o problema.

Aula 3:

Parte 1: Niels Bohr e o “átomo quântico”: Aceitação de princípios de quantização na descrição da natureza.

Ainda no caminho do estabelecimento histórico do Princípio Quântico, Apresentaremos a solução de Bohr para a instabilidade do modelo de átomo de Rutherford (1913) tentando acompanhar o desenvolvimento no uso da quantização para a solução de problemas atômicos conforme item 1.2. A metodologia é a mesma da aula 1 e também dá-se ênfase as questões históricas. Discutir com mais detalhes o chamado “Átomo de Bohr”, também é recomendável na disponibilidade de mais aulas.

Parte 2: História e descrição do experimento original de Stern-Gerlach (SG).

Nesta parte será apresentado o experimento original feito por Stern e Gerlach em 1922. Seu resultado é discutido em comparação com a expectativa clássica e relacionado ao trabalho de Bohr, item 1.3.

2 – FAZER: No sentido agora de ampliar os referentes para os conceitos dos estudantes, em uma aula, simularemos uma leitura dos resultados de experimentos Stern-Gerlach em sequência seguido da construção de modelos interpretativos (maquetes) desses resultados. Detalhes no anexo A.

Aula 4: Leitura de resultados e construção de modelos dos experimentos sequenciais com caixas de fósforos.

Nesta aula enfatizamos mais a interação social entre alunos, e entre alunos e professor. A proposta é criar um ambiente de laboratório onde o professor é o orientador e os estudantes terão o papel de interpretar os resultados em cartões (representando chapas ampliadas de uma

suposta sequência de experimentos SG) construindo um modelo com caixas de fósforos conectadas com palitos de churrasco (sem pontas). Uma descrição detalhada das chapas e dos modelos está no anexo A. Para essa atividade, propõe-se a divisão em equipes com não mais que 6 estudantes responsáveis por ler e construir os modelos, também é importante estimular a divisão de tarefas. O objetivo principal aqui é familiarizar os estudantes com os experimentos sequenciais de uma forma mais leve já que a discussão do tema costuma ser muito desgastante intelectualmente.

3 – EXPLICAR: Esta é a etapa final e o objetivo principal é a interpretação dos experimentos SG em sequência, porém, por ser a culminância do trabalho, todas as características dos conceitos científicos devem ser enfatizadas. Sobre a sistematização, retoma-se a explicação do experimento SG apontando a quantização e agora as representações matemáticas. Sobre os referentes, relembra-se todos os fenômenos experimentais abordados enfatizando tanto a quantização quanto os fenômenos que a MQ descreve. Conscientização, é algo que já deve vir se construindo ao permitir que os conceitos sejam discutidos e questionados. Em especial, na última aula, deixamos que os estudantes arrisquem interpretações dos resultados dos experimentos sequenciais. Esta etapa ficou assim dividida:

Aula 5-6: Princípios da Mecânica Quântica: Uma explicação conceitual a partir dos resultados dos experimentos sequenciais SG.

Usando os modelos construídos pelos estudantes, passamos a discutir como seria a descrição daqueles resultados para uma única partícula. Neste momento são introduzidas as regras de representação e os outros dois princípios (estatístico e da incerteza). Detalhes importante de como propomos esta interpretação e as representações dos estados, estão nos tópicos 2 a 4. Esta aula é uma continuação da aula 3 e segue uma sequência que enfatiza uma característica da Física que é criar modelos teóricos para explicar resultados experimentais que não tenham uma explicação de teorias existentes. Aqui entra o “Princípio da Incerteza (Indeterminação)” de Heisenberg. Como explicado mais à frente, optamos por este princípio para fazer a interpretação dos experimentos sequenciais.

Importante destacar que nossa sequência foi desenvolvida especificamente para o problema que nos propomos neste trabalho pois nos deparamos com problemas não só pedagógicos e conceituais, mas também filosóficos. Percebemos também, que é possível usar a estrutura organizada neste texto de apoio sem tanta ênfase histórica. Optamos por mantê-la para possibilitar um entendimento no estudante de que aquela organização conceitual tem, como qualquer

conceito, origem histórica em uma comunidade. A sequência foi pensada também para aplicação em duas turmas de terceiro ano de uma escola pública estadual do município de Barbalha-CE onde se dispunha de duas aulas de física semanais. As aulas foram aplicadas no mês de agosto de 2024.

1 – Princípio Quântico

Princípio Quântico: Há, nos processos de emissão e absorção de radiação pela matéria uma descontinuidade essencial simbolizada pela constante de Planck (h). Esses processos se dão pela troca individualizada e localizada de cada *quantum* de energia, $\epsilon = h \cdot f$.

Este princípio afirma que, para fenômenos que estudam a interação da radiação (“luz”) com a matéria, deve ser levada em conta a troca individualizada e localizada de *quanta* de energia cada um com valor igual a $h \cdot f$, onde f é a frequência que caracteriza a radiação emitida ou absorvida. Importante destacar que essa descontinuidade nos processos onde o *quantum* de ação de Planck (h) se torna relevante é essencial, ou seja, característica desses processos. Este princípio se fundamenta principalmente nos trabalhos dos anos anteriores ao surgimento da Mecânica Quântica formalizada e conduziu os físicos da época à referida formalização. Destacam-se os trabalhos de Planck (1900), Einstein (1905, 1907) e Bohr (1913)

1.1 Planck (1900) x Einstein (1905)

Essa constante aparece pela primeira vez nos trabalhos de Planck sobre a radiação do corpo negro em 1900. Em outubro deste ano, Planck foi forçado a rever sua fórmula e de Wien para a distribuição de energia do corpo negro por causa dos resultados experimentais de Rubens e Kurlbaum. Planck fez uma interpolação matemática entre a expressão que ele usou para derivar a lei que Wien havia proposto e outra a partir de expressão de Rayleigh-Jeans que concordava com os dados de Rubens-Kurlbaum para uma outra faixa de comprimentos de onda e chegou a uma função que descrevia com precisão os dados experimentais.

Nas semanas que se seguiram, Planck procurou o significado físico para sua equação pois não achara satisfatória sua derivação inicial, como se vê em suas palavras.

“Em todo caso, mesmo que essa fórmula fosse plenamente verificada pela experiência, nunca poderia ser considerada mais do que uma feliz fórmula de interpolação. Desse ponto de vista, teria um valor bem limitado.” (PLANCK, 1900).

Em dezembro do mesmo ano, ele apresenta um artigo onde expõe uma derivação da sua lei utilizando a mecânica estatística de Boltzmann e propõe a divisão da energia de ressoadores de frequência f em elementos mínimos de energia $\epsilon = h \cdot f$.

Do seu trabalho de dezembro de 1900 destaca-se:

“[...] Consideremos, entretanto – este é o ponto mais essencial de todo o cálculo – E ser composto por um número bem definido de partes iguais e usando para isso a constante da natureza $h = 6.55 \times 10^{-27}$ erg.sec. Esta constante multiplicada pela frequência normal ν dos ressoadores nos dá o elemento de energia ϵ em erg, e dividindo E por ϵ nós temos um número P de elementos de energia que devem ser divididos pelos N ressoadores. Se a razão não for um inteiro, peguemos um inteiro na vizinhança.”

Os cálculos de Planck envolvem uma distribuição aleatória dos P elementos de energia sobre os N ressoadores. Ele mesmo nos fornece um exemplo de distribuição para $P = 100$ e $N = 10$.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7	38	11	0	9	2	20	4	4	5

Isso é apenas uma forma de distribuir uma energia $E = 100\epsilon$ em 10 ressoadores com frequência f . Onde $\epsilon = hf$. Utilizando princípios de análise combinatória e da mecânica estatística, Planck foi capaz de deduzir sua fórmula para a radiação do corpo negro. O que é importante ressaltar aqui é o estabelecimento desse valor mínimo de energia para que a equação correspondesse aos dados experimentais. Utilizando o exemplo de Planck acima podemos discutir o que aconteceria se pudéssemos dividir a energia E em partes tão pequenas quanto se quisesse. Por exemplo, se a constante fosse a metade do valor de h, teríamos P igual a 200, o que aumentaria enormemente o número de formas de distribuir os elementos nas 10 posições. No caso de a energia ser distribuída continuamente, as formas de distribuição dessa energia seriam infinitas.

Para tentar sentir o espanto dos físicos da época com essa descontinuidade nos valores de energia, imagine que você construiu uma régua com uma unidade de medida bem pequena que vamos chamar de “qmetro”, então você começa a medir as coisas na sua casa e tudo que você mede tem um número inteiro de qmetros. Digamos que mede espessura da folha do caderno e tem 10 qmetros, mede um grão de areia e tem diâmetro de 50 qmetros e mesmo que meça algo muito maior como a espessura da caneta, ainda dá algo como 500 qmetros. O mundo parece ter sido construído em qmetros, nunca achamos 0,5 qmetro em qualquer medida feita. Seria um espanto, não é mesmo? Achar um valor mínimo para elementos de energia também foi desconcertante para os físicos da época.

A equação de Planck é dada por:

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

Onde: u é a intensidade de energia,

f é a frequência da radiação (também é possível escrever a equação em termos do comprimento de onda, λ),

h e k são as constantes de Planck e Boltzmann, respectivamente, e

c é a velocidade da luz.

Um exemplo importante da aplicação da lei de Planck em comparação com dados reais coletados por satélites está relacionado à relevância de alguns compostos químicos para o efeito estufa conforme figura abaixo:

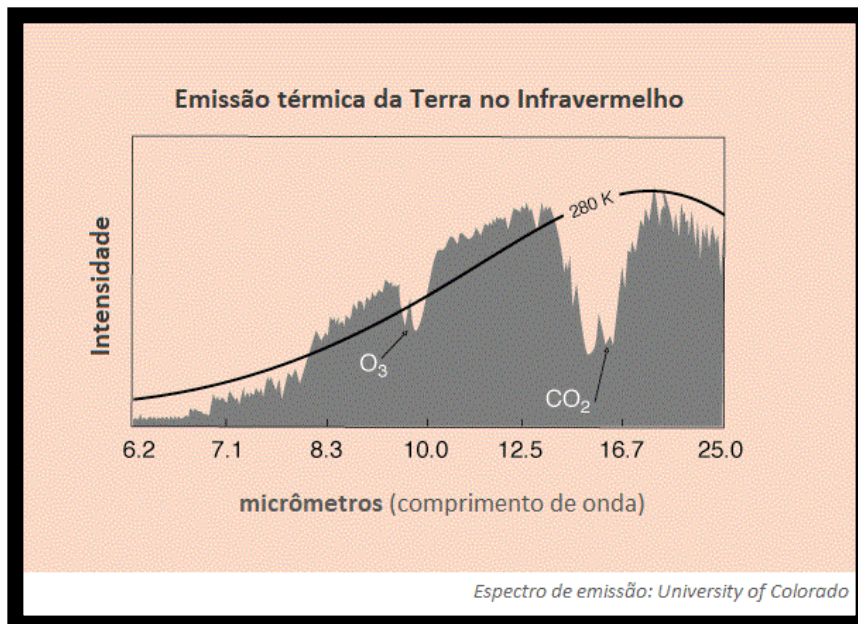


Fig.01 (Fonte: <https://www.saberatualizado.com.br/2019/11/quais-os-mecanismos-do-efeito-estufa.html>)

Observe que comprimentos de onda relacionado ao espectro de absorção do CO₂, principalmente, chegam numa intensidade muito menor do que o previsto pela teoria, mostrando assim, que parte da radiação térmica fica retida na atmosfera devido a absorção e aquecimento destas moléculas.

No caminho histórico do entendimento do princípio quântico, aparece, em 1905, a figura de Albert Einstein. Neste ano, conhecido como o ano miraculoso de Einstein, ele publica diversos artigos importantes. Mas, para nosso estudo, vamos nos ater ao trabalho intitulado “Sobre um Ponto de Vista Heurístico a respeito da Emissão e Transformação da Luz”. Neste trabalho, Einstein apresenta uma visão diferente da de Planck ao interpretar o elemento de

energia, $\varepsilon = hf$, como a energia de uma partícula de luz, para isso ele começa seu trabalho diferenciando como os físicos tratam corpos ponderáveis (partículas ou corpos compostos por várias partículas) e a distribuição espacial contínua das ondas eletromagnéticas.

Acontece que Einstein propõe algo diferente para a luz ao tratar problemas como o da radiação do corpo negro e a produção de raios catódicos por radiação ultravioleta (efeito fotoelétrico).

“Me parece que as observações associadas à radiação do corpo negro, fluorescência, produção de raios catódicos por radiação ultravioleta e outros fenômenos conectados com a emissão ou transformação da luz é entendido mais prontamente assumindo-se que a energia da luz é distribuída descontinuamente pelo espaço. De acordo com o pressuposto a ser considerado aqui, a energia de um raio de luz espalhando-se de uma fonte pontual não é continuamente distribuída sobre um espaço crescente mas consiste de um número finito de quanta de energia que são localizados em pontos do espaço, movendo-se sem dividir-se, e que podem ser somente produzidas e absorvidas como uma unidade completa.”

“Existe uma profunda distinção formal entre os conceitos teóricos que os físicos formaram a respeito dos gases e outros corpos ponderáveis e os processos da teoria eletromagnética Maxwelliana no chamado espaço vazio. [...] De acordo com a teoria de Maxwell, energia é considerada uma função espacial contínua no caso de fenômenos puramente eletromagnético, incluindo a luz, enquanto a energia de objetos ponderáveis pode, de acordo com a atual concepção dos físicos, ser representada como uma soma feita sobre os átomos e elétrons. A energia de um corpo ponderável não pode ser subdividida arbitrariamente em tantas ou tão pequenas partes, enquanto a energia de um raio de luz de uma fonte pontual (de acordo com a teoria de Maxwell ou, mais genericamente, de acordo com qualquer teoria de ondas) é continuamente espalhada sobre um volume crescente.” (EINSTEIN, 1905).

Há então uma diferença na forma como os físicos tratam a distribuição de energia em corpos ponderáveis e na radiação eletromagnética. Nos corpos ponderáveis a energia está localizada no corpo e é trocada de forma abrupta na interação entre esses corpos. No caso da luz na teoria de Maxwell, essa troca se dá de forma contínua, como quando vamos aquecendo um objeto ou uma folha usando uma lupa, a folha vai aquecendo aos poucos até atingir a temperatura de combustão. A ideia da luz como partícula não foi bem aceita pela comunidade de físicos por um bom tempo embora o prêmio Nobel de 1921 para Einstein esteja ligado à sua contribuição para o entendimento do efeito fotoelétrico, tratado neste trabalho. A ideia de troca localizada e individualizada de que trata o princípio quântico parece começar a tomar forma com essa visão que os físicos tinham da interação entre partículas.

Para concluir esta primeira parte deste tópico que pretende mostrar como, diferentemente do que se costuma pensar, Einstein não se baseou no trabalho de Planck mas tinha uma visão diferenciada do significado do quantum de energia, deixemos uma citação de Niels Bohr que esclarece as diferenças de abordagem dos dois.

“Como se sabe, a estreita relação, originalmente elucidada por Boltzmann, entre as leis da termodinâmica e as regularidades estatísticas exibidas pelos sistemas mecânicos com muitos graus de liberdade norteou Planck em sua engenhosa abordagem do problema da radiação térmica, levando-o a uma descoberta fundamental. Enquanto, em seu trabalho, Planck interessou-se primordialmente por considerações de caráter essencialmente estatístico e, com grande cautela, absteve-se de conclusões definitivas sobre a extensão em que a existência do quantum acarretava um afastamento dos fundamentos da mecânica (clássica) e da eletrodinâmica, a grande contribuição original de Einstein para a teoria quântica (1905) foi justamente o reconhecimento de como alguns fenômenos físicos, tais como o efeito fotoelétrico, podem depender diretamente de efeitos quânticos individuais.” (BOHR, 1995. P 42-43).



Em 1907 Einstein publica um artigo, este já mais próximo das ideias de Planck sobre a quantização da energia, cujo tema é o calor específico dos sólidos. A quantização da energia conseguia explicar o porquê da tendência do calor específico dos sólidos ir a zero ao se aproximar do zero absoluto. Este trabalho e suas implicações posteriores foi bem aceito e isto incentivou à organização do Congresso Solvay de 1911. A quantização da energia começava a fazer parte das pesquisas de diversos físicos. Entre eles Niels Bohr.

1.2 Niels Bohr

Em 1913, Bohr publica um trabalho dividido em três partes e intitulado “Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas” onde ele apresenta o que chamamos de átomo de Bohr.

Fazendo uma discussão sobre os modelos atômicos conhecidos até então, especialmente os modelos de Thomson e Rutherford.

“A principal diferença entre os modelos atômicos propostos por Thomson e Rutherford consiste na circunstância de que as forças que actuam sobre os electrões no modelo de Thomson permitem certas configurações e movimentos dos electrões para os quais o sistema está em equilíbrio estável; todavia, para o segundo modelo não existem aparentemente tais configurações.”(BOHR, 1913)

Bohr aponta que a diferença principal entre os modelos de Thomson e Rutherford é que o modelo de Thomson apresenta configurações onde o átomo é estável enquanto o modelo de Rutherford estava fadado ao colapso, os átomos não poderiam existir por muito tempo. Poderia parecer óbvio optar pelo modelo estável, mas os experimentos conduzidos por Rutherford e colaboradores mostravam fortes evidências de um átomo com núcleo positivo e contendo quase toda a massa do átomo e cargas negativas de massa quase desprezível orbitando este núcleo. Acontece que a teoria física que descreveria o comportamento de cargas elétricas em movimento, a eletrodinâmica, previa um colapso deste sistema em pouquíssimo tempo. Bohr opta por trabalhar em cima do modelo de Rutherford mas faz as seguintes considerações:

“Contudo, a maneira de considerar um problema desta espécie sofreu alterações essenciais em anos recentes devido ao desenvolvimento da teoria da radiação de energia e à confirmação directa dos novos pressupostos introduzidos nesta teoria, encontrada em experiências relacionadas com fenómenos muito diferentes tais como calores específicos, efeito fotoeléctrico, raios de Rontgen, etc. O resultado da discussão destas questões parece ser um reconhecimento geral de que a electrodinâmica clássica não consegue descrever o comportamento de sistemas de dimensões atômicas. Qualquer que seja a alteração das leis do movimento dos electrões, parece necessário introduzir nas leis em questão uma quantidade alheia à electrodinâmica clássica, a constante de Planck, ou, como muitas vezes é designada, o quantum elementar de acção.”

E ainda:

“Ora o ponto essencial na teoria da radiação de Planck é que a irradiação de energia por um sistema atômico não tem lugar da maneira contínua admitida na electrodinâmica usual, mas que, pelo contrário, se dá por emissões distintamente separadas, sendo a quantidade de energia irradiada numa só emissão por um vibrador atômico de frequência ν igual a $h\nu$, em que h é um número inteiro e h uma constante universal.”

Para Bohr então, a eletrodinâmica não poderia explicar as mudanças nas órbitas dos átomos, seria necessário introduzir pressupostos da teoria da radiação de Planck conforme citação acima. Bohr então propõe os seguintes pressupostos:

“Os principais pressupostos utilizados são:

1) Que o equilíbrio dinâmico dos sistemas nos estados estacionários pode ser discutido por meio da mecânica ordinária, enquanto a passagem dos sistemas entre diferentes estados estacionários não pode ser tratada nessa base.

2) Que este último processo é seguido pela emissão de uma radiação homogênea, para a qual a relação entre a frequência e a quantidade de energia emitida é dada pela teoria de Planck.”

Bohr usa a mecânica clássica e potenciais elétricos dados pela eletrodinâmica de Maxwell para descrever as órbitas, mas postula o uso da teoria de Planck para as mudanças de órbitas. Ao propor que a mudança de órbita dos átomos obedecesse a teoria de Planck, os elétrons só mudariam de órbita por trocas de energia quantizada, estes teriam órbitas estáveis em certos níveis. Como consequência disto, Bohr conseguiu explicar o espectro de riscas do hidrogênio chegando a uma expressão que concordava com a série de Balmer quantitativamente. Ele obteve um valor bem próximo a constante dessa série, que era experimental. Apesar das dificuldades em se aceitar um modelo que misturava o clássico e o quântico, o sucesso explicativo do modelo de Bohr, para fenômenos atômicos levou à mais pesquisas utilizando a quantização de Planck. O que destacamos aqui é mais um passo em direção à aceitação do princípio quântico.

O estabelecimento do que chamamos aqui de Princípio Quântico é resultado de pelo menos duas décadas de estudos onde a constante de Planck toma papel relevante. Sugerimos, dentro das possibilidades de tempo, que sejam abordados os tópicos “Radiação do Corpo Negro”, “Efeito Fotoelétrico” e “Átomo de Bohr” para enfatizar o processo histórico de estabelecimento deste princípio. Nossa intervenção em sala de aula mostrou que, no caso de redução do tempo disponível, abordar preferencialmente o átomo de Bohr por sua relação histórica com o experimento de Stern e Gerlach. De qualquer forma, é importante destacar que a construção de um princípio não é trabalho de um homem só, conforme explicitado por Planck em discurso da conferência Nobel de 1920.

“Reportemo-nos a duas décadas atrás: foi o momento que a noção de quantum de ação surgiu pela primeira vez, a partir do acúmulo de fatos experimentais. Ela ainda não percorreu o longo e sinuoso caminho que deve levá-la ao estado adulto. [...] De um lado, essa constante era necessária para obter o valor correto da entropia, [...]; de outro, a despeito de maiores esforços, era impossível incorporá-la ao quadro da teoria clássica. [...], era cada vez mais difícil escapar do seguinte dilema: ou toda a minha série de deduções para calcular a lei da radiação do corpo negro era ilusória e não passava de um artifício de cálculo sem alcance real, ou então uma ideia que correspondia a algo fisicamente real guiava essa dedução. Nesse caso, o quantum de ação tinha papel fundamental na física. [...] Se hoje a questão está resolvida, isso deve ao trabalho incansável dos físicos que integraram o quantum em suas pesquisas.” (PLANCK, 1920)

1.3 Experimento de Stern Gerlach

O que sabemos hoje, é que o experimento original de Otto Stern e Walther Gerlach mede o spin do 47° elétron do átomo de prata (SAKURAI, 2013). Porém, em 1921 ainda não se conhecia o spin do elétron e o modelo atômico mais aceito ainda era o de Bohr generalizado por Arnold Sommerfeld e Peter Debye. O modelo orbital de Bohr utilizado nos estudos do magnetismo levou à ideia de uma quantização do espaço. Em uma manhã fria, Stern, que já vinha trabalhando no uso de feixes de átomos e acreditava na quantização do espaço, fica em sua cama pensando no problema. Se, o magnetismo do átomo só puder ser em dois sentidos, seguindo o modelo de Bohr, um campo magnético que variasse rapidamente em uma direção, dividiria o feixe em duas partes, enquanto a física clássica previa que o feixe variaria continuamente entre um valor máximo e mínimo. Gerlach já vinha estudando como construir campos do tipo imaginado por Stern e os dois construíram o experimento conforme esquema da figura abaixo. Para detalhes históricos e curiosos da história do experimento original, veja Friedrich et Hershbach (2003).

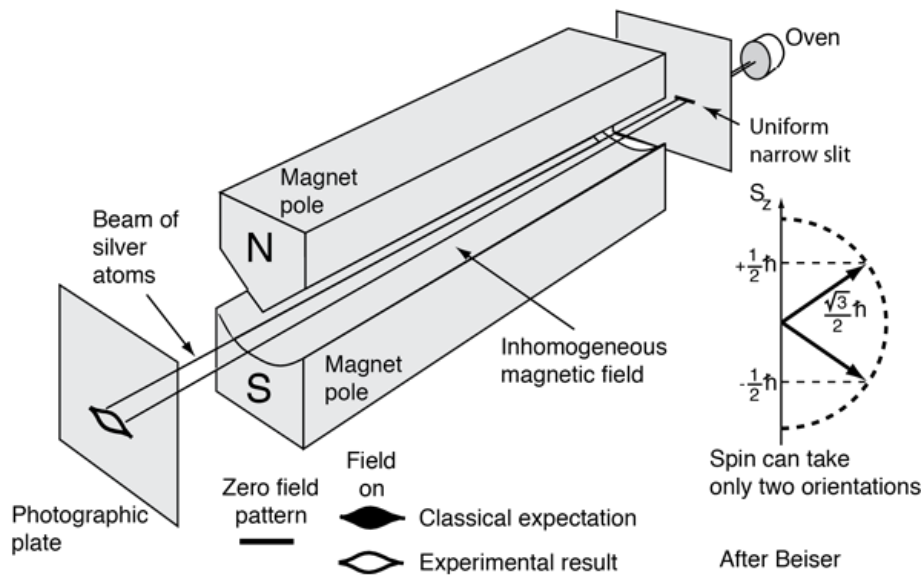


Fig. 02 (Fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/spin.html>)

Em fevereiro de 1922, Niels Bohr recebe o cartão postal abaixo com os dizeres:

“Anexo, a prova experimental da quantização direcional, nós o parabenizamos pela confirmação da sua teoria.”

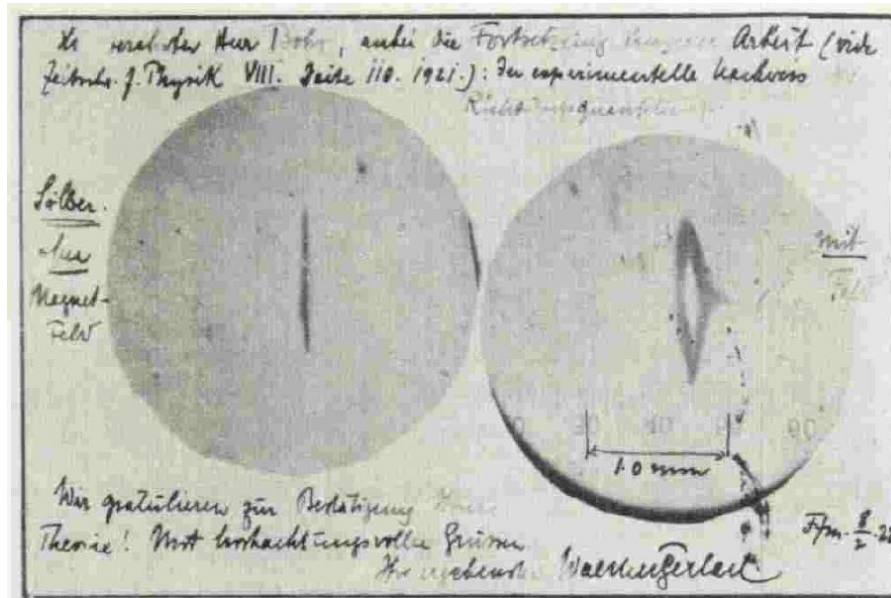


Fig. 03 (Foto retirada do artigo de Friedrich e Herschbach na Physics Today de dezembro de 2003 recebida, por estes como cortesia de Arquivos Visuais AIP Emílio Segré.)

Na figura acima, há duas placas com os resultados do experimento. Na da esquerda uma linha reta onde os átomos de prata se depositaram sem o campo magnético e a da direita o resultado obtido quando os átomos foram submetidos ao campo mostrando o depósito de átomos em duas faixas separadas.

No contexto da aplicação didática deste material, produzimos um material que ajudasse os estudantes a se familiarizarem com os resultados dos experimentos Stern-Gerlach e os sequenciais. O material tem o objetivo principal de trazer certa interação visual com os experimentos e seus resultados e, para não quebrar a sequência lógica deste texto, está detalhado no anexo A.

A discussão dos resultados dos experimentos será desenvolvida na próxima seção já introduzindo princípios e regras de representação da mecânica quântica.

2. Princípios Probabilístico e da Incerteza

2.1 Representação de estados e superposição.

O experimento de Stern-Gerlach (ESG) original mede o momento angular de spin do 47° elétron do átomo de prata tendo como valores possíveis $\pm \frac{\hbar}{2}$, onde \hbar é a constante de Planck dividido por 2π . Esses valores já indicam uma quantização e, no experimento estão relacionadas ao desvio do átomo para cima ou para baixo atingindo assim o detector na parte de cima ou de baixo. Iremos simplificar a representação do experimento para focarmos nas propriedades quânticas que forem aparecendo de forma que teremos partículas com spin $1/2$ que só podem ter dois resultados ao passar no campo magnético do aparato. Para um campo vertical teremos o seguinte esquema:



Fig. 04 Esquema simplificado de um experimento SG.

No esquema temos que uma quantidade grande (n) de partículas atravessa o experimento SG_z , Z indica que o campo magnético é vertical. Após atravessar o experimento, metade das partículas ($n/2$) são registradas na parte de cima e a outra metade na parte de baixo. Mas como descreveríamos matematicamente uma única partícula que fosse atravessar o experimento?

Primeiramente precisaríamos de informação de como essa partícula foi preparada, qual o **estado** dela no momento que entra em SG_z . Consideremos então que essa partícula foi gerada aleatoriamente como no caso do forno de prata do experimento original. Chamaremos esse estado, no instante em que a partícula adentra SG_z , de estado ψ e o representaremos por $|\psi\rangle$.

O que a MQ nos diz é que este $|\psi\rangle$ é um vetor de estado, em um espaço abstrato, que contém toda a informação sobre a partícula naquele momento. Mas o estudante ávido por entender o que falamos pode dizer, com razão, que $|\psi\rangle$ não está me dizendo nada até agora. Mas,

como sabemos que nossa partícula será submetida a SG_Z , ou seja, também devemos considerar o tipo de experimento a que ela será submetida, então poderíamos afirmar que $|\psi\rangle$ deve conter a informação de que ela será observada, no registro do aparato, em cima, $|\uparrow\rangle$, ou embaixo, $|\downarrow\rangle$. Podemos escrever $|\psi\rangle$ como uma soma das duas possibilidades. Logo escreveremos,

$$|\psi\rangle = c_1|\uparrow\rangle + c_2|\downarrow\rangle. \quad (i)$$

Até aqui nosso vetor de estado está nos dizendo que é composto por duas possibilidades, para cima e para baixo com coeficientes c_1 e c_2 respectivamente. Veremos o significado desses índices na próxima seção. Aqui fica uma primeira regra de descrição matemática da MQ.

Regra 1 – Na MQ, descrevemos um estado de uma partícula por um vetor que pode ser escrito, como uma soma (superposição) de outros vetores de estado. A quantidade desses vetores depende de que grandeza se está medindo no experimento e de como o estado $|\psi\rangle$ foi preparado.

No nosso caso, $|\psi\rangle$ está num estado de superposição de apenas dois outros estados e vamos usá-lo como exemplo justamente por simplicidade. As regras ou princípios da MQ que colocaremos se aplica a superposições (somadas) de até infinitos estados, mas queremos nos ater mais aos princípios que as dificuldades matemáticas que possam surgir.

2.2 O Princípio Probabilístico

Nós apresentamos, de uma maneira um tanto arbitrária, uma forma de representar o estado de uma partícula na MQ. Admitimos ainda, com base apenas no experimento SG, que esse estado pode ser descrito como uma soma dos estados possíveis naquele experimento. Mas o que significa este estado? A resposta vem da interpretação de Max Born que se resumirá na regra 2 e no princípio probabilístico, descritos abaixo.

Regra 2: O quadrado do coeficiente de cada estado da superposição que descreve os estados possíveis de um arranjo experimental quântico nos dá a probabilidade daquele estado ocorrer.

Tentemos entender melhor esta regra usando a descrição de estado que demos para o ESG. Observe que, se a partícula está em um estado, a probabilidade de encontrá-la neste estado é 1 (100%).

$$|\psi|^2 = 1. \quad (ii)$$

Com esta interpretação, podemos determinar os coeficientes de (i). Vamos representar o estado $|\psi\rangle$ do nosso experimento como uma matriz coluna 2×1 ,

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}, \text{ com } c_1 \text{ e } c_2 \text{ sendo números complexos (algo característico da MQ)}$$

O quadrado dela pode ser descrito como,

$$\langle\psi|\psi\rangle = (c_1 * c_2 *) \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = |c_1|^2 + |c_2|^2 = 1. \text{ (iii)}$$

Aqui introduzimos outra representação o $\langle\psi|$ que, no nosso caso é matriz linha com os elementos conjugados de $|\psi\rangle$.

Como no nosso caso a possibilidade dos estados $|\uparrow\rangle$ e $|\downarrow\rangle$ são iguais, uma solução para (i), juntamente com a (iii) seria da seguinte forma.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |\uparrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\downarrow\rangle. \text{ (iv)}$$

Onde os estados $|\uparrow\rangle$ e $|\downarrow\rangle$ seriam representados pelas matrizes $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ e $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, respectivamente.

Logo, o quadrado do índice de cada vetor na superposição indica a probabilidade daquele estado ocorrer (50%). ψ é toda a informação “preditiva” que a quântica nos dá sobre um sistema físico e assim trabalhamos com probabilidades de ocorrer determinado estado.

É importante ressaltar que ψ é uma função da posição e do tempo que pode ser obtida resolvendo-se a equação de Schrödinger, por exemplo. A solução dessas equações foge nossa proposta aqui de apresentar apenas os princípios da MQ de forma tão acessível quanto possível a um aluno com domínio de matemática básica do ensino médio (especialmente matrizes e números complexos). A notação de Dirac com “bras”, $\langle \quad |$, e “kets”, $|\quad \rangle$, foi introduzida para deixar claro se tratar de uma descrição quântica e os símbolos usados dentro deles devem ser tão intuitivos quanto possível. Daí o uso das setas, por exemplo.

Dito isto, enunciemos um segundo princípio.

Princípio Probabilístico – A MQ descreve possibilidades dos sistemas usando uma função de onda complexa, ψ , cujo módulo quadrado indica uma probabilidade. Esta função pode ser obtida pela resolução da equação da Física Quântica coerente com o problema.

Este tipo de descrição matemática incomodava físicos que tiveram grande participação no desenvolvimento da MQ. É o tipo de coisa que fez Einstein dizer que Deus não joga dados. A expressão matemática (iv) poderia ser uma representação do gato meio vivo e meio morto do experimento mental de Schrödinger, uma forma de tentar apontar as dificuldades que formalismo quântico tinha de descrever uma realidade objetiva. Bohr (1949) confirma a existência desse desconforto:

A compreensão quantitativa de um vasto número de dados empíricos não podia deixar dúvidas quanto a fecundidade do formalismo quântico, mas seu caráter abstrato deu origem a um sentimento muito difundido de mal-estar. Na verdade, elucidar a situação iria exigir um exame minucioso do próprio problema observacional na física atômica. (BOHR, 1995.)

Como se vê, nosso mal-estar com o que foi dito até aqui é justificável. Bohr apontou acima algo que deve ter passado despercebido para a maioria dos leitores. Na física atômica (MQ) o problema observacional (de medida) é fundamental. Observe que na nossa descrição de estados quânticos não há grandezas físicas envolvidas, apenas falamos de probabilidades. Nosso próximo tópico introduz, sempre da forma mais conceitual possível, o ente matemático que, sendo operado com o estado, vai nos dar um valor físico mensurável. A forma como esses entes matemáticos interagem para nos dar possibilidades ou valores médios de grandezas físicas é o que mais diferencia a física quântica da clássica. Mais ainda, a forma como algum deles se relacionam um com o outro dá origem a um princípio tipicamente quântico, o princípio da incerteza.

2.3 Observáveis e o Princípio da Incerteza.

Este tópico é muito interessante e é onde provavelmente as coisas ficam estranhas em vez de ficarem só complicadas. A princípio, se você aceitar que a MQ tem uma descrição matemática com base na álgebra linear, a presença de operadores lineares para representar grandezas físicas observáveis pode ser considerado um fator complicador, mas não necessariamente uma estranheza. Veja que estamos mais familiarizados com a representação vetorial da física clássica para forças, velocidades, posição etc. Isto não deixa de ser uma aceitação de um tipo de descrição matemática. Então, se você aceita que a MQ tem uma representação matemática diferente, isto por si só não é necessariamente um espanto. Portanto, se você quer entender a MQ, inicialmente aceite essa descrição. As consequências dessa descrição é que talvez não seja tão “digeríveis” quanto a descrição em si.

Observáveis são grandezas físicas que podem ser medidas, por exemplo, a posição, velocidade (momento), energia e, o que estamos usando neste texto, spin. Estas grandezas são

representadas por operadores lineares que são representados aqui por uma letra com circunflexo ($\hat{A}, \hat{B}, \hat{p}, \hat{x}, \hat{S}$). A característica matemática desses operadores para a MQ é que ele seja hermitiano. Detalhes formais à parte, isso quer dizer que, atuando sobre o estado (função complexa) produza como resultado, números reais. Ou seja, os possíveis valores resultantes da medida de um experimento devem ser números reais (ainda bem!!).

Como estamos usando o experimento SG para apresentar alguns princípios da MQ, usaremos como exemplo os operadores de spin \hat{S}_x , \hat{S}_y e \hat{S}_z como as matrizes abaixo:

$$\hat{S}_x = \frac{\hbar}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \hat{S}_y = \frac{\hbar}{2} \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}; \hat{S}_z = \frac{\hbar}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

Exercício 1: Faça o produto de \hat{S}_z por $|\uparrow\rangle$ e, também, por $|\downarrow\rangle$. Você observará que o resultado será um valor numérico vezes os respectivos vetores e esses valores são os valores possíveis para o experimento estudado ($\pm \frac{\hbar}{2}$).

Se tivéssemos feito o experimento SG como o campo magnético na direção x e y, respectivamente, os operadores \hat{S}_x e \hat{S}_y podem ser vistos como operadores que, usando soluções alternativas à (iv) conduziriam, também, aos valores $\pm \frac{\hbar}{2}$. Porém, os estados correspondentes ao \hat{S}_x seriam, em nossa notação que pretende ser intuitiva, direita e esquerda ($|\rightarrow\rangle$ e $|\leftarrow\rangle$).

Não se preocupe tanto, agora, com a origem matemática desses resultados, mas com a regra que se segue:

Regra 3 – As grandezas físicas mensuráveis, observáveis, são representadas por operadores que, atuando num espaço de estados, convenientemente escolhido, nos fornece os valores possíveis para o fenômeno quântico estudado.

No caso do spin do elétron, só temos duas possibilidades de resultado, a depender da posição do campo magnético do experimento, para cima ou para baixo (Z), esquerda ou direita (Y), para dentro ou para fora (X). Isso indica um espaço de possibilidades bidimensional e por isso usamos os vetores $|\uparrow\rangle$ e $|\downarrow\rangle$.

2.4 Grandezas não-comutativas e o Princípio da Incerteza.

Como dito, até aqui o problema do uso de operadores é um complicador no cálculo das grandezas físicas e sua relação matemática com os estados deixa o processo muito diferente da física clássica cujas grandezas físicas medidas e entes matemáticos que as representam se confundem. O que discutiremos a partir daqui é, para nós, onde mora a verdadeira estranheza

da MQ e onde não encontramos paralelo na física clássica. O motivo de se usar álgebra linear e operadores para observáveis está historicamente ligado aos estudos de Werner Heisenberg quando esteve em Göttingen sob orientação de Max Born. Em um artigo de 1925, Heisenberg, que já aceitara que a mecânica quântica deveria ser descrita apenas em termos de grandezas mensuráveis, procurou as características dessas grandezas e suas propriedades. Algo que ele percebeu foi que a multiplicação dessas grandezas não tinha a propriedade comutativa, ou seja, $ab \neq ba$. Born percebeu posteriormente que essas grandezas seriam matrizes e, com a ajuda de Pascual Jordan, que dominava bem o ferramental matemático necessário, estabeleceu os fundamentos da mecânica quântica matricial. Ao final de 1925, Born, Heisenberg e Jordan publicam um texto sobre a nova mecânica. Nesse mesmo período, Paul Dirac desenvolveu uma mecânica baseada em operadores após ler o primeiro artigo de Heisenberg. Por um caminho completamente diferente, inspirado nos trabalhos de Louis de Broglie, Erwin Schrödinger desenvolve uma mecânica quântica ondulatória que se mostrará equivalente a matricial (Ref: Scientific American).

A formulação matricial de Heisenberg e Born se baseiam na interpretação de experimentos quânticos e no princípio de que apenas grandezas observáveis deveriam ser usadas na descrição matemática da mecânica quântica. Schrödinger seguiu um caminho da formulação mais intuitiva para os físicos. Louis de Broglie havia proposto, em 1924, uma formulação dual da natureza da luz, estendida a partículas de matéria, onde haveria uma onda associada à cada partícula em movimento. Schrödinger chega a uma equação que descreve a dinâmica dessa onda para o caso não-relativístico. A formulação ondulatória passa a ser a mais usada, provavelmente por ser mais intuitiva para os físicos. Porém, abre-se a discussão sobre o que fundamenta a MQ. Em 1927, Heisenberg publica um artigo dando significado físico à propriedade de não-comutabilidade. Utilizando as grandezas posição e momento ele demonstra que elas possuem uma relação de indeterminação fundamental. De forma que:

Princípio da Incerteza - o aumento da certeza na medida de uma grandeza observável ocasiona um aumento na incerteza da medida do outro observável cujo operador não comuta com o primeiro. Se chamarmos de Δx a incerteza na posição e Δp a incerteza do momento linear, o princípio da incerteza estabelece que:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Exercício 2: Verifique se a propriedade comutativa é válida para \hat{S}_z com \hat{S}_x . As grandezas físicas associadas a esses operadores possuem uma relação de incerteza?

Normalmente este princípio é explicado pelo fato de que, ao se tentar medir a posição de uma partícula com precisão, precisamos de uma onda com comprimento pequeno (alta frequência) que, conforme a relação $\varepsilon = h\nu$, possui uma energia alta alterando bastante o momento da partícula. É baseado no argumento que Heisenberg usa em seu experimento mental (gedankenexperiment) com um microscópio de raios gama. Conforme argumenta Pessoa Jr. (2019), Heisenberg vai, em seu artigo, de um “não posso conhecer” para um “não é” a respeito da indeterminação das duas grandezas. De fato, esta explicação para o princípio da incerteza faz parecer que não podemos conhecer as duas grandezas envolvidas por dificuldades experimentais. Todavia, por sua posição filosófica, Heisenberg afirma que as duas grandezas não são mensuráveis simultaneamente. Uma afirmação sobre a natureza dos objetos quânticos.

Em nossa opinião, e de outros autores que usam um sistema quântico de dois níveis para expor os princípios da MQ (SAKURAI, PINTO NETO, NUSSENZVEIG), o uso do experimento SG deixará as consequências deste princípio mais escancaradas.

3 Experimentos SG Sequenciais.

Vamos realizar agora um experimento com 3 aparatos SG em sequência e faremos observações relativas aos resultados conforme façamos medidas no sistema de aparatos. Como no experimento do início do capítulo, chamaremos SG_z os aparatos com campo magnético vertical tendo como estados possíveis $|\uparrow\rangle$ e $|\downarrow\rangle$. Entre dois SG_z colocaremos um aparato com campo magnético horizontal que chamaremos SG_x com estados possíveis $|\rightarrow\rangle$ e $|\leftarrow\rangle$ (direita e esquerda).

I. Com estado inicial definido, mas sem medição no aparato intermediário (SG_x).

Como nosso aparato SG_z só pode ter os dois estados citados, se bloquearmos a passagem das partículas no caminho por baixo, saberemos que todas as partículas que chegam em SG_x estão no estado $|\uparrow\rangle$, temos certeza disto, é uma forma de medir este resultado. O que ocorre se passarmos todas essas partículas por SG_x e em seguida por outro SG_z ? O resultado está no esquema abaixo.

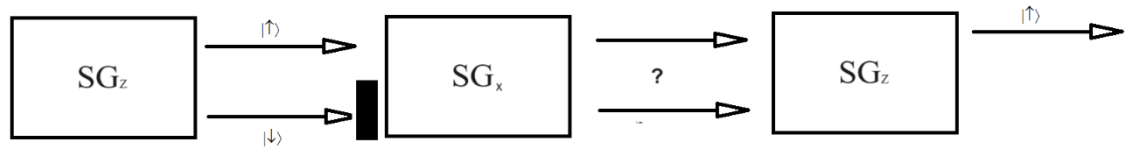


Fig. 05 Experimentos Stern-Gerlach em sequência 1

Obs I.1: Os estados indicam possibilidades e a descrição matemática para a mecânica quântica é válida para uma única partícula.

Obs I.2: Neste experimento inicial, bloqueamos a passagem, logo, a possibilidade, de entrarem partículas com estado $|\downarrow\rangle$ em SG_x .

Obs I.3: As partículas vão de SG_x para SG_z sem que saibamos se elas têm estado $|\rightarrow\rangle$ ou $|\leftarrow\rangle$, ou seja, se saem pela direita ou esquerda do aparato. Mas, o sistema garante que independente de qual caminho tomar, a partícula chega ao segundo aparato SG_z .

O resultado desta configuração é que todas as partículas que saem do segundo SG_z saem por cima, o que não é estranho já que todas elas chegaram em SG_x com este estado. O resultado seria semelhante se bloqueássemos o caminho superior, após o segundo SG_z , todas as partículas sairiam agora por baixo, mostrando que passar por SG_x não alterou seu estado. Façamos agora uma pequena mudança no experimento.

II. Com estado inicial definido e com medição no aparato intermediário.

Obs II.1: A única mudança em relação ao experimento anterior é que agora bloqueamos um dos caminhos possíveis após SG_x , de forma que passaremos a saber (mediamos) se a partícula tem estado $|\rightarrow\rangle$ ou $|\leftarrow\rangle$.

Obs II.2: Independentemente de bloquearmos $|\rightarrow\rangle$ ou $|\leftarrow\rangle$ o resultado será o mesmo. As setas e posição dos bloqueios são apenas ilustrativas das possibilidades de dois caminhos diferentes.

O resultado do experimento é o que se segue na figura e pode parecer surpreendente.

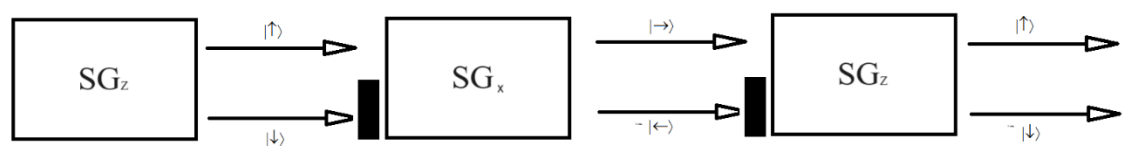


Fig. 06 Experimentos Stern-Gerlach em sequência 2

O que aconteceu aqui? Ao fazermos uma medida do estado relacionado SG_x , as partículas passam agora a sair por cima e por baixo após passarem por SG_z . Mas elas não tinham entrado em SG_x todas com estado $|\uparrow\rangle$ como em I? O que mudou?

Normalmente a explicação deste resultado é feita com uso de uma descrição ondulatória dos estados que no caso I, os estados $|\rightarrow\rangle$ e $|\leftarrow\rangle$, descritos em termos de $|\uparrow\rangle$ e $|\downarrow\rangle$ se superpõem anulando a possibilidade de um ou outro, para isso, é feita uma analogia com a polarização da luz (v. Sakurai, Nussenzveig). No caso II, o estado $|\rightarrow\rangle$ permaneceria como uma soma de possibilidades entre $|\uparrow\rangle$ e $|\downarrow\rangle$ dando o resultado do arranjo experimental II.

Nossa proposta aqui é explicar os resultados em termos do princípio da incerteza. Como vimos no exercício 2, o operador \hat{S}_z não guarda a propriedade comutativa com \hat{S}_x , de forma que, entre eles há uma relação de incerteza. Como os operadores de Spin só admitem dois resultados possíveis ($\pm \frac{\hbar}{2}$). A certeza de um gera uma incerteza no outro que possibilita os dois valores e é por isso que escolhemos o spin para explicar o funcionamento da MQ.

Observe o seguinte:

- Ao bloquear o caminho por baixo do primeiro SG_z temos certeza relacionada ao operador \hat{S}_z , portanto, incerteza em relação ao \hat{S}_x . De fato, observa-se experimentalmente que saem partículas pela esquerda e direita após SG_x . Ao não fazer medidas após SG_x , mantemos a incerteza sobre seu valor de forma que a certeza do estado relacionado à \hat{S}_z permanece intacta, o que é confirmado pelo arranjo experimental I.

- No arranjo II, fazemos uma medida relacionada ao operador \hat{S}_x obtendo certeza sobre o seu valor e, conseqüentemente, incerteza relacionada à \hat{S}_z , o que é confirmado pelo resultado do experimento II.

4 Considerações Finais

O objetivo deste texto foi apresentar as características principais da mecânica quântica usando uma introdução histórica e o experimento de Stern-Gerlach. Para isso usamos três sentenças sobre esses sistemas, que chamamos, com certa liberdade de linguagem de princípios e três regras de representação. O desenvolvimento dessa estrutura conceitual é uma proposta relacionada às dificuldades encontradas em apresentar a MQ para o ensino básico. Segundo Vigotski (2009) o conhecimento científico é sistematizado e esta sistematização é importante no

desenvolvimento qualitativo dos conceitos nos indivíduos. Por isso, buscamos apresentar a MQ de uma forma estruturada em princípios evitando que os conceitos sejam isolados fora desse contexto estrutural e aplicados onde não há indícios que os efeitos quânticos individuais tenham relevância.

O Princípio Quântico nos fala dessa descontinuidade essencial que aparece na interação entre radiação e matéria e foi justificado por alguns dos principais fenômenos que só puderam ser explicados acrescentando essa descontinuidade representada pelo quantum de energia à resolução dos problemas relativos aos referidos fenômenos. A regra 1 e o Princípios Probabilístico dizem respeito a como representamos os estados quântico e o que esses estados significam. Em termos bem livres esses estados significam possibilidades. Os operadores relacionados a grandezas observáveis atuam sobre os estados que escolhidos convenientemente nos dão os possíveis valores a serem medidos em um experimento. O Princípio da Incerteza é que talvez seja realmente um princípio físico ou lei. Embora possa ser derivado matematicamente da álgebra não-comutativa da MQ, da forma como o usamos, ele pôde nos responder a estranha diferença entre os arranjos experimentais I e II. É um princípio que caracteriza bem um fenômeno quântico e está intimamente ligado ao problema da medida. As implicações na diferença entre os arranjos I e II são bastante profundas e levantam questões sobre a realidade das grandezas observadas pois, se dizemos que a propriedade spin “para cima” é real, como uma partícula pode deixar de tê-la por tirarmos uma possibilidade de ela adquirir outra propriedade (spin “para a esquerda”)? Atentemos para o fato que o resultado vale para partículas individuais. Se deixarmos a possibilidade de ela chegar ao terceiro aparato por dois caminhos (esquerda e direita) ela continuará com a propriedade spin “para cima” e sairá do terceiro aparato sempre por cima. Se tirarmos dela a possibilidade de um dos caminhos, ao chegar ao terceiro aparato, ela poderá sair por cima e por baixo. Isso deixa espaço para diversas interpretações da MQ. O que fizemos aqui foi mostrar que, a partir do princípio da incerteza, os dois arranjos são distintos e devem ser tratados distintamente. Um dos arranjos não permite dizer qual caminho a partícula tomou, o outro permite dizer e os resultados são distintos. Presos à linguagem clássica, os físicos chamaram o primeiro de arranjo do tipo onda, pois as duas possibilidades do segundo aparato interferem anulando a possibilidade da partícula sair por baixo preservando a informação do primeiro aparato. Ao segundo arranjo chamam do tipo partícula, pois sabemos a trajetória que o objeto quântico tomou, mas perdemos a informação do primeiro aparato.

Bohr afirmou que não se pode fazer um arranjo experimental ao mesmo tempo do “tipo onda” e do “tipo partícula” e que para entender os fenômenos quânticos precisamos dos dois

tipos de fenômenos para compreender a física quântica. As informações são complementares. Até o momento, não é do nosso conhecimento que se tenha feito qualquer experimento onde o princípio da incerteza tenha sido violado, de forma que é por isso que consideramos neste texto este princípio como fundamental para caracterizar a Mecânica Quântica.

Esperamos que este texto seja útil para o professor do ensino básico que pretenda abordar este tema e não queira ficar preso à teoria quântica Planck, explicação do efeito fotoelétrico, átomo de Bohr e etc. sem conseguir ligá-los a uma estrutura geral da física quântica, a uma mecânica quântica.

APÊNDICE A – Observação de Resultados Experimentais simulados e Construção de Modelos Interpretativos dos Experimentos Stern-Gerlach Sequenciais.

Com o intuito de cumprir o objetivo da segunda etapa da nossa sequência, FAZER, construímos uma simulação de leitura de resultados de laboratório com posterior construção de maquetes interpretativas dessas leituras. Para tanto, construímos um dispositivo de observação que, embora não tenha paralelo com outro real, simulasse alguma dificuldade de leitura e interpretação de resultados, comuns em laboratórios. Outro motivo para o uso desta ferramenta foi promover uma atividade mais concreta e visual para um tema tão abstrato quanto a mecânica quântica fazendo ainda com que os estudantes se familiarizassem com os resultados dos experimentos antes da discussão teórica (EXPLICAR). Primeiramente explicaremos como foi aplicado o material e, no fim deste anexo, daremos detalhes da construção do mesmo.

1 – Apresentação do material e objetivos da atividade: Apresentação da caixa de observação (fig. 07) e dos cartões (fig. 08) a serem inseridos na caixa para a observação.



Fig. 07 – Caixa de observação com led azul e vermelho.



Fig. 08 – Cartões para observação na caixa.

As seguintes orientações foram passadas à cada equipe:

Orientações:

- 1 - Cada cartão (chapa) representará uma sequência de experimentos SG.
- 2 – O resultado observado, corresponde ao registro após o SG_x com a indicação da entrada com estado escolhido sendo $Z+ = |\uparrow\rangle$ ou $Z- = |\downarrow\rangle$.
- 3 – Para observar o resultado correspondente ao registro logo após o experimento do tipo X, deve-se usar a luz azul e, para o registro após o segundo experimento Z, a luz vermelha pois são estas cores que contrastam mais com cada um deles.
- 4 – Observe se há curvatura (acúmulo de átomos) dos dois lados ou apenas em um e se ela está para cima/baixo ou esquerda/direita.
- 5 – O registro na chapa pode não estar muito claro, então mude as cores até ter certeza e anote o resultado.
- 6 – Leve suas anotações para construir o modelo com caixas de fósforos.
- 7 – Cada caixa deve ser identificada com Z ou X. Os palitos indicarão por onde os átomos passaram então o resultado do aparato X está invertido. Se houve acúmulo à esquerda, quer dizer que bloqueamos a esquerda e passaram átomos apenas pela direita $X+$.
- 8 – Procure ser criativo na identificação das caixas.

2 – Leitura dos cartões e construção dos modelos.

Sob a orientação do professor, estimulou-se que todos os membros das equipes fizessem a observação e expusesse o resultado lido havendo assim debate sobre a leitura dos resultados. Deixando ao máximo a autonomia na interpretação dos estudantes, o professor deve fazer observações sobre o que se está lendo e remeter sempre ao resultado (figura) do experimento SG original no qual foram baseados os desenhos dos cartões com o intuito de chegarem ao resultado esperado do seu cartão.

Posteriormente, foram distribuídos, para cada equipe, caixas de fósforos vazias, cola bastão, fita adesiva, espetos de madeira sem pontas e canetinhas para que eles construíssem as maquetes da sequência de experimentos. Abaixo, figura dos estudantes construindo as maquetes dos experimentos. Muitos optaram pela estratégia de colar as caixas de fósforo sobre uma folha de papel para evitar o desencaixe dos palitos com as caixas.



Fig. 09 Estudantes fazendo a observação e discutindo os resultados.



Fig. 10 – Estudantes finalizando maquete baseada na chapa II.

Construção da caixa de observação e cartões:

- a) Caixa de papelão cúbica: Utilizamos uma caixa de cápsulas de café, mas pode ser feito recortando uma caixa de leite ao meio, fechando o lado aberto com um pedaço da outra metade.
- b) Leds vermelho e azul: Utilizamos um dispositivo presente em kit de ótica e fizemos um orifício para encaixá-lo na caixa de observação, conforme figura 11.



Fig. 11 – Caixa com orifício e dispositivo com leds

- c) Foi feito mais um orifício onde encaixamos um cilindro por onde é feita a observação. Algo para dar uma aparência de dispositivo de laboratório, ao estilo microscópio. Os cartões são introduzidos por cima na faze do cubo oposta ao dispositivo de led.

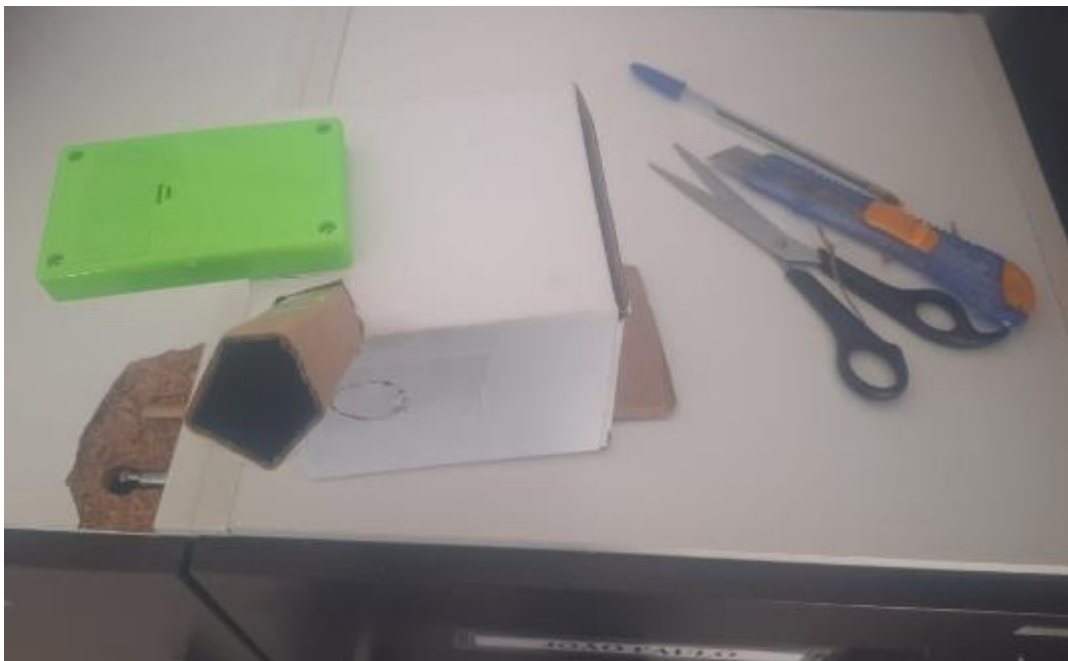


Fig. 12 Caixa montada, sem acabamento final.

d) Cortamos pedaços retangulares de papelão para fazer os cartões onde colamos papel preto onde seriam desenhados os “resultados” do experimento SG. Foram feitos desenhos semelhantes ao ESG original, com cor vermelha para o experimento X (destacava-se em preto no led azul) e o Z em azul (destacava-se em preto no led vermelho). Ver figura 08.

Importante destacar que o objetivo de se construir esse dispositivo de observação era o de gerar curiosidade nos alunos e envolvê-los na construção dos modelos. Observamos que é possível cumprir essa etapa do FAZER de forma mais simplificada fazendo algum tipo de cartão de observação a partir do qual eles construam seus modelos. De qualquer forma, a reação aos aparatos foi positiva e gerou a atenção esperada para o objetivo da aula.

REFERÊNCIAS

BECK, G. **Formalismo Matemático e Representação Física**. Tradução: Antonio Videira; Tradução: Rafael Luz. 1 ed. São Paulo: Scientiae Studia, 2022.

BACHELARD, G. **A Filosofia do não** (Filosofia do Novo Espírito Científico - Título da tradução portuguesa); Lisboa :Editorial Presença, 1972.

BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, 2018.

CASSIRER, Ernst. **Linguagem e mito**. Trad, J. Guinsburg, Miriam Schnaiderman, São Paulo: Perspectiva, 2013.

EINSTEIN, Albert. “Concerning an Heuristisc Point of View Toward the Emission and Transformation of Light.” *Anallen der Physik* (Leipzig) **17**, 1905, p. 132-148. Disponível em: [Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909 \(English translation supplement\) Page 86 \(100 of 416\) \(princeton.edu\)](#). Acesso em: 31 mai. 2021.

EINSTEIN, Albert. **Como vejo o mundo**. Trad. H. P. de Andrade. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1981.

EL-HANI, Charbel N. Notas sobre o Ensino de História e Filosofia da Ciência na Educação Científica de Nível Superior. In **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. SILVA, Cibelle C. (org.), São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

JAMMER, Max. **Conceitos de Força: Estudo sobre os fundamentos da dinâmica**. Trad. Vera Ribeiro, Rio de Janeiro: Contraponto: Ed PUC-Rio, 2011.

LISBÔA, Roseny; PESSOA Jr, Osvaldo. **Visões Filosóficas sobre a Ciência e Natureza: Uma análise das concepções de professores de física**. 1 ed. São Paulo: FiloCzar, 2019.

KUHN, Thomas. **A Estrutura das Revoluções Científicas**; Trad. Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira, 2 reimp da 13 ed. São Paulo: Perspectiva, 2018.

MARTINS, André F. P., História e Filosofia da Ciência no Ensino: Há muitas pedras nesse caminho... **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.24, n.1, p.112-131, abr. 2007.

NOVAES, Marcel; STUDART, Nelson. **Mecânica Quântica Básica**. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016.

OSTERMANN, F.; PRADO, S.D. e RICCI, T.S.F. Desenvolvimento de *software* para o ensino de fundamentos de física quântica. **A Física na Escola**, v.7, n.1, p.22-25.

OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Cláudio; PRADO, S. D.; RICCI, T. F. Investigando a aprendizagem de professores de física a cerca do fenômeno de interferência quântica. 2008. **Ciência & Educação**. v.14, n.1, p.35-54.

OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Cláudio; PRADO, S. D.; RICCI, T. F. Fundamentos da Física Quântica à luz de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. 2009. **Revista Eletrônica de Enseñanza de las Ciencias**. v.8, n.3.

PINTO NETO, Nelson. **Teoria e Interpretações da Mecânica Quântica**. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2010.

PINTO, A. Custódio; ZANETIC, J. É possível levar física quântica para o ensino médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.16, n.1: p. 7-34, abr. 1999.

PLANCK, Max. “On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum” *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* v. **2**, 1900, p.237-245. English Translation from “The Old Quantum Theory” ed. By D. ter Haar, Perfarmon Press, 1967, p. 82.

VIGOTSKI, Lev S., **A formação social da mente**; Trad. José Cipolla Neto *et al.*, 7 ed. São Paulo: Martins Fonte, 2007.

VIGOTSKI, Lev S., **A construção do pensamento e da linguagem**; Trad. Paulo Bezerra, 2 ed. São Paulo: Martins Fonte, 2009.